



**HAL**  
open science

# Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes

Vincent Cocquempot

► **To cite this version:**

Vincent Cocquempot. Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes. Automatique / Robotique. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2004. tel-00197595

**HAL Id: tel-00197595**

**<https://theses.hal.science/tel-00197595>**

Submitted on 15 Dec 2007

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

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

# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

## Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes

10 Novembre 2004

par

Vincent COCQUEMPOT  
Maître de Conférences à l'IUT A de LILLE

### Composition du jury

*Rapporteurs :* Professeur Michel KINNAERT, Université Libre de Bruxelles  
Professeur Didier MAQUIN, Institut Polytechnique de Lorraine  
Professeur Janan ZAYTOON, Université de Reims, Champagne-Ardennes

*Directeur :* Professeur Marcel STAROSWIECKI, Université de Lille 1

*Examineurs :* Professeur Sylviane GENTIL, Institut National Polytechnique de Grenoble  
Professeur Jean-Pierre RICHARD, Ecole Centrale de Lille



*A mon épouse Delphine,  
A mes enfants Clément, Bastien, Nathan, Anaïs  
A mes ami(e)s et collègues.*



## Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectué au *Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL UMR 8021)* sous la direction scientifique de Marcel Staroswiecki, Professeur à l'école Universitaire Polytechnique de Lille. Je tiens, Marcel, à t'exprimer ma profonde reconnaissance pour tout ce que tu m'as apporté durant ces années. Tes connaissances scientifiques et ta personnalité ont été et seront toujours pour moi une référence. Tes conseils, tes encouragements et la confiance que tu m'as accordés, m'ont permis de devenir ce que je suis aujourd'hui et je t'en remercie.

Je tiens aussi à remercier très cordialement pour leur sympathie et leur amitié, tous les collègues du laboratoire et particulièrement ceux de l'équipe SFSD : Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques. Je remercie bien entendu, les étudiants que j'ai encadrés et qui contribuent pour une part importante à ce mémoire.

Mes remerciements vont également à tous les collègues des établissements d'enseignement supérieur que j'ai fréquentés, et plus particulièrement tout le personnel du département GEII de l'IUT A de Lille.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à tous les chercheurs que j'ai côtoyés durant ces années, que ce soit dans les séminaires ou groupes de travail auxquels j'ai participé ou que ce soit dans le cadre de séjours au laboratoire. Un merci tout particulier à Roozbeh, Erik, Xianrong, Carsten, Khalid et bien sûr à Bin. Leurs séjours au laboratoire ont fait naître de véritables amitiés qui, je l'espère, perdureront.

Je remercie aussi vivement les membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mes travaux. Soyez assurés de ma plus profonde reconnaissance pour l'attention que vous avez portée à ce manuscrit et pour le temps que vous avez consacré à son évaluation.

Ma reconnaissance s'adresse enfin à tous ceux qui de près ou de loin m'ont encouragé durant ces années. Merci à ma famille et mes amis d'accepter le peu de disponibilité que parfois je leur apporte.



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>I Rapport de synthèse</b>	<b>3</b>
<b>1 Curriculum Vitae</b>	<b>4</b>
1.1 État civil . . . . .	4
1.2 Formation universitaire . . . . .	5
1.3 Emplois successifs . . . . .	5
1.4 Mandats électifs et responsabilités administratives . . . . .	6
<b>2 Activités pédagogiques</b>	<b>7</b>
2.1 Etablissements et formations . . . . .	7
2.2 Matières enseignées . . . . .	8
2.3 Productions pédagogiques, supports de cours . . . . .	11
2.4 Encadrement de projets et de stages . . . . .	11
2.5 Responsabilités liées à l'enseignement . . . . .	12
<b>3 Activités de recherche</b>	<b>13</b>
3.1 Présentation du laboratoire de recherche . . . . .	13
3.2 Recherches théoriques . . . . .	14
3.3 Recherches appliquées . . . . .	14
3.4 Encadrements . . . . .	16
3.4.1 Co-encadrements de thèses . . . . .	16
3.4.1.1 Thèse soutenue . . . . .	16
3.4.1.2 Thèses en cours . . . . .	16
3.4.2 Co-encadrement de stages de DEA . . . . .	17
3.4.3 Autres encadrements . . . . .	17
3.5 Bilan des publications . . . . .	18

3.6	Participation à des jurys de thèse . . . . .	20
3.7	Animations et responsabilités de groupes de travail . . . . .	21
3.7.1	Au niveau national . . . . .	21
3.7.2	Au niveau régional (région Nord - Pas de Calais) . . . . .	22
3.8	Diffusion de la connaissance et participation à des groupes de travail . . . . .	22
3.8.1	Séminaires et groupes internationaux . . . . .	22
3.8.2	Séminaires et groupes nationaux . . . . .	23
3.8.3	Séminaires internes au laboratoire . . . . .	23
3.9	Collaborations avec des chercheurs français ou étrangers . . . . .	24
3.10	Organisation de sessions dans des conférences internationales . . . . .	25
3.11	Membre de comités scientifiques internationaux . . . . .	25
3.12	Activités d'évaluation . . . . .	26
<b>II</b>	<b>Mémoire de recherche</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Principes généraux des méthodes de surveillance à base de modèle</b>	<b>28</b>
4.1	Introduction . . . . .	28
4.2	Surveillance à base de modèle . . . . .	28
4.3	Les méthodes de génération de résidus . . . . .	30
4.4	La détection . . . . .	31
4.5	La localisation . . . . .	32
4.6	L'identification des défaillances . . . . .	35
4.7	Conclusion . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Méthodes de génération de résidus</b>	<b>37</b>
5.1	Utilisation des Relations de Redondance Analytique (RRA) . . . . .	37
5.1.1	Principe général . . . . .	37
5.1.2	Contributions . . . . .	40
5.1.2.1	Génération de résidus dans le cas des systèmes linéaires décrits par un schéma-bloc de transfert . . . . .	40
5.1.2.2	Optimisation des résidus dans le cas linéaire . . . . .	41
5.1.2.3	Extension de la méthode de l'Espace de Parité au cas non linéaire . . . . .	42
5.1.2.4	Evaluation des dérivées . . . . .	43
5.1.2.5	Application à la machine asynchrone . . . . .	43
5.2	Utilisation d'observateurs . . . . .	49

---

5.2.1	Les observateurs pour la surveillance . . . . .	49
5.2.2	Contributions . . . . .	53
5.2.2.1	Diagnostic des pannes capteurs et actionneurs à l'aide d'observateurs adaptatifs . . . . .	53
5.2.2.2	Diagnostic des pannes d'actionneurs pour une classe de systèmes non-linéaires à paramètres inconnus . . . . .	54
5.2.2.3	Utilisation d'observateurs à mode glissant pour la surveillance des systèmes affines . . . . .	56
5.2.2.4	Synthèse d'observateurs de diagnostic robustes pour une classe de systèmes non linéaires avec incertitudes. . . . .	59
5.2.2.5	Filtre $H_\infty$ de détection de pannes pour une classe de systèmes discrets à retards multiples . . . . .	60
5.2.2.6	Filtre de diagnostic robuste pour les systèmes bilinéaires et stochastiques . . . . .	62
5.3	Comparaison des méthodes de génération de résidus par RRA et par observateurs . . . . .	63
5.4	Conclusions et perspectives . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Surveillance des systèmes dynamiques hybrides</b>	<b>68</b>
6.1	Introduction . . . . .	68
6.2	Modèle d'un système hybride et défaillances . . . . .	69
6.2.1	Modèle de bon fonctionnement . . . . .	69
6.2.2	Description et caractérisation des défaillances . . . . .	70
6.3	Utilisation des résidus pour la surveillance des systèmes hybrides . . . . .	71
6.3.1	Discernabilité entre modes . . . . .	72
6.3.2	Surveillance des défaillances survenant dans un mode . . . . .	72
6.3.3	Surveillance des défaillances influençant la dynamique discrète . . . . .	73
6.4	Exemple d'illustration . . . . .	74
6.4.1	Description et modélisation du système . . . . .	74
6.4.2	Les défaillances considérées . . . . .	77
6.4.3	Relations de Redondance Analytique et surveillance . . . . .	78
6.5	Conclusions et perspectives . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Analyse structurelle pour la surveillance</b>	<b>80</b>
7.1	Concepts fondamentaux . . . . .	80
7.1.1	Modélisation structurelle . . . . .	80
7.1.2	Prise en compte des dérivées . . . . .	81

7.1.3	Calculabilité . . . . .	82
7.1.4	Analyse structurelle . . . . .	82
7.2	Contributions . . . . .	85
7.2.1	Isolabilité structurelle et modèle de défaillance . . . . .	85
7.2.2	Aspects algorithmiques et considérations pratiques . . . . .	86
7.2.3	Applications . . . . .	88
7.3	Conclusions et perspectives . . . . .	88
<b>8</b>	<b>Reconfiguration et tolérance aux défaillances</b>	<b>89</b>
8.1	Généralités, position du problème . . . . .	89
8.2	Commande tolérante aux défaillances pour une classe de systèmes non linéaires . . . . .	90
8.2.1	Résultats théoriques . . . . .	90
8.2.2	Application à un bras manipulateur à 1 degré de liberté . . . . .	93
8.3	Conclusions et perspectives . . . . .	94
<b>9</b>	<b>Conclusions et perspectives générales</b>	<b>96</b>
<b>III</b>	<b>Références bibliographiques</b>	<b>99</b>
<b>10</b>	<b>Mes publications</b>	<b>100</b>
10.1	Revue internationale . . . . .	100
10.2	Revue nationale . . . . .	101
10.3	Chapitres d'ouvrages collectifs . . . . .	101
10.4	Articles de congrès internationaux republiés en ouvrage de synthèse après sélection . . . . .	101
10.5	Congrès internationaux avec actes . . . . .	102
10.6	Congrès, colloques nationaux avec actes . . . . .	106
10.7	Rapports de fin de contrat . . . . .	107
10.8	Colloques sans actes et diffusion de la connaissance . . . . .	107
10.9	Articles soumis . . . . .	108
	<b>Bibliographie</b>	<b>109</b>
<b>IV</b>	<b>Annexes</b>	<b>117</b>
<b>11</b>	<b>Sigles et adresses internet</b>	<b>118</b>

<b>12 Tableaux récapitulatifs des publications par année et par thème</b>	<b>121</b>
<b>13 Tableaux récapitulatifs des enseignements par année</b>	<b>125</b>



# Introduction générale

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches retrace mes 15 années de carrière en tant qu'enseignant/chercheur. Certes sa rédaction m'a demandé un investissement important mais c'est un travail qui s'est révélé très intéressant car il m'a permis de faire un point complet sur mes activités d'enseignement (en tant qu'*attaché temporaire d'enseignement et de recherche* puis en tant que *Maître de Conférences* à l'IUT de Béthune et à l'IUT A de l'université de Lille I) et sur mes activités de recherche effectuées au *Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille : LAIL-UMR 8021* (laboratoire commun de l'université des Sciences et Technologies de Lille et de l'École Centrale de Lille) sous la direction de Marcel Staroswiecki, Professeur à l'École Universitaire Polytechnique de Lille (EPUL *ex EUDIL*). Je poursuis actuellement mes recherches au *Laboratoire d'Automatique, de Génie Informatique et Signal : LAGIS-UMR 8146* qui est issu de la fusion des deux laboratoires lillois d'automatique : le LAIL et I3D (voir chapitre 3).

Les formats du mémoire d'HDR sont multiples. Ils peuvent aller d'un bref Curriculum Vitae accompagné d'une compilation d'articles à un rapport beaucoup plus conséquent décrivant de manière très détaillée toute une problématique scientifique. Pour ma part, j'ai opté pour une solution intermédiaire en essayant de décrire la plupart de mes activités en matière d'enseignement et de recherche et en situant mes contributions scientifiques dans le domaine de la surveillance des procédés industriels complexes.

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches est organisé en quatre parties chacune divisée en chapitres :

**La première partie** intitulée "Rapport de synthèse" décrit mes activités d'enseignement et de recherche. Elle est constituée de 3 chapitres. Après un bref Curriculum Vitae retraçant mon état civil, mes diplômes, ma carrière et mes responsabilités administratives, je présente mes activités pédagogiques. Le tour d'horizon des enseignements et des responsabilités au sein des établissements que j'ai fréquentés s'accompagne de réflexions et positionnements pédagogiques. Je présente ensuite mes activités en matière de recherche : encadrements, animations et responsabilités collectives, production scientifique, activités d'évaluation sont autant de points que je détaille et qui montrent ma réelle implication dans le monde de la recherche.

**La deuxième partie** intitulée "Mémoire de recherche" présente une synthèse scientifique

des principaux résultats auxquels j'ai apporté ma contribution depuis 15 ans. Cette partie est divisée en six chapitres.

Je travaille, depuis mon DEA en 1989, dans le domaine de la surveillance (détection, localisation et diagnostic des défaillances) des procédés industriels. Récemment, dans une continuité logique, je m'intéresse aux problèmes de reconfiguration et de tolérance aux défaillances. Un premier chapitre permet de cerner la problématique générale et le vocabulaire utilisé dans ce domaine de recherche. Ce chapitre ne constitue pas vraiment une contribution mais permet d'introduire les travaux qui vont être décrits par la suite. Le chapitre suivant, intitulé "Méthodes de génération de résidus", détaille mes contributions dans le développement et la formalisation des méthodes de surveillance à base de Relations de Redondance Analytique et à base d'observateurs. Ces travaux, initialement destinés à la surveillance des systèmes continus (ou discrétisés) ont été récemment adaptés et complétés pour traiter le problème de la surveillance des Systèmes Dynamiques Hybrides. Les principaux résultats sur cette thématique sont présentés dans un chapitre spécifique.

Lorsque les systèmes considérés sont complexes, c'est à dire lorsqu'ils sont modélisés par un grand nombre de contraintes et de variables, les méthodes classiques de génération de résidus deviennent très lourdes et des outils adaptés doivent être développés pour analyser les propriétés du système et concevoir les générateurs de résidus. Dans le chapitre 7, je présente l'analyse dite *structurelle* développée dans l'équipe SFSD en situant mes différentes contributions.

La surveillance permet de donner des informations sur l'état du système considéré. Ces informations peuvent être données aux opérateurs qui peuvent alors agir en conséquence, ou être utilisées afin de modifier, reconfigurer la commande (voire le système lui-même) automatiquement. Ce prolongement logique de mes travaux vers la tolérance aux défaillances et la reconfiguration est décrit dans le chapitre 8.

Enfin je termine cette partie consacrée aux développements scientifiques par un chapitre présentant quelques conclusions et perspectives générales qui complètent les conclusions et perspectives précisées dans chacun des chapitres précédents.

**La troisième partie** du mémoire donne la liste exhaustive de mes publications et travaux de recherche et précise les références bibliographiques citées dans le corps du mémoire de recherche.

Cette partie est suivie par quelques annexes donnant des compléments d'information qui auraient alourdi la lecture du mémoire.

Enfin, un fascicule regroupant quelques publications les plus représentatives de mes travaux de recherche vient compléter le mémoire d'habilitation à diriger des recherches.

Première partie

Rapport de synthèse

# Chapitre 1

## Curriculum Vitae

### 1.1 État civil

Nom :	COCQUEMPOT
Prénom :	Vincent
Date et lieu de naissance :	17/05/66 à Saint-Omer (62)
Nationalité :	Française
Situation de famille :	marié, 4 enfants
Adresse personnelle :	16, Avenue Becquart, 59130 Lambersart
Fonction actuelle :	Maître de Conférences, Titulaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (PEDR) (depuis 1/10/03)
Adresse professionnelle (recherche) :	LAGIS UMR 8146, USTL, Polytech'Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Adresse professionnelle (enseignement) :	IUT A, USTL, département GEII, Bd P. Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq, Cedex
Tél :	03 20 43 45 43, Fax : 03 20 33 71 89
Courriel :	vincent.cocquempot@univ-lille1.fr

## 1.2 Formation universitaire

- Cours complet suivi à l'Université des Sciences et Technologies de LILLE (DEUG A, LICENCE EEA, MAITRISE EEA, DEA productique)
- DEA Productique : Automatique et Informatique Industrielle obtenu en Juin 1989. Stage effectué au LAIL sous la direction de M. Staroswiecki et J.Ph. Cassar.

Titre : **Génération automatique des relations de surveillance dans un système linéaire multivariable.**

Mention : Bien.

- THESE DE DOCTORAT de Productique : Automatique et Informatique Industrielle. Soutenue le 18 février 1993 devant la commission d'examen.

Titre : **Surveillance des processus industriels complexes : Génération et optimisation des relations de redondance analytique.**

Membres du jury : B. Dubuisson (président du jury), J. Ragot et M. Vergé (rapporteurs), M. Labarrère (examineur), J.Ph. Cassar (co-directeur, 50%) et M. Staroswiecki (co-directeur, 50%)

Mention : Très Honorable avec les Félicitations du Jury

## 1.3 Emplois successifs

- 1989-1991 : Allocataire de Recherche et Moniteur d'Initiation à l'Enseignement Supérieur à l'université de Lille 1
- 1991-1992 : Service National pendant 10 mois (du 1/10/91 au 31/07/92)
- 1992-1993 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille (EUDIL)
- 1993-1997 : Maître de Conférences à l'I.U.T de Béthune (62). Titularisation au 1/10/94. A l'époque, il n'y avait pas de laboratoire de recherches en automatique à Béthune. Pendant ces 4 années, j'ai donc poursuivi mes activités de recherches au LAIL. J'ai demandé, en 1997, ma mutation pour l'IUT A de Lille (département GEII) afin de me rapprocher du laboratoire. Cette demande a été acceptée et j'ai intégré cet établissement à la rentrée

de Septembre 1997.

- 1997-2004 : Maître de Conférences à l’I.U.T A de LILLE (59) - Université des Sciences et Technologies de Lille - Département GEII (Génie Électrique et Informatique Industrielle).

#### 1.4 Mandats électifs et responsabilités administratives

- Membre élu à la CSE (commission de spécialistes) 61ème section de l’Université de Lille. Assesseur de cette commission (2001-2004). Réélu en 2004, vice-président de cette CSE (depuis Avril 2004)
- Membre titulaire nommé à la CSE 61ème section de l’UVHC : Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrasis (depuis Avril 2004)
- Membre élu au Service Commun d’Action Sociale (SCAS) de l’USTL (depuis mars 2000). Représentant des personnels au comité d’usager du restaurant universitaire Barrois.
- Membre du conseil d’administration restreint de l’IUT A de Lille
- Membre élu au conseil de laboratoire du LAIL (UMR 8021) (1999-2003)
- Membre nommé au conseil de laboratoire du LAGIS (UMR 8146) (2004-)
- Membre du conseil scientifique du Graishym : Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine de la région Nord-Pas de Calais. (décision du 22 avril 02)

A ces responsabilités administratives *institutionnelles* s’ajoutent des responsabilités en matière de recherche (responsabilité de groupes de travail régionaux ou nationaux) et des responsabilités en enseignement (responsabilité pédagogique de modules d’enseignement, de salles de travaux pratiques). Celles-ci sont détaillées dans les deux chapitres suivants.

# Chapitre 2

## Activités pédagogiques

Depuis 1989, mes activités d'enseignements (Cours, Travaux Dirigés, et Travaux Pratiques) se situent dans les domaines de l'**Automatique**, de l'**Informatique Industrielle** et des **Systemes numériques**. Ces enseignements ont bien entendu fortement évolué au cours du temps en fonction des formations et établissements que j'ai fréquentés, des programmes pédagogiques officiels, de l'équipe pédagogique, des étudiants et de mon expérience.

### 2.1 Etablissements et formations

Au cours de ces 15 dernières années, j'ai eu la chance d'enseigner dans 4 établissements et structures différentes :

- 1989-1991 : **Moniteur d'initiation à l'enseignement supérieur** à l'université de Lille 1. Chaque année j'ai effectué un total de 64h équivalent TD. Durant cette période je suis intervenu en DEUG A pour encadrer des TP de Physique et en licence EEA pour encadrer des TP d'automatique (régulation, grafcet, logique combinatoire et séquentielle). Le monitorat est une formation à l'enseignement supérieur. Durant ces deux années, j'ai participé à plusieurs formations (une dizaine de jours par an). Celles-ci m'ont permis en particulier de mieux connaître les institutions universitaires et le métier d'enseignant/chercheur et d'avoir une réflexion sur la pédagogie dans l'enseignement supérieur.
- 1992-1993 : **Attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER)** à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille (EUDIL). J'y ai effectué un total de 192h équivalent TD.
- 1993-1997 : **Maître de Conférences** au département GEII de l'IUT de Béthune (62). Au cours de cette période, j'ai enseigné dans diverses formations de l'IUT ou de la FSA

(Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois) situé sur le même campus universitaire de Béthune :

- 2ème année d'IUT,
- licence IE : Ingénierie Électrique, 1993-1997, à la Faculté des Sciences Appliquées (FSA),
- maîtrise EEA : Électronique, Électrotechnique et Automatique, 1994-1998 à la FSA,
- formation continue (DEUP) 1993-1995, à la FSA,
- IUP Productique, 1993-1995, à la FSA,
- préparation à l'agrégation de Génie Electrique 1996-1998, à la FSA.

La FSA a été créée en 1993. Les enseignements que j'y ai effectués en licence et maîtrise EEA m'ont demandé un investissement relativement important. En effet, pour ces deux formations, il a fallu bâtir l'ensemble du programme pédagogique. J'ai ainsi fortement contribué à l'élaboration du contenu de la formation en automatique.

- 1997-2004 : **Maître de Conférences** au département GEII de l'IUT A de Lille. Au cours de cette période, j'ai enseigné en licence SPI (1997-2000), en IUP QEPI, et en 1ère et 2ème année d'IUT.

## 2.2 Matières enseignées

Mes activités principales concernent les trois thèmes : "Régulation automatique", "Informatique Industrielle" et "Systèmes Numériques".

**Thème "Automatique"** La formation en licence et maîtrise EEA, "option Automatique" m'a apporté les connaissances nécessaires pour enseigner la régulation automatique, qu'il s'agisse de systèmes continus, échantillonnés, linéaires ou non linéaires. Ma façon d'aborder cet enseignement a cependant fortement évolué au cours des 10 dernières années. En effet, je me suis de plus en plus écarté des aspects et outils mathématiques pour insister sur les concepts fondamentaux et la méthodologie qui caractérisent l'Automatique. Mon objectif est avant toute chose que les étudiants comprennent à quoi sert l'automatique et quels sont les objectifs visés. De plus, il est nécessaire de comprendre les phénomènes physiques et de connaître les lois qui régissent ces phénomènes. Des outils mathématiques (fonctions de transfert, matrices, ...) doivent bien entendu être maîtrisés et utilisés mais ne doivent en aucun cas prendre le dessus sur la démarche de raisonnement et la physique du système. Au cours de ces années, j'ai abordé les thèmes suivants en TP, TD et cours magistraux :

- Analyse et synthèse des systèmes continus : modélisation par fonction de transfert (EUDIL, IUT, licence Ingénierie Electrique (IE), préparation à l'agrégation interne en GE)

- Analyse et synthèse des systèmes continus : modélisation dans l'espace d'état (EUDIL, Maîtrise EEA, préparation à l'agrégation interne en GE)
- Analyse et synthèse des systèmes échantillonnés (IUT, licence IE)
- Etude des systèmes non-linéaires (méthodes du premier harmonique et du plan de phase) (EUDIL, IUT, licence Ingénierie Électrique)

### **Thème "Informatique industrielle"**

L'informatique est omniprésente dans l'industrie et les étudiants que nous formons se doivent de connaître non seulement les aspects matériels (ordinateurs, automates programmables, microprocesseurs) mais aussi logiciels. L'objectif des formations dans lesquelles j'ai enseigné (IUT, Ecole d'ingénieur EUDIL, Licence IE, Maîtrise EEA) n'est pas de former des informaticiens mais des techniciens et ingénieurs qui soient capables d'utiliser l'outil informatique. Nous insistons donc sur l'analyse des problèmes, les aspects algorithmiques et la structuration des programmes plus que sur le langage informatique (ou le logiciel de développement utilisé) lui-même.

Depuis 1992, j'ai effectué des cours, TD et TP sur les points suivants :

- Programmation structurée : langage (Pascal, C, C++) et algorithmique (licence IE, IUT). Depuis 3 ans, à l'IUT A, nous avons mis en place des projets tuteurés. Chaque groupe de 3 ou 4 étudiants, encadré par un enseignant doit réaliser un programme partant d'un cahier des charges fixé par l'enseignant. Le cahier des charges comprend des contraintes communes à tous. La partie analyse et gestion du projet est aussi importante que la réalisation du programme.
- Architecture des ordinateurs, microprocesseurs et assembleur (IUT A)
- Grafset, automates programmables et réseaux locaux industriels (2ème année EUDIL, IUT A)

### **Thème "Systèmes numériques"**

Cet enseignement a fortement évolué dans les 10 dernières années et est encore en pleine évolution avec l'introduction de la logique programmée (langage VHDL : Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language).

- Logique câblée combinatoire et séquentielle (IUP, formation continue DEUP, Licence EEA, 1ère année EUDIL, IUT). Lorsque j'ai repris il y a 3 ans le cours, j'ai fortement changé la manière d'aborder ces notions par rapport à ce qui se faisait auparavant au département. Ainsi, j'insiste beaucoup plus sur l'aspect fonctionnel que sur la réalisation interne des composants. Mon objectif est que l'étudiant comprenne les fonctions de base et sache les associer pour répondre à un cahier des charges donné.

- Logique programmée : langage VHDL (IUT A). Cet enseignement à l'IUT A est très récent puisque nous l'avons mis en place en 2002 après de nombreuses discussions en équipe pédagogique. Cet enseignement n'a pas pour vocation (à court terme tout au moins) de remplacer la logique cablée "classique". Nous l'abordons comme un moyen supplémentaire permettant de réaliser des fonctions logiques. Il n'y a pas de cours et travaux dirigés spécifiques mais dans le cours d'architecture des ordinateurs (systèmes numériques), j'introduis le code VHDL des fonctions logiques de base.

Très récemment (en 2002), nous avons introduit à l'IUT A, en option "automatique", un enseignement qui concerne la "Supervision des systèmes industriels". Cette évolution a été rendue nécessaire suite aux très nombreux sujets de stages de fin d'études proposés par les industriels. La supervision consiste à visualiser le comportement du système, à le commander via le superviseur, à stocker des données permettant de reconstituer l'historique de fonctionnement, à émettre des alarmes en cas de dysfonctionnements,.... Nous étudions en TP, plusieurs logiciels classique de supervision (en particulier INTOUCH et Topkapi). Pour élaborer une supervision les étudiants doivent utiliser des notions de régulation automatique, d'informatique industrielle, de réseaux locaux industriels,... ce qui permet de faire une synthèse des notions abordées au cours de leur formation.

Au cours de ces 10 dernières années, ma charge d'enseignement annuelle a oscillé entre 290h et 340h équivalent TD. En 2003-2004, ayant obtenu la Prime d'Encadrement Doctorale et de Recherche, ma charge se limite à 236h équivalent TD (soit ma charge statutaire de 192h et 44h complémentaires). J'ai volontairement omis de préciser le nombre d'heures pour chaque matière, chaque formation et chaque année. Ceci aurait alourdi considérablement la présentation. Le bilan complet, détaillé de mes enseignements est donné en annexe (voir chapitre 13, p. 125)

A titre illustratif ma charge d'enseignement en 2003-2004, alors que j'étais titulaire de la PEDR, se présente de la manière suivante :

- Automatique continue (modélisation par fonction de transfert, identification, régulations PID) : 21h cours, 2×24h TD, 2 séries de 21h TP
- Informatique (programmation structurée en langage C) : 10h cours/TD, 2×24h TP
- Systèmes numériques (analyse et synthèse de circuits de logique combinatoire et séquentielle, logique programmée) : 2×10h cours, 26h TD, 42h TP

à laquelle il faut ajouter les encadrements de stages de 2ème année et de projets tuteurés de 1ère année.

## 2.3 Productions pédagogiques, supports de cours

Depuis que j'enseigne, j'ai produit, avec l'aide de mes collègues, de nombreux documents pédagogiques destinés aux étudiants : fiches de synthèse, photocopiés de cours, recueils d'exercices ou de travaux pratiques. Je distribue aussi dans chaque matière un document regroupant des problèmes plus complets correspondant à d'anciens sujets de devoirs surveillés. Tous ces documents sont issus de réflexions d'une équipe pédagogique. Ils ne sont donc pas signés.

Le contenu et la présentation de ces documents ont évolué au cours du temps en fonction de mon expérience et de celle de l'équipe pédagogique et bien sûr en fonction des étudiants dont la mentalité et les connaissances évoluent d'année en année.

Ainsi, depuis deux ans, je privilégie la distribution régulière de fiches de synthèse présentant une notion importante plutôt que la distribution d'un photocopié présentant l'ensemble des notions abordées en cours. Les textes de Travaux Pratiques (que ce soit en Automatique, en Systèmes Numériques ou en Programmation structurée) ont eux aussi fortement évolué. Chaque texte est rédigé de manière à faire clairement apparaître les objectifs de la séance tant d'un point de vue pratique que théorique. Les textes ont été fortement raccourcis et sont rédigés sous forme de "fiches de projet". Les questions sont moins précises qu'auparavant et l'étudiant est donc moins guidé. Il doit mener une véritable réflexion pour atteindre les objectifs de la séance.

Pour certains cours magistraux (grafcet, architecture des ordinateurs, modélisation des systèmes automatiques), j'utilise des supports de cours de type diaporama (présentation Powerpoint). Je distribue alors aux étudiants un photocopié correspondant "partiellement" à mon support. Dans ce document, seules certaines informations sont présentes et l'étudiant doit alors le compléter au fur et à mesure de l'avancée du cours.

## 2.4 Encadrement de projets et de stages

Depuis 1995, j'encadre des projets tuteurés en 1ère année et des stages en fin de 2ème année.

Les projets tuteurés en 1ère année au département GEII de l'IUT A sont de deux types :

- des projets sur des thèmes très variés qui ne sont pas nécessairement en rapport avec le Génie Électrique et l'Informatique Industrielle. Ces projets transversaux permettent à l'étudiant de travailler en petits groupes et sont à rapprocher des IDD (Itinéraires de Découverte au collège) et des TPE (Travaux Personnels Encadrés au Lycée). Ces projets font partie des programmes officiels du DUT.
- des projets de programmation structurés que j'ai évoqués dans la section précédente.

L'encadrement de ces projets est très intéressant car il permet d'individualiser la formation des étudiants et de les connaître sous un autre angle.

J'encadre aussi des projets d'étudiants ERASMUS (4 projets dans les 5 dernières années) et des stages/projets (en moyenne 1 par an) d'école d'ingénieurs (Polytech'Lille, ISEN,...) ou de 2ème année d'IUT sur des sujets soit en rapport avec mes thématiques de recherche soit permettant de mettre en place de nouveaux travaux pratiques pour les étudiants d'IUT.

## 2.5 Responsabilités liées à l'enseignement

Durant ces 15 années dans l'enseignement supérieur, je me suis impliqué dans mes enseignements et dans les différents établissements qui m'ont accueilli.

Comme je l'ai mentionné précédemment, j'ai fortement contribué à l'élaboration des programmes pédagogiques de la licence et de la maîtrise EEA (créées en 1993 et 1994) à la FSA.

Depuis 1993, j'ai la responsabilité de la salle de Travaux Pratiques d'automatique continue (tout d'abord à l'IUT de Béthune puis à l'IUT A de Lille). Cette responsabilité concerne la mise en place des TP, la gestion du matériel (commande de nouveaux bancs de TP, réparation et entretien du matériel), la gestion de l'occupation de la salle. A l'IUT A, tout le mobilier de la salle a été remis à neuf en 1999 et tout le matériel (bancs de TP, ordinateurs, matériel de mesure et cartes d'acquisition, logiciels) a été changé au cours des 5 dernières années. Ceci donne la possibilité de faire fonctionner une dizaine de TP de régulation différents en parallèle.

Je suis responsable/coordonateur depuis 2000 de deux modules d'enseignements au département GEII de l'IUT A:

- en première année je coordonne l'enseignement des systèmes numériques (logique combinatoire et séquentielle).
- en 2ème année, je coordonne l'enseignement de l'automatique continue pour l'option Électronique.

# Chapitre 3

## Activités de recherche

### 3.1 Présentation du laboratoire de recherche

Le LAGIS UMR 8146 : Laboratoire d'Automatique de Génie Informatique et Signal a été créé en 2003 et est issu de la fusion de deux laboratoires :

- le Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille : LAIL UMR 8021. Ce laboratoire était associé au département STIC (Science des Technologies d'Information et de Communication) du CNRS depuis 1991 (en tant qu'UPRESA puis d'UMR).
- le laboratoire I3D FRE 2497 : Interaction, Image et Ingénierie de la décision. Ce laboratoire était associé au département STIC du CNRS depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2002.

Le LAGIS est un laboratoire commun de l'École Centrale de Lille (EC Lille) et de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL). Il est dirigé par Philippe Vanheeghe et Olivier Colot et compte, au 1er janvier 2004, 153 membres : 73 enseignants/chercheurs, 1 CR, 4 ITA (2 CNRS) et 80 doctorants et post-doctorants. Il est constitué de 6 équipes :

- Bond Graphs
- ID : Ingénierie de la décision
- SED : Systèmes à événements discrets
- SFSD : Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques
- SyNER : Systèmes non linéaires et à retards
- VI : Vision et Image

3 actions transversales permettent de rapprocher les chercheurs d'équipes différentes pour travailler sur une thématique commune. Ces actions sont :

- Bond Graphs et Surveillance,

- Systèmes multi-capteurs ,
- Systèmes Dynamiques Hybrides

Le LAGIS compte 3 axes applicatifs prioritaires :

- Transports,
- Systèmes de production,
- Santé et Handicaps

Depuis le DEA de productique, obtenu en 1989, j'exerce mes activités de recherche dans l'équipe Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes (ASPIC) rebaptisée "SFSD: Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques" en 2000. Cette équipe a été dirigée de 1989 (date de sa création) à 2003 par M. Staroswiecki. L'équipe SFSD, actuellement dirigée par M. Bayart, est constituée au 1er janvier 2004 de 9 enseignants/chercheurs (dont 3 habilités à diriger des recherches) et de 12 doctorants. Elle vise à *développer des modèles et des méthodes d'analyse en vue de la conception et de la mise en oeuvre d'algorithmes destinés aux couches "surveillance, diagnostic et tolérance aux fautes" dans les systèmes de supervision*. Les mots clefs caractérisant les travaux de l'équipe sont : *Surveillance et diagnostic, Tolérance aux fautes, Conception de systèmes intelligents distribués, Détection décentralisée, Supervision*.

## 3.2 Recherches théoriques

Mes travaux de recherche, dirigés par M. Staroswiecki depuis 1989, se situent dans le domaine de la surveillance en-ligne (détection, localisation et identification des défaillances) des systèmes continus commandés. Les techniques de surveillance que nous avons développées reposent sur la notion de Redondance Analytique. L'idée générale est de vérifier la cohérence des mesures effectuées en-ligne sur le système avec un modèle comportemental de celui-ci. Des indicateurs de défauts, appelés résidus, permettent de tester cette cohérence. Nous avons particulièrement travaillé sur deux techniques de génération de résidus (la méthode dite de l'espace de parité et les méthodes à base d'observateurs) et sur l'analyse des propriétés structurelles du modèle (ou analyse structurelle) qui permet de donner les conditions nécessaires d'obtention de ces résidus et de guider leur recherche.

Depuis 3 ans, je m'intéresse à la surveillance des Systèmes Dynamiques Hybrides et aux problèmes de reconfiguration et d'accommodation aux défaillances.

## 3.3 Recherches appliquées

Je travaille (ou j'ai travaillé), parallèlement aux développements théoriques, sur plusieurs applications. Ces recherches appliquées ont été réalisées dans le cadre de contrats industriels,

de collaborations avec des universités européennes ou dans des groupes de recherche nationaux ou internationaux.

- Contrat LAIL/Thomson CSF. Projet industriel avec l'entreprise THOMSON/CSF (Avril 1995-Février 1997). Sujet : "Etude des possibilités de surveillance d'une chaîne de traction". 2 rapports d'étude fournis. Rapport final fourni le 25/02/97 (référéncé [\[RC\\_97\\_1\]](#)).
- "Surveillance d'un système de propulsion de bateau", projet européen dans le cadre du groupe COSY : Control of Complex System financé par l'European Science Foundation (1996-1999). Nombreuses collaborations internationales dans ce cadre et en particulier avec Roozbeh Izadi Zamanabadi de l'université d'Aalborg (Danemark).
- "Surveillance des machines électriques", 1996-2001 dans le cadre d'un projet inter-GDR S3/SDSE/ISIS. Co-encadrement de la thèse de Cyrille Christophe. Nombreuses collaborations avec les laboratoires d'automatique, d'électrotechnique et de traitement du signal participantes. Depuis 2001, je poursuis ces activités de recherche en collaboration avec d'autres universités : collaboration avec X. Chang, professeur à l'université de Baoding (RP Chine) et collaboration avec l'université de Sétif (Algérie).
- "Surveillance d'actionneurs", dans le cadre du réseau européen DAMADICS (2000-2004), 5ème PCRD.
- contrat n°51 565 LAIL/Thomson Detexis. "Contribution au diagnostic de pannes dans les circuits électroniques analogiques". Rapport final fourni en juillet 2000 (référéncé [\[RC\\_00\\_1\]](#)).
- "Sûreté de Fonctionnement des systèmes de transport" dans le cadre du pôle ST2 (Pôle de recherche sur la Sécurité des Transports Terrestres) (2001-2004). Responsabilité scientifique de la plateforme expérimentale TRAVEL : Train de Véhicules. Cette plateforme est constituée de 2 véhicules électriques de type ROBUCAR, produits par la société ROBOSOFT.
- Projet "Scénarios de la route automatisée poids-lourds" soutenu par le ministère des transports et coordonné par le LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

Convention n° 455/921/8566/RNL signé en 2003. Plusieurs exposés et rapports intermédiaires, rapport final fourni en mai 2004 (référéncé [RC\_04\_1]). Partenaires : LCPC, INRIA Rocquencourt, Renault Trucks, ESTAS (INRETS), COFIROUTE, LAIL.

- Contrat CIFRE IPSIS/USTL/Renault Trucks (convention n°455/921/8499/RNL signée en 2003) "Surveillance des points chauds d'un véhicule poids-lourds en vue d'élaborer un système de prédiction de défauts liés à une augmentation de température", co-encadrement du DEA de Samuel ARTUS [RC\_02\_1] (convention n° 455/921/8424/RNL signé en 2002) puis membre du comité de pilotage de la thèse de Samuel ARTUS.

## 3.4 Encadrements

### 3.4.1 Co-encadrements de thèses

#### 3.4.1.1 Thèse soutenue

Co-encadrement (50%) de la thèse de **Cyrille Christophe**.

*Titre* : Surveillance des systèmes non linéaires - Application à la machine asynchrone.

*Dates* : Octobre 1997-Novembre 2001.

*Co-encadrant* : Prof. Marcel STAROSWIECKI (50%).

*Publications* : 2 articles en revue internationale, 1 article dans une revue nationale, 9 communications dans des conférences internationales.

Cyrille Christophe a été qualifié en 61ème section en Avril 2002 et a été nommé Maître de Conférences en Septembre 2002 à l'IUT A de Lille.

#### 3.4.1.2 Thèses en cours

- Co-encadrement (50%) de la thèse de **Dilek Düstegör**.

*Titre provisoire* : Analyse structurelle pour la surveillance des procédés industriels.

*Dates* : Sept. 2001 - rédaction en cours (soutenance prévue Décembre 2004).

*financement* : contrat européen puis Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche.

*Co-encadrant* : Prof. Marcel STAROSWIECKI (50%).

*Publications* : 1 (+1 soumis) article dans une revue internationale, 3 (+1 soumis) communications dans des conférences internationales, 1 communication dans une conférence nationale.

- Co-encadrement (50%) de la thèse de **Touria El Mezyani**.

*Titre provisoire* : Redondance analytique pour la surveillance des systèmes dynamiques hybrides.

*Dates* : Mars 2001 - rédaction en cours (soutenance prévue Décembre 2004).

*financement* : contrat européen.

*Co-encadrant* : Prof. Marcel STAROSWIECKI (50%).

*Publications* : 1 article soumis dans une revue internationale, 3 (+1 soumise) communications dans des conférences internationales.

- Co-encadrement (membre du comité de pilotage) de la thèse de **Samuel Artus**.

*Titre provisoire* : Surveillance de la température des disques de frein d'un poids-lourd.

*Dates* : Janvier 2003 -

*financement* : bourse CIFRE IPSIS/Renault Trucks/USTL.

*Comité de pilotage* : Prof. M. STAROSWIECKI, P. de LARMINAT (IPSIS), S. HAYAT (INRETS), C. COVOT (Renault Trucks).

*Publications* : 2 communications dans des conférences internationales.

### 3.4.2 Co-encadrement de stages de DEA

- Co-encadrement d'un étudiant en DEA de productique (1994-1995) : **David Theysgeur**.

*Sujet* : Résidus directionnels et résidus structurés : intérêt et conditions d'existence.

*Co-encadrant* : Marcel Staroswiecki (50%).

- Co-encadrement d'un étudiant en DEA d'informatique (1997-1998) : **Paul Fiévet**.

*Sujet* : Etude de deux approches de détection et de localisation de pannes dans des systèmes complexes.

*Co-encadrants* : P. Taillibert (Dassault Electronique) (33%), M. Dauchet (LIFL) (33%).

### 3.4.3 Autres encadrements

#### Encadrement d'étudiants étrangers en PhD

- Encadrement d'un stage de 6 mois en 1999 d'un doctorant (Ph-D) de l'université d'Aalborg (Dannemark) : **Roozbeh Izadi Zamanabadi**.

*Sujet* : Analyse structurelle pour la surveillance du "Ship propulsion Benchmark". (projet européen COSY)

*Publications* : 1 chapitre d'ouvrage de synthèse, 1 communication dans une conférence internationale.

- Encadrement d'un stage de 3 mois en 2003 d'un doctorant (Ph-D) de l'université d'Aalborg (Danemark) : **Carsten Källoesøe**.

*Sujet* : Détection et isolation de défauts d'une pompe centrifuge.

*Publications* : 1 communication dans une conférence internationale. 1 article soumis dans une revue internationale.

### **Encadrement de projets ou stages en lien direct avec mes recherches**

- Encadrement d'un stage de 3 mois d'une étudiante en 2ème année de l'Institut Supérieur d'Électronique du Nord (ISEN) : **Véronique Joly**, Juillet 2000.

*Sujet* : Contribution au diagnostic de pannes dans les circuits électroniques analogiques (contrat n°51 565 LAIL/Thomson Detexis.)

- Encadrement du projet de fin d'étude de deux étudiants de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille : **Dominique Blondel** et **Laetitia Massemin**, (Octobre à Février 2003).

*Sujet* : Application des méthodes de surveillance en aéronautique.

- Encadrement du projet de 3ème année de deux étudiants de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille : **Quentin Waymel** et **Vianney Landouzy**, (Octobre 2003 à Février 2004).

*Sujet* : Supervision d'un procédé hydraulique à l'aide du logiciel TOPKAPI.

## **3.5 Bilan des publications**

**Notations** : Mes publications sont référencées, dans la suite du mémoire, de la manière suivante :

[XX\_AA\_N]

où

**XX** indique le type de publication :

**RI** : Article dans une Revue Internationale, **RN** : Article dans une Revue Nationale, **OC** : Chapitre d'ouvrage collectif, **OS** : Article publié en ouvrage de synthèse après sélection, **CI** : Communication dans une Conférence Internationale, **CN** : Communication dans une Conférence Nationale, **RC** : Rapport de fin de contrat, **DC** : Diffusion de la connaissance, **RIS** : Article soumis à une Revue Internationale.

**AA** indique l'année de parution.

**N** indique le n° de la publication dans l'année et dans sa catégorie.

## Bilan général

Les références complètes de mes publications sont données dans le chapitre 10. Le bilan général est le suivant :

- 8 articles dans des revues internationales : *Revue Européenne de Diagnostic et sûreté de fonctionnement, Control and Intelligent Systems, IEEE trans. of Industrial Electronics, Int. Journ. of System Science, Int. Journal of Control, IEE Control Theory and Applic., Journal Européen des Systèmes Automatisés, Trans. of the Institute Measurement and Control.*
- 1 article dans la revue nationale chinoise : *Proc. of the Chinese Society of Electrical Engineering*
- 2 chapitres dans l'ouvrage *Control of Complex System*
- 2 Articles de conférences internationales publiés en ouvrage de synthèse après sélection
- 40 communications dans des conférences internationales : *IASTED90, IMACS90-91, ECC91-95-99-01, IECON91, IEEE SICICI92, TOOLDIAG93, IFAC World Congress93-02, IEEE SMC93, IFAC Safeprocess97-00-03, IEEE SDEMPED97-99, IEEE CDC01, Control98, IFAC SICICA00, IFAC Supervis. Chemical Processes01, IEEE ACC02, IEEE CIFA02-04, IEEE PowerCon02, SCSC03, IEEE/IFAC ASCC04, IEEE CCA04, IEE Control04, IEEE ITS04, IEEE VPP*

auquel il faut ajouter 5 communications dans des conférences françaises, 4 rapports de fin de contrat et 10 communications dans des colloques (classées dans "Diffusion de la connaissance")

3 articles ont été soumis en 2004 dans les revues internationales suivantes : IEEE Trans. Automatic Control (IEEE-TAC), Control Engineering Practice (CEP), IEEE Trans. on Control System Technology (IEEE-TCST). Les deux premiers articles ont nécessité des modifications et sont actuellement dans la deuxième phase d'évaluation. Plusieurs communications ont été soumises dans des conférences internationales qui auront lieu en 2004 et 2005 : *IFAC SSSC04, IMACS05*

Des tableaux sont donnés en annexe afin de situer la contribution de chacune des publications dans les thématiques de recherche et afin de montrer l'évolution chronologique de mes recherches.

### 3.6 Participation à des jurys de thèse

J'ai eu l'occasion de participer à plusieurs jury de thèses en tant qu'examinateur et trois fois en tant que rapporteur. Dans ce deuxième cas, n'étant pas Habilité à Diriger des Recherches, une demande a été faite auprès du conseil scientifique de l'université du doctorant. Les rapports de thèse que j'ai rédigés ont été co-signés par M. Staroswiecki.

- Examinateur de la thèse d'**Etienne Loiez** (ISEN). Titre: "Contribution au diagnostic de systèmes analogiques - Modélisation par des bandes temporelles". Thèse soutenue le 3 mars 1997.  
Jury: J.P. Richard (président), M.O. Cordier et B. Dague (rapporteurs), P. Taillibert, J. Ph. Cassar et V. Cocquempot (examinateur), P. Borne et Ph. Vanheeghe (co-directeurs)
  
- Rapporteur (rapport co-signé par le Prof. M. Staroswiecki) de la thèse de **Bertrand Raison** (LEG). Titre: "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique". Thèse soutenue le 19 septembre 2000.  
Jury: M. Crappe (Président), V. Cocquempot et G. Champenois (Rapporteurs) R. Périot (examinateur), J.P. Rognon et G. Rostaing (co-directeurs)
  
- Rapporteur (rapport co-signé par le Prof. M. Staroswiecki) de la thèse de **Christophe Combastel** (INPG). Titre: "Méthodes d'aide à la décision pour la détection et la localisation de défauts dans les entraînements électriques". Thèse soutenue le 27 septembre 2000.  
Jury: J.P. Rognon (Président), C. Rombaut et V. Cocquempot (rapporteurs), J.L. Thomas (examineurs) S. Gentil (directeur)
  
- Rapporteur (rapport co-signé par le Prof. M. Staroswiecki) de la thèse de **Siana Pétrapol** (INPG). Titre: "Ondelettes et Diagnostic: Application aux défauts diélectriques et électriques des machines tournantes". Thèse soutenue le 21 septembre 2001.  
Jury: L. Dugard (Président), G. Champenois et V. Cocquempot (Rapporteurs), A. Barraud et S. Lesecq (Co-directeurs).

## 3.7 Animations et responsabilités de groupes de travail

Depuis ma thèse, j'ai été responsable et animateur de plusieurs projets ou groupes de travail régionaux et nationaux. Cette tâche administrative demande un investissement très important : montage des dossiers scientifiques et financiers, bilans intermédiaires et finaux, organisation de réunions, séminaires et sessions invités dans des conférences. Cette tâche administrative est cependant très intéressante car elle permet de rencontrer de nombreux autres chercheurs.

### 3.7.1 Au niveau national

- De 1998 à 2001, j'étais responsable/animateur du projet : "Méthode de redondance analytique pour la surveillance des entraînements électriques" (GDR SDSE/ISIS/AUTO). Ce groupe de travail rassemblait des chercheurs des communautés "Automatique", "Electrotechnique" et "Traitement du signal". Un véritable travail de collaboration a été réalisé et les échanges que nous avons eu lors de nos réunions ont permis à l'ensemble des participants, quelle que soit leur communauté d'origine, d'avancer sur le difficile problème du diagnostic des défaillances sur les machines électriques. Les résultats de ce groupe ont été largement diffusés non seulement au sein des communautés françaises "Automatique" et "Electrotechnique" lors de journées bilan des GDR Auto et SDSE ([CN\_00\_1], [CN\_01\_1], [CN\_01\_2]) mais aussi dans la communauté internationale par l'organisation de sessions invitées aux conférences ECC'99, IFAC SICICA2000 ou CIFA02. De nombreuses thèses ont été soutenues sur cette thématique dans les laboratoires impliqués. J'ai ainsi participé en tant que rapporteur à 3 jurys de thèse (Christophe Combastel, Bertrand Raison et Siana Pétropol)
- Depuis Juillet 2003, je suis co-responsable/animateur de l'action spécifique du CNRS n°193 (AS 193), "Diagnostic des systèmes hybrides". Nous (F. Kratz (LVR), J.C Pascal (LAAS) et moi-même) avons proposé cette action au département STIC du CNRS en Juin 2003. Celle-ci a été financée et a été rattachée au RTP20 et au GDR MACS. Les travaux ont effectivement débuté en Octobre 2003. Cette action a été suspendue (comme toutes les AS et EPML : Équipe Projet Multi Laboratoire du département STIC) au mois de Mars 2004 suite au gel des crédits par le CNRS. Nous avons repris les travaux du groupe en Juin 2004 après une nouvelle évaluation et un avis favorable du Département STIC.

### 3.7.2 Au niveau régional (région Nord - Pas de Calais)

Depuis plusieurs années je participe activement à la recherche régionale en automatique. J'ai ainsi été responsable et animateur de plusieurs projets :

1. Co-responsable/animateur du projet TACT-AutoRIS-SuSyH (2000-2004) "Supervision des Systèmes Hybrides : application à la route intelligente et sûre". Nous organisons en moyenne 1 réunion/séminaire par trimestre. Ce groupe implique une vingtaine de chercheurs de la région. Pour la deuxième phase du CPER (2004-2006), le projet TACT : *Technologie avancée dans le domaine de la communication et des transports terrestres* a été scindé en deux pour donner les projets TAC : *Technologie Avancée pour la Communication* et TAT : *Technologie Avancée pour les Transports*. Dans cette nouvelle organisation, je suis co-responsable de l'objectif 1 de TAT : Supervision des Systèmes Hybrides : applications aux transports. L'objectif 1 concerne des aspects *recherche amont* et des aspects *applications spécifiques*
2. Co-animateur (de 2001 à 2004) du projet 7 "Sûreté de fonctionnement" du pôle ST2 (Sécurité des Transports Terrestres) ex Action Nouvelle de Recherche sur les Transports terrestres.
3. Co-animateur du thème 5 "Approches Système pour la Sécurité" du GRRT : Groupement régional (Région Nord/Pas de Calais) de recherche sur les transports (depuis avril 2004)

## 3.8 Diffusion de la connaissance et participation à des groupes de travail

Je ne mentionne ici que les participations "actives" ayant donné lieu à au moins une présentation orale et/ou à des publications en collaboration avec les autres partenaires. Je ne mentionne pas les groupes de travail cités précédemment, pour lesquels je suis (ou j'ai été) animateur et pour lesquels les présentations de mes travaux ont été régulières.

### 3.8.1 Séminaires et groupes internationaux

- Participation au groupe de recherche européen : COSY (Control of Complex System). (fin en 2000). Groupe soutenu par l'European Science Foundation. Participation à la rédaction de deux chapitres d'un ouvrage de synthèse ([OC\_00\_1] et [OC\_00\_2]).
- Participation au réseau européen "Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems (DAMADICS)" (Février 2000- Avril 2004)

[DC\_02\_1] et [DC\_03\_1].

- Participation au réseau "Industrial Devices for Manufacturing Processes" (IDMAP). 2 exposés d'1h30 lors de l'école internationale sur les méthodes de surveillance à base de modèles organisée à Lille les 4 et 5 octobre 2001.
- Participation à une journée d'étude "Supervision, détection et localisation des pannes dans les procédés industriels" organisée par l'IBRA (Institut Belge de Régulation et d'Automatisme) - octobre 1995 [DC\_95\_1].

### 3.8.2 Séminaires et groupes nationaux

- Séminaires (en 1998 et 1999) d'une durée de 4h à l'École Supérieure d'Ingénieurs en Électronique et Électrotechnique (Etablissement public de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris). L'objectif était de faire un tour d'horizon des méthodes de l'automatique pour la détection et l'isolation des défauts en mettant l'accent sur les applications industrielles [DC\_98\_3].
- Plusieurs séminaires (4 demi-journées) en Octobre 1998 à l'université d'OUJDA (Maroc) afin de présenter les méthodes de surveillance à base de modèle à une trentaine d'enseignants en Génie Électrique.
- Participation active depuis 1990 au groupe "S3: Sûreté, surveillance, supervision" du GDR Automatique. [DC\_98\_1], [DC\_99\_1], [DC\_00\_1], [DC\_04\_1].
- Participation depuis 2002 au groupe "SdH: Système Dynamique Hybride" du GDR MACS (exposé le 17 juin 2004) [DC\_04\_2].

### 3.8.3 Séminaires internes au laboratoire

Au sein du LAIL, puis maintenant du LAGIS, des actions transversales sont mises en place pour permettre à des chercheurs d'équipes différentes de se rencontrer et d'échanger sur des problématiques communes. Dans la période 2000-2004, j'ai plus particulièrement participé à l'action transversale "observateurs". Cette participation s'est traduite par plusieurs exposés sur les techniques de détection et d'isolation de défauts à l'aide d'observateurs.

Plus récemment, une nouvelle action transversale consacrée à l'étude des systèmes hybrides a été mise en place. J'ai contribué à la mise en place de cette action et exposé nos travaux sur la surveillance des SDH lors d'un séminaire interne au LAIL qui a eu lieu le 3 juillet 2003.

### 3.9 Collaborations avec des chercheurs français ou étrangers

Au cours des 10 dernières années, j'ai eu de nombreux contacts avec des chercheurs français ou étrangers. Ceux-ci ont très souvent abouti à de réelles collaborations qui se sont traduites par des publications communes. Ces travaux de collaboration ont eu lieu grâce à des séjours (de quelques semaines à plusieurs mois) de chercheurs d'autres laboratoires sur des postes de "chercheur invité", "Post-Doctorant" ou "Chercheur de Haut Niveau", au laboratoire. Le montage des dossiers d'invitation, l'accueil, l'encadrement au jour le jour de ces chercheurs étrangers sont autant de tâches intéressantes et enrichissantes tant d'un point de vue du travail scientifique que d'un point de vue des relations humaines. C'est cependant une tâche lourde qui demande un investissement très important.

Les chercheurs étrangers avec lesquels j'ai particulièrement collaboré sont :

- **Roozbeh Izadi Zamanabadi**, initialement dans le cadre du projet COSY et de la préparation de sa thèse (PhD) en 1999. Ceci a donné lieu à la rédaction d'un chapitre de l'ouvrage *Control of Complex System*, des éditions Springer : [OC\_00\_2], et à une communication à la conférence internationale Control98 : [CI\_98\_1]). Cette collaboration se poursuit sur le thème de l'analyse structurelle par l'intermédiaire de l'étudiant **Carsten Källoesø** qui prépare une thèse (PhD) et qui a effectué un séjour de 3 mois au LAIL en 2003. Les travaux avec Carsten ont donné lieu à 1 communication à la conférence internationale CCA'04 et à la soumission d'un article dans la revue *IEEE Transaction on Control Systems Technology*.
- le Professeur **Xianrong Chang** de l'université de Baoding (RP Chine), qui a séjourné 6 mois au LAIL sur un poste de chercheur de haut niveau financé par la région Nord/Pas de Calais. Nos travaux en collaboration sur la modélisation de la machine asynchrone en défaut ont donné lieu à 1 article dans la revue internationale *IEEE Transaction on Industrial Electronics* : [RI\_03\_1] , 1 article dans les "proceedings" de la "Chinese Society of Electrical Engineering" : [RN\_03\_1], 2 communications dans des conférences internationales : [CI\_02\_5] et [CI\_02\_6])
- **Eric Frisk** de l'Université de Linköping (Suède) qui a séjourné au LAIL 3 mois en 2003 dans le cadre du projet européen DAMADICS. Cette collaboration sur l'analyse structurelle a donné lieu à 1 article dans la revue *JESA* : [RI\_04\_3], 1 communication à la conférence IFAC-Safeprocess 03 : [CI\_03\_3], 1 article soumis à la revue *CEP* : [RIS\_??\_3]
- **Bin Jiang** qui a séjourné 2 ans et demi au LAIL tout d'abord sur un poste de Post-Doctorant du Ministère de la Recherche (2000-2001) puis sur un poste de chargé de

recherches à durée déterminée (2001-2003). Nos travaux ont essentiellement porté sur les méthodes de surveillance des systèmes non linéaires à l'aide d'observateurs. Cette collaboration très enrichissante s'est concrétisée par 5 publications dans des revues internationales (+ 1 soumise) et 9 communications dans des conférences internationales. Au terme de son contrat, Bin Jiang a obtenu pour un an un poste de chargé de recherche aux états-unis (University of Louisiana at Lafayette). En Juillet 2004, il a obtenu un poste de professeur dans une université prestigieuse en Chine (Department of Automatic Control, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu province). Nous sommes actuellement toujours en contact régulier et sommes en train de monter une collaboration entre nos deux universités.

### 3.10 Organisation de sessions dans des conférences internationales

J'ai organisé, en lien avec le projet "Méthode de redondance analytique pour la surveillance des entraînements électriques"(GDR SDSE/ISIS/AUTO), 3 sessions invitées dans des conférences internationales.

1. Organisation d'une session spéciale "Fault Detection and Isolation of Induction Motor", à la conférence ECC'99 (European Control Conference), Septembre 1999. Chairman de cette session.
2. Organisation d'une session spéciale "Model based FDI of induction motor" à la conférence SICICA2000 (conférence IFAC), Buenos Aires, Argentine, Septembre 2000.
3. Organisation d'une session invitée "Surveillance des systèmes électrotechniques" pour la conférence CIFA 2002, Nantes, juillet 2002. Chairman de cette session.

J'organise, avec Belkacem Ould Bouamama de l'équipe SFSD du LAGIS, une session invitée à la conférence *IMACS World Congress* qui aura lieu à Paris en 2005. Cette session s'intitule: "Graphs and Bond-graphs for supervision design".

### 3.11 Membre de comités scientifiques internationaux

Je suis membre du **comité technique SAFEPROCESS** de l'IFAC: "Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes" depuis 2000.

Je suis membre du **comité scientifique** de deux conférences internationales: **CIGE'04**: Congrès International en Génie Électrique, qui aura lieu à Sétif (Algérie) en octobre 2004 (<http://www.univ-setif.dz>) et **ICMSES'05**: International Conference on Modelling and Simulation of Electrical Systems, qui aura lieu au mois de Mai 2005 à Skikda (Algérie).

### 3.12 Activités d'évaluation

Je suis évaluateur pour plusieurs revues internationales :

- EJC : European Journal of Control
- IJC : International Journal of Control
- IFAC Automatica
- JESA : Journal Européen des Systèmes Automatisés
- IEEE-TAC : Transaction on Automatic Control

ainsi que pour de nombreuses conférences internationales : IFAC World Congress, ECC, IFAC Safeprocess, IFAC SICICA, IEEE CIFA, IEEE CDC, IEEE ACC, IEEE CCA, IEEE/IFAC ASCC ...

Deuxième partie

Mémoire de recherche

## Chapitre 4

# Principes généraux des méthodes de surveillance à base de modèle

### 4.1 Introduction

Mon travail de recherche se situe depuis le DEA dans le cadre de la surveillance des procédés industriels. Les méthodes que nous développons sont destinées à fournir en-ligne une information sur l'état du procédé. Cette information peut alors être donnée aux opérateurs et/ou être utilisée pour reconfigurer la commande automatiquement. Le but de ce chapitre n'est pas de faire un tour complet des concepts et techniques de surveillance à l'aide de modèles. D'excellents articles de synthèses (Gertler, 1988; Frank, 1990; Gertler, 1991; Frank, 1994; Hammouri *et al.*, 1999) ou ouvrages ont été consacrés à ce sujet (Patton *et al.*, 1989; Chen and Patton, 1999; Patton *et al.*, 2000). Le but est plutôt d'introduire les principes généraux et le vocabulaire afin de situer dans les chapitres suivants mes contributions dans ce domaine de recherche.

### 4.2 Surveillance à base de modèle

Les méthodes de surveillance à base de modèles ("Model-based FDI: Fault Detection and Isolation") ont été développées dès le début des années 70 (Mehra and Peschon, 1971; Jones, 1973; Clark *et al.*, 1975; Willsky, 1976). Depuis, de nombreux articles font régulièrement le point sur l'avancée des différentes approches. L'équipe SFSD a contribué largement, sous l'impulsion du Professeur Marcel Staroswiecki, au développement et à la formalisation de ces méthodes.

Les méthodes de surveillance utilisant un modèle reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé "indicateur de défaut" ou "résidu".

**Définition 1** *Un résidu est un signal qui reflète la cohérence (ou la consistence) des données mesurées vis-à-vis d'un modèle comportemental du système.*

Un modèle est une formalisation mathématique d'un système physique qui permet de représenter les liens (ou relation de contraintes), existants entre des quantités (ou variables) données du système. Les modèles utilisés peuvent être de nature et de complexité différentes. Ils peuvent être : à temps continu ou à temps discret, qualitatifs, structurels ou analytiques, linéaires ou non linéaires, représentant le bon fonctionnement ou tenant compte des défaillances.

Classiquement, en Automatique, des modèles dits de *bon fonctionnement* sont utilisés. Ils caractérisent le comportement *normal* du système, c'est à dire lorsqu'aucune défaillance n'est présente. En surveillance, par contre, il est parfois nécessaire de compléter le modèle afin de caractériser le comportement défaillant du système. Trois niveaux de connaissance peuvent être considérés :

- Le niveau 1 est le niveau de connaissance le plus élémentaire. Il consiste à indiquer les équations décrivant le composant qui sont influencées directement par la défaillance, c'est à dire. les équations du modèle (contraintes) qui ne sont probablement plus valides en cas de défaillances.
- Le niveau 2 de connaissance est plus précis puisqu'il consiste à décrire, grâce à des variables supplémentaires (appelée variables de défaillance) comment sont modifiées les équations de fonctionnement normal lorsqu'une défaillance survient. Les défaillances peuvent être additives ou multiplicatives suivant la manière dont les variables de défaillance influencent les équations du modèle.
- Le niveau 3 de connaissance consiste à modéliser l'évolution dynamique de la défaillance. Des équations supplémentaires liant les variables de défaillance sont ajoutées au modèle de bon fonctionnement. Pour obtenir ce modèle soit une connaissance fine des phénomènes physiques est nécessaire, soit des données expérimentales du processus défectueux doivent pouvoir être utilisées.

Suivant la classe de modèles considérée les techniques de génération de résidus seront différentes. Suivant le niveau de connaissance sur les défaillances, les résultats de la procédure de surveillance seront plus ou moins précis et complets.

Les méthodes de surveillance quelles soient à base de modèles ou non exploitent toute une redondance d'information.

Le premier type de redondance est la *redondance physique* ou matérielle. Cette technique consiste à doubler, ou mieux tripler les capteurs, actionneurs, processeurs et logiciels pour

mesurer et/ou contrôler des variables particulières. La comparaison des grandeurs redondantes permet de décider si une défaillance est présente ou non. Même si cette méthode de surveillance s'avère fiable et simple à implanter, elle entraîne bien évidemment un coût important en instrumentation. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques tels que les centrales nucléaires ou en aéronautique .

Lorsqu'un modèle comportemental est disponible, il est possible de l'exploiter pour tester la cohérence des informations prélevées en ligne sur le système. On parle alors de *redondance analytique*.

### 4.3 Les méthodes de génération de résidus

Un résidu doit refléter la cohérence des signaux mesurés avec un modèle (définition 1). Pour qu'un signal généré à partir des entrées et des sorties d'une installation soit un résidu il faut qu'il soit affecté par un sous-ensemble de pannes.

**Définition 2** *Un résidu  $r(t, y, u, v)$  est non affecté par  $v \in \mathcal{V}$  (ou invariant sous  $v$ ) si pour toute entrée admissible  $u$  et toute sortie  $y$ , nous avons  $r(t, u, y, v_1) = r(t, u, y, v_2)$  pour tout  $t \geq 0$  et quel que soit le couple  $v_1$  et  $v_2$  de  $\mathcal{V}$ . Dans le cas contraire, le signal est dit affecté par  $v$ . (Isidori, 1995)*

L'algorithme utilisé pour obtenir les résidus est appelé *générateur de résidus*. Trois approches sont principalement utilisées pour construire ce générateur de résidus :

1. Les approches d'*identification* Elles consistent à identifier en ligne les divers paramètres du système et à comparer ces estimations aux valeurs nominales des paramètres. L'erreur d'estimation est utilisée comme résidu. Le lecteur intéressé par cette approche pourra consulter par exemple les travaux (Isermann, 1984; Delmaire, 1996).
2. L'approche à base de *Relations de Redondance Analytique* ou approche de *l'espace de parité*. Le principe est de *transformer, réécrire* les équations du modèle de manière à obtenir des relations particulières appelées RRA : Relations de Redondance Analytique. Ces relations ont pour propriété de ne lier que des grandeurs connues, disponibles en ligne. Les résidus sont obtenus en substituant dans ces RRA les variables connues par leurs valeurs réelles, prélevées sur le système en fonctionnement. L'obtention hors-ligne des RRA est un problème général d'élimination de variables dans un système d'équations algèbro-différentielles. Lorsque le modèle est linéaire, l'élimination peut se faire par projection dans un sous espace appelé *espace de parité* (Chow and Willsky, 1984). Dans le cas non linéaire, des techniques d'élimination formelle peuvent être utilisées comme nous le verrons au chapitre 5. L'analyse des propriétés structurelles du système (voir chapitre

- 7) permet de donner les conditions nécessaires d'élimination des variables inconnues et de guider la procédure d'élimination.
3. Les approches à base d'observateurs ou de filtres sont les plus couramment utilisées. Les premiers travaux datent des années 70 (Clark *et al.*, 1975; Jones, 1973). Les observateurs ou filtres sont des outils bien connus des automaticiens à des fins de commande en boucle fermée. Le principe général est de concevoir un système dynamique permettant de donner une image, ou estimation, de certaines variables, ou combinaisons de variables, nécessaires au bouclage. Lorsque le système est dynamique et que certaines variables (conditions initiales) sont inconnues, l'estimation n'est correcte qu'après un certain temps de convergence, fixé par la dynamique de l'observateur. Ces outils ont été adaptés à des fins de diagnostic et les travaux utilisant ces approches sont nombreux (Viswanadham and Srichandert, 1987; Ding and Frank, 1994; Frank, 1994; Magni and Mouyon, 1994; Kinnaert, 1999; Edwards *et al.*, 2000; Kinnaert, 2003). Le principe général consiste à comparer des fonctions de sorties estimées avec les mêmes fonctions des sorties mesurées. L'écart entre ces fonctions est utilisé comme résidu. Cette approche est détaillée dans le chapitre 5.

Dans le cas linéaire, de nombreux travaux ont permis d'établir des liens entre les 3 approches de génération de résidus : méthodes d'identification, à base de relations de redondance analytique, à base d'observateurs.

## 4.4 La détection

La procédure de détection vise à déterminer l'apparition et l'instant d'occurrence d'une défaillance. Cette étape ne nécessite qu'un modèle de bon fonctionnement du système. Une panne sera détectable si au moins un résidu permet de la détecter (Basseville, 1999).

Lorsque le modèle permet de représenter exactement le système (aucune erreur de modélisation, connaissance de la nature des signaux inconnus agissant sur le système, ...), les résidus générés seront strictement égaux à zéro en fonctionnement normal et différents de zéro en présence de pannes. La détection d'une défaillance se résumera alors à déclencher une alarme lorsqu'au moins un résidu différera de zéro.

En pratique, les modèles utilisés sont obtenus à partir d'hypothèses simplificatrices et sont donc imparfaits. Les résidus (qui reflètent l'écart entre le modèle et le système) ne sont plus parfaitement égaux à zéro. Une procédure de décision doit être implantée afin de décider si la valeur différente de 0 du résidu doit générer une alarme ou non. La qualité de la détection dépend bien entendu de la procédure de décision choisie mais aussi et surtout de la "qualité" des résidus utilisés. Afin de réduire les taux de fausse alarme et de non détection, les résidus

doivent être optimisés, c'est à dire rendus le plus sensible possible aux défaillances et le moins possible aux perturbations ou erreurs de modélisation.

## 4.5 La localisation

Lorsqu'une défaillance est détectée, une procédure de localisation est utilisée pour permettre de déterminer son origine. Cette étape nécessite d'utiliser un modèle de comportement défaillant au niveau 2 de connaissance sur les défaillances.

La procédure de localisation nécessite d'utiliser un ensemble (ou vecteur) de résidus. Pour permettre la localisation, le vecteur de résidus doit avoir un certain nombre de propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque faute. Deux méthodes peuvent être utilisées :

1. La construction de résidus structurés (Gertler, 1991)
2. La construction de résidus directionnels (Gertler and Monajemy, 1995; Beard, 1971)

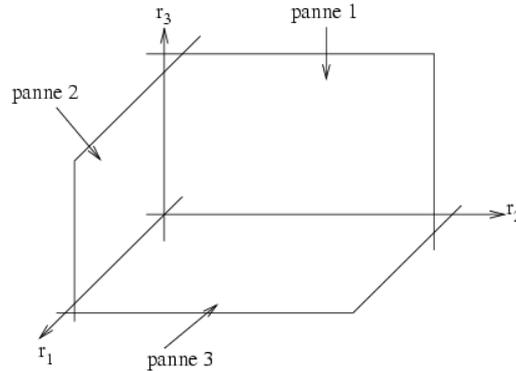
### Les résidus structurés

**Définition 3** *La structure d'un résidu  $r_i$  par rapport à un ensemble de pannes  $\{\varphi\}$  de dimension  $\eta_\varphi$  est le mot binaire  $S_{r_i}$  composé de  $\eta_\varphi$  bits ( $S_{i,j}$ ) positionnés de la manière suivante :*

- $S_{i,j} = 1$  si le résidu  $r_i$  est affecté par le  $j^{\text{ième}}$  élément de  $\{\varphi\}$ .
- $S_{i,j} = 0$  si le résidu  $r_i$  est non affecté par le  $j^{\text{ième}}$  élément de  $\{\varphi\}$ .

Les résidus structurés sont conçus de manière à être chacun affecté par un sous ensemble de fautes  $\varphi_1$  et robuste (non affecté) par rapport aux fautes restantes  $\varphi_2$  (fig. 4.1). Ainsi, lorsqu'une défaillance apparaît, seul un sous ensemble de résidus réagit.

**Définition 4** *On dit qu'un résidu est structuré par rapport à un vecteur de défaillances  $\varphi_1$  s'il n'est affecté que par les défaillances  $\varphi_1$  et s'il est robuste aux autres.*

FIG. 4.1: *Résidus structurés*

Les informations de sensibilité et de robustesse (stricte) souhaitées pour les résidus sont répertoriées dans une table binaire, appelée *la table des signatures théoriques*. Celle-ci est construite de la manière suivante: lorsque le  $i^{\text{ième}}$  résidu doit être sensible (resp. robuste) à la  $j^{\text{ième}}$  panne, alors la valeur binaire 1 (resp. 0) est affectée à la ligne et à la colonne correspondante.

Les schémas permettant de générer des résidus structurés dépendent des propriétés souhaitées pour la table des signatures théoriques (par exemple diagonale de '1' ou diagonale de '0' par rapport à un type de défaillances). Ainsi, dans la littérature, on distingue les schémas DOS (Dedicated Observer Scheme) et GOS (Generalized Observer Scheme). Ces schémas sont classiquement définis pour les méthodes "observateurs" mais peuvent être considérés quelle que soit la méthode de génération de résidus employée. On parlera alors de schémas DRGS et GRGS (pour *Dedicated* et *Generalized Residual Generator Schemes*). Les schémas DRGS et GRGS sont constitués d'une *banque* de générateurs de résidus et peuvent être définis par rapport aux entrées (actionneurs) ou par rapport aux sorties (capteurs). Dans le schéma DRGS relatif aux actionneurs (capteurs), chaque générateur de résidus est sensible à une seule entrée (sortie). La table de signature théorique sera donc diagonale. Dans le schéma GRGS relatif aux actionneurs (capteurs), chaque générateur de résidus est sensible à toutes les entrées (sortie) sauf une. La table de signature théorique sera donc anti-diagonale.

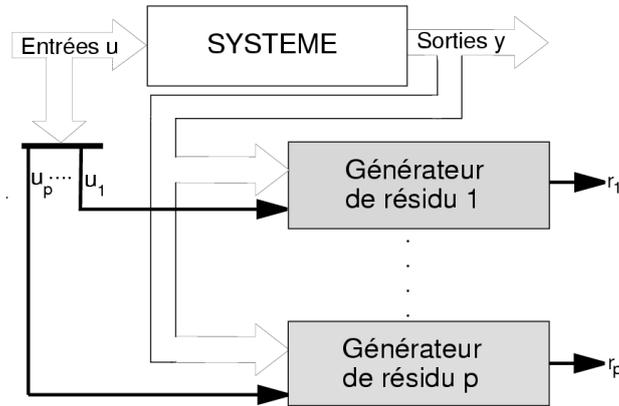


FIG. 4.2: Schéma DRGS relativement aux actionneurs

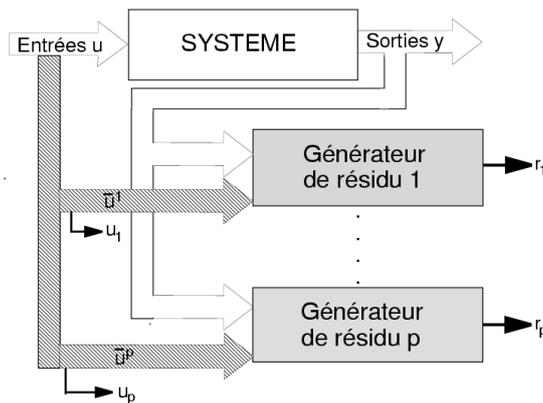


FIG. 4.3: Schéma GRGS relativement aux actionneurs

Une procédure de détection appliquée à chaque résidu, permet d'obtenir *la signature réelle* des résidus à un instant donné. Si cette signature est nulle alors aucun résidu n'a détecté de panne. Le système sera donc déclaré sain. Si la signature réelle est non nulle, la procédure de localisation consiste à retrouver la signature réelle (la plus probable) dans la table des signatures théoriques.

**Définition 5** Une défaillance est structurellement localisable si toutes les colonnes de la table des signatures théoriques sont différentes.

La table de signatures théoriques doit être proposée de telle manière que le vecteur de résidus structurés correspondant soit calculable et que les propriétés d'isolabilité soient les plus intéressantes possibles.

### Les résidus directionnels

Les résidus directionnels sont construits tels que, en réponse à une panne donnée, le vecteur des résidus s'oriente suivant une direction bien précise dans l'espace des résidus (fig 4.4).

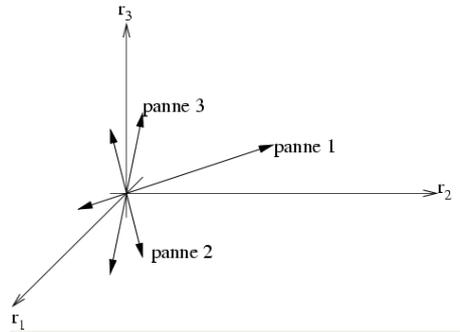


FIG. 4.4: Résidus directionnels

Le vecteur de résidus directionnels  $\vec{r}(t)$ , en réponse à une panne  $f_i(t)$  ( $i = 1, \dots, \eta_f$ ), s'exprime sous la forme :

$$\vec{r}(t/f_i) = \alpha_i(t)\vec{l}_i \quad i \in \{1, 2, \dots, \eta\} \quad (4.1)$$

où  $\vec{l}_i$  est un vecteur constant appelé la *signature directionnelle* de la panne  $i$  dans l'espace des résidus et  $\alpha_i$  est une fonction scalaire qui dépend de la taille et de la dynamique de la panne.

La tâche de localisation des pannes consiste à déterminer la signature directionnelle théorique la plus proche de la signature directionnelle obtenue par le calcul des résidus.

## 4.6 L'identification des défaillances

L'objectif de cette procédure consiste à déterminer (identifier) les caractéristiques précises de la défaillance. L'identification (ou estimation) du défaut est une tâche plus délicate qui nécessite d'utiliser un modèle de comportement du système en présence des défaillances avec un niveau élevé (niveau 3) de connaissance sur les défaillances (c'est à dire une connaissance de la structure et de la dynamique de la défaillance). L'obtention d'une estimation du défaut permet bien entendu de donner une image beaucoup plus précise de l'état du système mais aussi et surtout permet de mettre en oeuvre des procédures (de commande par exemple) tolérantes aux défaillances (voir chapitre 8)

## **4.7 Conclusion**

Ce chapitre a permis de définir les concepts de base et le vocabulaire de la surveillance à base de modèles. Dans les chapitres suivants je propose une synthèse scientifique des différents travaux que j'ai réalisés depuis 1989 dans ce domaine de recherche.

# Chapitre 5

## Méthodes de génération de résidus

### 5.1 Utilisation des Relations de Redondance Analytique (RRA)

#### 5.1.1 Principe général

**Définition 6** Une Relation de Redondance Analytique (RRA) est une relation, issue des équations du modèle nominal (sans perturbation ni défaillance), liant les variables d'entrée et de sortie et les dérivées successives de ces variables jusqu'à un ordre donné. Une RRA est donc indépendante de l'état  $x(t)$ .

Considérons un modèle de comportement nominal (sans perturbation ni défaillance) exprimé sous la forme d'état générale :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (5.1)$$

où  $x \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$  est le vecteur d'état,  $y \in \mathcal{Y} \subset \mathbb{R}^p$  est le vecteur des sorties et  $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^{m_u}$  le vecteur des entrées connues. Les deux fonctions vectorielles  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  sont supposées analytiques (de classe  $C^\infty$ ).

Les signaux  $y$  et  $u$  sont supposés infiniment dérivables. Un ordre de dérivation  $s_i$  est attribué à chaque sortie  $y_i$   $i \in [1, \dots, p]$ .

Pour la suite, les notations suivantes seront utilisées :

- $\theta$  étant une variable d'entrée, de sortie ou d'état,  $\bar{\theta}^{(k)}$  représente un vecteur dont les composantes sont  $\theta$  et ses dérivées successives jusqu'à l'ordre  $k$ .
- Soit  $\vartheta$  un vecteur dont les  $v$  composantes sont  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_v$ .  
 $\bar{\vartheta}^{(k_1, k_2, \dots, k_v)} = \bar{\vartheta}^{\bar{k}}$  représente un vecteur dont les composantes sont les variables  $\theta_i$  et leurs dérivées successives jusqu'à un ordre  $k_i$  spécifique à chacune d'entre elles.

Dérivons par rapport au temps, la  $i^{eme}$  variable de sortie. On obtient :

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \frac{\partial h_i(x(t), u(t))}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial h_i(x(t), u(t))}{\partial u} \cdot \frac{du}{dt}$$

En substituant  $\frac{dx}{dt}$  par son expression donnée par l'équation d'état, on obtient :

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = \frac{\partial h_i}{\partial x} \cdot f(x(t), u(t)) + \frac{\partial h_i(x(t), u(t))}{\partial u} \cdot \frac{du}{dt} \quad (5.2)$$

En répétant cette opération pour chaque sortie ( $i = 1..p$ ) jusqu'à un ordre de dérivation  $s_i$  spécifique, on obtient une relation sous la forme générale :

$$\bar{y}^{(s_1, s_2, \dots, s_p)} = \bar{y}^{\bar{s}} = G_{\bar{s}}(x, \bar{u}^{\bar{s}}) \quad (5.3)$$

Le système d'équation (5.3) comporte comme inconnues les composantes du vecteur  $x$ . Par un choix correct des indices de dérivation  $s_i$ , l'élimination de ce vecteur  $x$  peut être rendue possible. Différentes techniques d'élimination du vecteur  $x$  peuvent être utilisées suivant la nature des fonctions  $f$  et  $h$  :

- le cas linéaire a été très largement étudiée dans la littérature (voir par exemple (Chow and Willsky, 1984; Gertler, 1991; Patton and Chen, 1991a)). L'équation (5.3) fait alors apparaître les matrices d'observabilité et de commandabilité. En projetant cette équation dans l'espace supplémentaire à l'espace engendré par la matrice d'observabilité, on obtient l'ensemble de RRA. Cet espace dans lequel les équations sont projetées est appelé : *Espace de Parité*. Dans le cadre de ma thèse, nous avons cherché à optimiser le choix de la base de l'espace de parité de manière à obtenir des résidus qui soient les plus sensibles possible aux défaillances considérées et les moins sensibles possible (les plus robustes) aux perturbations. Je reviendrai sur ces résultats dans la section 5.1.2.2. Dans le cadre de ma thèse, j'ai apporté une autre contribution originale lorsque le modèle linéaire se présente sous la forme de schéma-bloc de transfert. Cette démarche est brièvement décrite à la section 5.1.2.1

- le cas non linéaire où les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  sont polynomiales a fait l'objet de nombreux développements dans les 10 dernières années. Notre équipe a largement contribué au développement de cette approche par les travaux de thèse de Gilles Comtet-Varga (Comtet-Varga, 1997; Staroswiecki and Comtet-Varga, 2001) et de Caroline Guernez (Guernez-Jean, 1998), que nous avons repris, complété et appliqué à la machine asynchrone dans la thèse de Cyrille Christophe (Christophe, 2001)

Les expressions analytiques des RRA peuvent être obtenues en utilisant des algorithmes d'élimination formelle tels l'utilisation des bases de Groebner (Cox *et al.*, 1992), la théorie de l'élimination (Diop, 1991) ou les ensembles caractéristiques (Ljung and Glad, 1999; Ritt, 1950; Glad, 1989).

- dans le cas où les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  ne sont pas polynomiales, il n'existe à l'heure actuelle pas de méthode générale permettant de générer les RRA par une procédure automatique. Nous travaillons dans ce sens dans le cadre de la thèse de Dilek Düstegor en utilisant l'analyse structurelle.

En éliminant le vecteur  $x$  dans l'équation (5.3), on obtient un ensemble de RRA que l'on peut mettre sous la forme générale :

$$w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s) = 0 \quad (5.4)$$

La fonction  $w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s)$ , appelée communément *forme de calcul du résidu*, est calculable en ligne si on suppose que les entrées et sorties ( $u$  et  $y$ ) ainsi que leurs dérivées successives sont accessibles à tout instant. Les RRA seront vérifiées, donc les résidus seront nuls, si le système se comporte nominalement, c'est à dire si aucune perturbation ni défaillance ne vient perturber son comportement.

Dans le cas contraire certains résidus sont différents de 0 et indiquent un écart entre le comportement en ligne du système et la référence nominale. Les résidus sont donc des fonctions des perturbations et des défaillances. L'expression du résidu en fonction de ces variables inconnues est appelée *forme d'évaluation du résidu*. Elle est obtenue en considérant les équations :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), d(t), \varphi(t)) \\ y(t) &= h(x(t), u(t), d(t), \varphi(t)) \end{cases} \quad (5.5)$$

En répétant la même procédure de dérivation et de substitution que précédemment on obtient :

$$\bar{y}^{(s_1, s_2, \dots, s_p)} = \bar{y}^s = \Gamma_{\bar{s}}(x, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}(t)^s) \quad (5.6)$$

En éliminant le vecteur  $x$  en suivant exactement la même méthode d'élimination qui a permis d'obtenir l'expression analytique de la fonction  $w_c$ , on obtient :

$$w_f(\bar{y}^s, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}^s) = 0 \quad (5.7)$$

Cette relation est vérifiée en présence ou en absence de perturbations et de défaillances. En retirant à chaque membre de l'égalité la quantité  $w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s)$ , on obtient :

$$w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s) = w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s) - w_f(\bar{y}^s, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}^s) \quad (5.8)$$

La fonction  $w_e = w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s) - w_f(\bar{y}^s, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}^s)$  est appelée *forme d'évaluation du résidu*

**Remarque 5.1.1** La fonction  $w_e$  peut être simplifiée si les fonctions  $f$  et  $h$  sont polynomiales. En effet, dans ce cas, la fonction  $w_f$  peut toujours se décomposer de la manière suivante :

$$w_f(\bar{y}^s, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}^s) = w_c(\bar{y}^s, \bar{u}^s) + w_\varphi(\bar{y}^s, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}^s) \quad (5.9)$$

L'expression de  $w_e$  devient donc :

$$w_e = -w_\varphi(\bar{y}^s, \bar{u}^s, \bar{d}^s, \bar{\varphi}^s) \quad (5.10)$$

Les résidus obtenus sont *a priori* sensibles aux perturbations (vecteur  $d$ ) et aux défaillances (vecteur  $\varphi$ ). Afin de les rendre utilisables pour la détection de défauts, ces résidus doivent être robustes (au sens strict, c'est à dire complètement insensibles) vis à vis des perturbations  $d$ . On dit qu'ils sont *découplés (strictement)* des perturbations. De plus, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la localisation d'une défaillance peut être réalisée à l'aide d'un ensemble de résidus structurés (voir section 4.5). Chaque résidu doit donc être sensible à un sous ensemble de défaillances et robuste aux autres. Les résidus structurés et robustes aux perturbations peuvent être obtenus de deux manières différentes :

- en une seule étape, c'est à dire en étendant la procédure d'élimination du vecteur  $x$  aux perturbations et à des sous ensembles de défaillances,
- en deux étapes, c'est à dire en considérant dans un premier temps l'élimination de  $x$ , puis en éliminant les perturbations et défaillances dans les RRA obtenues.

**Remarque 5.1.2** Dans le cas où les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  sont polynomiales, on peut montrer qu'il est toujours possible de trouver un ordre de dérivation des sorties du système permettant d'éliminer l'état  $x$  et donc d'obtenir des RRA. Par contre, il n'est pas toujours possible, en l'absence de modèle d'évolution des perturbations et/ou des défaillances, d'éliminer complètement l'effet de certaines perturbations et/ou défaillances.

## 5.1.2 Contributions

### 5.1.2.1 Génération de résidus dans le cas des systèmes linéaires décrits par un schéma-bloc de transfert

Dans le cadre de ma thèse, je me suis intéressé à la génération des RRA lorsque le modèle se présente sous la forme d'un schéma-bloc (fonctions de transfert interconnectées). Cette représentation est souvent la première qui est disponible dans le cas des systèmes complexes. Elle est obtenue directement à partir d'une décomposition fonctionnelle du système. A partir de cette représentation, l'équation suivante est obtenue :

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{c} M \\ K_1 \\ K_2 \end{array} \right| \cdot X = P \cdot X = \left| \begin{array}{c} 0 \\ U \\ Y \end{array} \right| \end{array} \quad (5.11)$$

où  $M$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  et  $P$  sont des matrices polynomiales en  $s$  (opérateur de dérivation).  $X$  est le vecteur des variables d'interconnexion,  $U$  et  $Y$  sont les vecteurs des entrées et sorties connues. Pour obtenir des RRA, nous avons appliqué la même démarche que la méthode par projection dans l'espace de Parité. Nous avons proposé de rechercher une matrice polynomiale en  $s$  telle que :

$$W(s).P(s) = 0 \quad (5.12)$$

En multipliant les deux membres de l'équation 5.11 par  $W(s)$  on obtient :

$$W(s) \cdot \begin{array}{c} 0 \\ U \\ Y \end{array} = 0 \quad (5.13)$$

qui constitue un ensemble de RRA.

La difficulté de la méthode réside dans la détermination de la matrice polynomiale  $W(s)$  qui doit être de degré le plus faible possible puisqu'il correspond à l'ordre de dérivation des variables connues lors du calcul du résidu. Nous avons ainsi proposé un algorithme permettant d'obtenir  $W(s)$  de degré minimal et les résultats de cette méthode ont donné lieu à 4 publications référencées [OS\_91\_2], [CI\_90\_1], [CI\_90\_2] et [CI\_91\_2]

### 5.1.2.2 Optimisation des résidus dans le cas linéaire

Comme nous l'avons souligné précédemment, les résidus doivent être sensibles à certains défauts (vecteur noté par la suite  $\phi$ ) et robustes aux perturbations et autres défauts (vecteur noté  $\delta$ ). Or, il n'est pas toujours possible d'obtenir une robustesse au sens strict tout en garantissant une sensibilité aux défauts. Dans ce cas, un problème d'optimisation doit être considéré :

*Trouver des résidus indépendants de l'état  $x(t)$  qui soient les moins sensibles possible aux composantes de  $\phi$  et les plus sensibles possible aux défauts  $\delta$ .*

Il s'agit d'un problème général d'optimisation multi-critère sous contraintes pour lequel nous avons apporté notre contribution dans le cas linéaire (voir les articles [CI\_91\_3], [CI\_92\_1], [CI\_93\_1], [CI\_93\_2], [CI\_93\_3], [CI\_95\_1] et [CI\_97\_1]).

Après avoir défini des mesures de sensibilité, nous avons ainsi montré que la résolution de ce problème d'optimisation se ramène à un problème de détermination de valeurs propres minimales d'un faisceau de matrices. La résolution conduit à un ensemble de solutions Pareto Optimales (voir figure 5.1). Les solutions proposées dans la littérature (voir par exemple (Patton and Chen, 1991a; Frank, 1990; Chen *et al.*, 1991)) et utilisant un critère unique

(maximisation par exemple du rapport  $\frac{\text{sensibilité}}{\text{robustesse}}$ ) sont en fait des solutions particulières et appartiennent à l'ensemble des solutions Pareto Optimales.

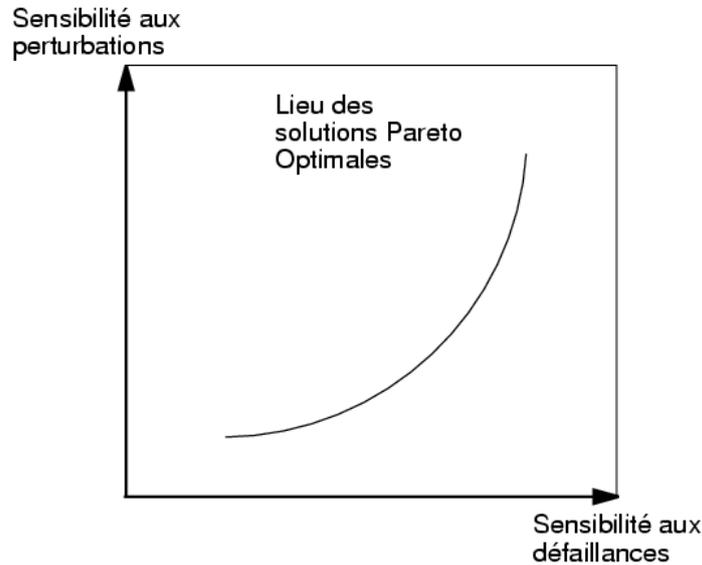


FIG. 5.1: *Lieu de Pareto*

### 5.1.2.3 Extension de la méthode de l'Espace de Parité au cas non linéaire

Dans les travaux de thèse de Cyrille Christophe (1997-2001), nous avons considéré la génération de RRA dans le cas où les fonctions  $f$  et  $h$  sont polynômiales. Nous avons ainsi travaillé sur les conditions d'existence des RRA ainsi que le nombre de RRA polynomialement indépendantes reprenant ou complétant les travaux (Staroswiecki and Comtet-Varga, 2001; Zhang *et al.*, 1998). Ceci a donné lieu aux publications : [CI\_99\_1] et [CI\_99\_2].

Afin de réduire la complexité de la procédure d'élimination, nous avons proposé de générer les résidus structurés en procédant en 2 étapes successives. L'élimination du vecteur d'état se fait en utilisant l'approche des bases de Groebner, tandis que la structuration des résidus vis à vis des défaillances se fait en utilisant la technique des résultants (Cox *et al.*, 1992). Les résultats ont été publiés dans [CI\_99\_2].

Les techniques d'élimination formelles, du type *Base de Groebner* nécessitent de fixer *a priori* un ordre d'élimination des variables. Suivant l'ordre choisi, l'élimination est plus ou moins complexe. Rien ne permet, à l'heure actuelle de fixer ce choix. Nous avons entrepris des travaux en vue de répondre à cette problématique en utilisant l'analyse structurelle (voir chapitre 7). Ce travail n'a pas encore abouti mais reste une perspective de recherche intéressante.

Lorsque les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  sont non linéaires quelconques, (c'est à dire en particulier non polynômiales), peu de travaux existent à l'heure actuelle pour obtenir de manière

systematique les expressions analytiques des RRA. Dans la plupart des cas il est possible de transformer les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  en fonctions polynômiales et les techniques décrites précédemment peuvent être utilisées. Une autre façon de procéder consiste à utiliser les résultats de l'analyse structurelle. Je détaillerai cette approche dans le chapitre 7.

#### 5.1.2.4 Evaluation des dérivées

Le calcul de la valeur numérique des résidus nécessite l'évaluation des dérivées des variables d'entrées et de sortie. Ceci n'est pas sans poser un certain nombre de difficultés dans un environnement bruité et constitue un inconvénient certain à cette méthode. Différents algorithmes sont proposés dans la littérature : approximation polynômiale, utilisation de fonctions splines (Lyche and Schumaker, 1974; Powell, 1970; Tsao, 1993; Woodford, 1970), utilisation d'observateurs (Levant, 1998). Ces algorithmes sont en général associés à des procédures de filtrage des données. Dans le cadre de la thèse de Cyrille Christophe nous avons recensé et appliqué ces méthodes numériques. Nous avons de plus proposé une méthodologie par approximation polynomiale des signaux sur une fenêtre glissante et étudié l'influence du degré du polynôme approximant et de la fenêtre considérée sur la qualité d'estimation de la dérivée ([CI\_00\_2]). Suivant la nature des signaux utilisés, les résultats de l'estimation des dérivées peuvent être plus ou moins bons. Lorsque les signaux sont sinusoïdaux, comme c'est le cas pour les machines électriques, cette estimation n'est pas de très bonne qualité. Nous avons proposé dans ([CI\_00\_2]) d'utiliser les propriétés des signaux sinusoïdaux (courants et tensions) afin de transformer les résidus et ainsi supprimer la composante sinusoïdale. Les résultats de détection sont alors grandement améliorés.

#### 5.1.2.5 Application à la machine asynchrone

Nous avons principalement appliqué nos résultats théoriques sur la génération des RRA dans le cas de modèles polynomiaux, aux machines électriques et plus particulièrement à la machine asynchrone. Ce travail a été réalisé au cours de la thèse de Cyrille Christophe et s'inscrivait dans le cadre du groupe de travail interGDR AUTO/SDSE/ISIS "Méthode de redondance analytique pour la surveillance des entraînements électriques" que j'animais (voir 3.7.1). Il a donné lieu à de nombreuses communications dans des conférences internationales soit à large spectre (ECC99, IFAC Safeprocess), soit plus focalisées sur la problématique des machines électriques (conférences IEEE SDEMPED en particulier).

Le principal problème qui a été soulevé lors des échanges avec les électrotechniciens était la non connaissance d'un modèle macroscopique (du type équations d'état) du comportement défaillant de la machine asynchrone. La localisation du défaut voire son identification était donc impossible. Nous avons travaillé sur cet aspect de modélisation en collaboration avec le Professeur X. CHANG de l'université de Baoding (RP Chine). Ces travaux nous ont permis

de proposer un nouveau modèle de machine tenant compte explicitement des courts-circuits de spire au stator. Ces résultats ont donné lieu à [RI\_03\_1], [RN\_03\_1], [CI\_02\_5] et [CI\_02\_6].

Pour obtenir ce modèle de machine défaillante, nous sommes repartis de la modélisation de base appelée communément *modèle en abc*.

$$[U_S] = [R_S] [I_S] + [P\Psi_S] \quad (5.14)$$

$$[0] = [R_R] [I_R] + [P\Psi_R] \quad (5.15)$$

$$[\Psi_S] = ([L_{S\sigma}] + [M_{SS}]) [I_S] + [M_{SR}] [I_R] \quad (5.16)$$

$$[\Psi_R] = [M_{RS}] [I_S] + ([L_{R\sigma}] + [M_{RR}]) [I_R] \quad (5.17)$$

où

–  $P$  désigne l'opérateur différentiel  $\frac{d}{dt}$

– Les variables

$$[U_S] = \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}, [I_S] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [\Psi_S] = \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix}$$

représentent respectivement les tensions, les courants et les flux au stator.

Les variables

$$[I_R] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \text{ et } [\Psi_R] = \begin{bmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{bmatrix}$$

représentent les courants et les flux au rotor.

- $[R_S]$  (resp.  $[R_R]$ ) représente la matrice de résistances des bobinages du stator (resp. rotor).
- $[L_{S\sigma}]$  (resp.  $[L_{R\sigma}]$ ) est la matrice d'inductance de fuite du stator (resp. rotor).
- $[M_{SS}]$  (resp.  $[M_{RR}]$ ) désigne la matrice des inductances mutuelles entre les trois enroulements du stator (resp. rotor).

- $[M_{SR}]$  (resp.  $[M_{RS}]$ ) désigne la matrice d'inductances mutuelles entre le stator et le rotor (resp. entre le rotor et le stator). Ces matrices vérifient

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^T$$

Les matrices  $[R_S]$ ,  $[R_R]$ ,  $[L_{S\sigma}]$ ,  $[L_{R\sigma}]$ ,  $[M_{SS}]$  et  $[M_{RR}]$  sont des matrices constantes. Les valeurs des paramètres dépendent du nombre de spires des bobinages considérés. Par contre les matrices  $[M_{SR}]$  et  $[M_{RS}]$  sont des matrices à coefficients variant dans le temps. Les coefficients sont fonction de la position relative  $\theta$  entre le stator et le rotor. Cette position est définie de la manière suivante :

Soit  $\theta$  l'angle entre la phase  $A$  du stator et la phase  $A$  du rotor, on a

$$\theta \triangleq \int \omega_s dt$$

$$\omega_s \triangleq (1 - s) \omega_N$$

où  $s \triangleq (\omega_N - \omega_s) / \omega_N$  est le coefficient de glissement,  $\omega_N$  est la pulsation du stator,  $\omega_s$  est la pulsation électrique de la machine.

Si on suppose que le rotor est équilibré, on a

$$[R_R] = R_R [I_{3 \times 3}], \quad [L_{R\sigma}] = L_{R\sigma} [I_{3 \times 3}]$$

et

$$[M_{RR}] = \begin{bmatrix} M_r & -M_r/2 & -M_r/2 \\ -M_r/2 & M_r & -M_r/2 \\ -M_r/2 & -M_r/2 & M_r \end{bmatrix}$$

Soient  $f_{sa}$ ,  $f_{sb}$  et  $f_{sc}$  les pourcentages de réduction du nombre de spires aux trois phases  $a$ ,  $b$  et  $c$  du stator.

Soient les coefficients

$$f_{sa}^* \triangleq 1 - f_{sa}$$

$$f_{sb}^* \triangleq 1 - f_{sb}$$

$$f_{sc}^* \triangleq 1 - f_{sc}$$

Les matrices  $[R_S]$ ,  $[L_{S\sigma}]$ ,  $[M_{SS}]$ ,  $[M_{SR}]$  et  $[M_{RS}]$  dépendent des trois coefficients  $f_{sa}^*$ ,  $f_{sb}^*$  et  $f_{sc}^*$ . On montre, à partir des expressions des paramètres en fonction du nombre de spires des phases considérées, que l'on a :

$$\begin{aligned}
[R_S] &= R_s \begin{bmatrix} f_{sa}^* & 0 & 0 \\ 0 & f_{sb}^* & 0 \\ 0 & 0 & f_{sc}^* \end{bmatrix} \\
[L_{S\sigma}] &= \begin{bmatrix} f_{sa}^{*2} L_{s\sigma} & L_0 & L_0 \\ L_0 & f_{sb}^{*2} L_{s\sigma} & L_0 \\ L_0 & L_0 & f_{sc}^{*2} L_{s\sigma} \end{bmatrix} \\
[M_{SS}] &= M_s \begin{bmatrix} f_{sa}^{*2} & -f_{sa}^* f_{sb}^*/2 & -f_{sa}^* f_{sc}^*/2 \\ -f_{sa}^* f_{sb}^*/2 & f_{sb}^{*2} & -f_{sb}^* f_{sc}^*/2 \\ -f_{sa}^* f_{sc}^*/2 & -f_{sb}^* f_{sc}^*/2 & f_{sc}^{*2} \end{bmatrix} \\
[M_{SR}] &= M \begin{bmatrix} f_{sa}^* \cos \theta & f_{sa}^* \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & f_{sa}^* \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ f_{sb}^* \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & f_{sb}^* \cos(\theta) & f_{sb}^* \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ f_{sc}^* \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & f_{sc}^* \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & f_{sc}^* \cos(\theta) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\text{avec } [M_{SR}] = [M_{RS}]^T$$

**Remarque 5.1.3** Dans le cas où les enroulements du stator sont tous identiques, c'est à dire lorsque la machine est équilibrée, les trois coefficients  $f_{sa}^*$ ,  $f_{sb}^*$  et  $f_{sc}^*$  sont égaux à 1. On retrouve alors le modèle triphasé équivalent classique.

**Remarque 5.1.4**  $R_R$ ,  $L_{R\sigma}$ ,  $M_r$ ,  $R_S$ ,  $L_{S\sigma}$  et  $M_s$  sont des paramètres constants. Leurs valeurs peuvent être déterminées soit en connaissant les caractéristiques physiques de la machine équilibrée (données constructeur), soit par des essais expérimentaux, soit encore par des procédures d'identification.

Lorsque le rotor est en rotation, les coefficients des matrices  $[M_{SR}]$  et  $[M_{RS}]$  ne sont pas constants. Ils varient en fonction de  $\theta$ , position angulaire entre le rotor et le stator, dont la valeur est inconnue en pratique. Ceci rend le modèle triphasé équivalent difficilement utilisable tant en commande qu'en surveillance.

Les paramètres du modèle triphasé ne sont pas tous calculables en ligne car les équations du modèle (eq. (5.14)-(5.17)) sont exprimées dans deux systèmes de coordonnées différents.

Les variables  $[I_R]$  et  $[\Psi_R]$  sont exprimées dans un référentiel lié au rotor tandis que les variables  $[I_S]$ ,  $[U_S]$  et  $[\Psi_S]$  sont exprimées dans un référentiel lié au stator.

Le champ magnétique créé par le courant circulant au rotor a la même pulsation que celui généré par le courant circulant au stator. Ainsi, le champ magnétique au rotor peut être vu comme un champ magnétique induit par un courant statorique fictif. La relation entre ce courant fictif du stator et le courant rotorique est donnée par une transformation mathématique. En utilisant cette transformation toutes les variables du rotor (flux et courants) peuvent être changées en nouvelles variables ayant la même pulsation que les variables du stator. Ainsi, tous les paramètres du modèles seront indépendants de la position angulaire  $\theta$ .

La transformation que nous avons proposée est donnée par la matrice :

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta + \frac{1}{2} & \cos \left( \theta + \frac{2}{3}\pi \right) + \frac{1}{2} & \cos \left( \theta - \frac{2}{3}\pi \right) + \frac{1}{2} \\ \cos \left( \theta - \frac{2}{3}\pi \right) + \frac{1}{2} & \cos \left( \theta \right) + \frac{1}{2} & \cos \left( \theta + \frac{2}{3}\pi \right) + \frac{1}{2} \\ \cos \left( \theta + \frac{2}{3}\pi \right) + \frac{1}{2} & \cos \left( \theta - \frac{2}{3}\pi \right) + \frac{1}{2} & \cos \left( \theta \right) + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

En utilisant cette transformation et après quelques manipulations matricielles, nous obtenons une nouvelle représentation d'état où tous les paramètres sont des constantes connues ou sont calculables en-ligne (voir les articles [\[RI\\_03\\_1\]](#), [\[CI\\_02\\_5\]](#) et [\[CI\\_02\\_6\]](#) pour les expressions explicites des équations d'état et des paramètres).

Ce modèle a été validé en utilisant des mesures réelles effectuées sur le banc d'essai du LAII de Poitiers.

Les figures [5.2](#), [5.3](#), [5.4](#), [5.5](#) et [5.6](#) montrent la comparaison entre les données simulées sous MATLAB en utilisant le nouveau modèle et les données prélevées sur le moteur. Deux cas sont considérés. Dans le premier cas (figures [5.2](#) et [5.3](#)), le stator est équilibré. Dans le second, l'enroulement de la phase  $b$  du stator est réduit de 6.25%. Le stator est donc déséquilibré. Les résultats obtenus dans les deux cas montrent la qualité du modèle proposé.

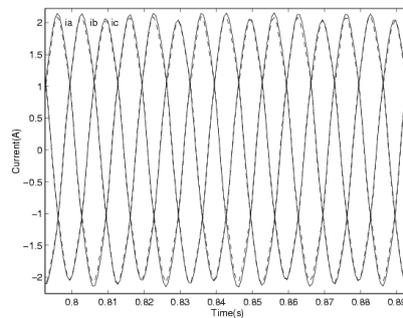


FIG. 5.2: Courants stator réels et simulés (stator équilibré)

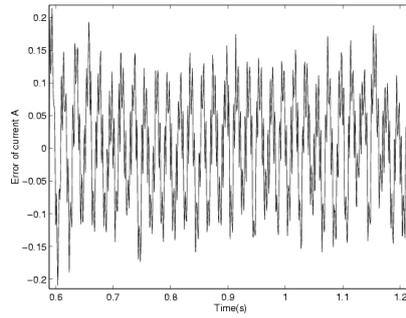


FIG. 5.3: Phase a (ou b ou c du stator : différence entre le courant réel et le courant simulé (stator équilibré)

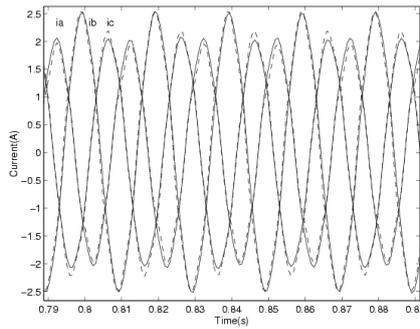


FIG. 5.4: Réduction de l'enroulement de la phase b du stator de 6.25%

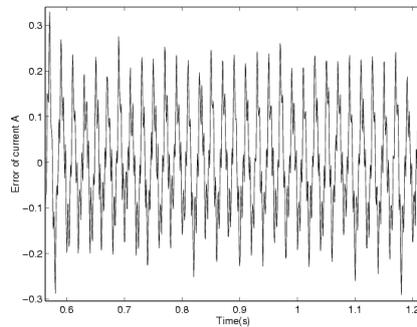


FIG. 5.5: Phase a (ou c) du stator : différence entre le courant réel et le courant simulé (réduction de l'enroulement de la phase b du stator de 6.25%)

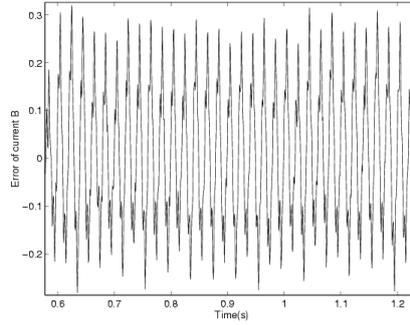


FIG. 5.6: Phase b du stator : différence entre le courant réel et le courant simulé (réduction de l'enroulement de la phase b du stator de 6.25%)

Actuellement, je poursuis ces travaux dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Sétif (Algérie). Notre objectif est d'étudier les formes d'évaluation des résidus de RRA générés à partir de ce nouveau modèle. Nous avons ainsi montré (et vérifié pour l'instant en simulation) que l'étude des résidus permet d'identifier la défaillance c'est à dire de déterminer le nombre de spires en court-circuits.

## 5.2 Utilisation d'observateurs

### 5.2.1 Les observateurs pour la surveillance

Le *Problème Fondamental de la Génération de Résidus : PFGR* (Hammouri *et al.*, 1998) (ou *FPRG : Fundamental Problem of Residual Generation*) à l'aide d'un observateur s'exprime de la manière suivante :

Soit le système dynamique (5.5)

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), d(t), \varphi(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t), d(t), \varphi(t)) \end{cases}$$

Résoudre le PFGR pour ce système, consiste à concevoir un système dynamique

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \Gamma(z(t), u(t), y(t)) \\ r(t) = \Psi(z(t), u(t), y(t)) \end{cases} \quad (5.19)$$

tel que

1. lorsque  $d(t) = 0$  et  $\varphi(t) = 0$ ,  $r(t)$  tend asymptotiquement vers 0,  $\forall u$ ,  $\forall y$  et  $\forall x_0$

2.  $r(t)$  n'est pas affecté par  $d(t)$
3.  $r(t)$  est affecté par  $\varphi(t)$

La première condition correspond à la condition classique de convergence de l'observateur, c'est à dire à "l'élimination" quand  $t \rightarrow \infty$  de l'influence des conditions initiales.

La seconde condition est la condition de robustesse vis à vis des perturbations. On parle alors d'*observateurs à entrées inconnues* (ou UIO : Unknown Input Observer).

La troisième condition est une condition de sensibilité des résidus vis à vis des défaillances.

**Remarque 5.2.1** *En séparant le vecteur de défaillances :*

$$\varphi = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

et en étendant le vecteur des perturbations aux défaillances  $\varphi_2$ , on obtient un ensemble de résidus structurés par rapport à  $\varphi_1$

Le PFGR à l'aide d'observateurs a été largement étudié dans les 20 dernières années et de nombreuses solutions sont proposées dans la littérature suivant la nature du système considéré et la structure de l'observateur choisi.

Les premiers travaux concernent les systèmes linéaires et sont apparus dans les années 80. Afin de répondre au PFGR, des observateurs à entrées inconnues doivent être utilisés. Les conditions d'existence d'une solution ainsi que la synthèse de ces observateurs ont ainsi été établies et sont présentées dans (Massoumnia, 1986; Viswanadham and Srichandert, 1987; Patton *et al.*, 1989; Wünnenberg, 1990; Hou and Muller, 1992). Une théorie unifiée est maintenant bien établie. Les travaux sur les systèmes non linéaires sont plus récents et encore en plein développement. Contrairement au cas linéaire, il n'existe pas (et il n'existera probablement jamais) de théorie générale. Ainsi, pour chaque classe de système non linéaire des observateurs non linéaires de structure différente peuvent être utilisés. Les conditions de résolution du PFGR et la méthode de synthèse sont propres à la solution choisie. Parmi les travaux de référence sur cet axe de recherche, on peut citer par exemple (Kaboré, 1992; Hammouri *et al.*, 1999; Kinnaert, 1999) pour les systèmes bilinéaires, (Hammouri *et al.*, 1998; De Persis and Isidori, 1999) pour les systèmes affines en la commande, (Shields and Ashton, 1999) pour les systèmes polynomiaux.

Les deux principaux problèmes auxquels nous sommes confrontés lors de la synthèse d'un observateur pour la surveillance dans le cas non linéaire sont :

1. Quel observateur choisir ? Quelle est sa structure ? et comment garantir la stabilité de l'observateur ?

2. Comment réaliser le découplage des perturbations et garantir la sensibilité des résidus aux défaillances?

Le premier point a été en partie étudié pour résoudre des problèmes de commande non linéaires. Parmi les solutions classiques, on peut citer les observateurs de type Luenberger (Luenberger, 1971; Chen and Patton, 1999) lorsque le système peut être linéarisé par injection d'entrée sortie (Krener and Isidori, 1983; Krener and Respondek, 1985; Keller, 1987; Isidori, 1995; Plestan, 1995) les observateurs à mode glissant (Slotine *et al.*, 1986), les observateurs à grand gain (Bornard and Hammouri, 1991) ou encore les filtres de Kalman étendus (Grewal and Andrews, 1993).

Le deuxième problème est plus difficile à résoudre. La démarche que suit la plupart des approches repose sur deux étapes successives :

1. transformer les équations du modèle (en utilisant une transformation d'état et/ou de sortie), de manière à faire apparaître des équations découplées des perturbations et présentant une structure adaptée à la synthèse d'observateurs (par exemple la forme canonique d'observabilité ou GOCF : Generalized Observer Canonical Form (Marino and Tomei, 1995))
2. synthétiser un observateur sur la partie découplée.

Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature afin de déterminer les conditions d'existence des transformations d'état et de sortie, suivant la structure du système non linéaire. Ces travaux reposent sur les notions de géométrie différentielle (Isidori, 1995).

Formellement, la première étape de synthèse s'exprime de la manière suivante.

Soit le système

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), d(t), \varphi(t)) \\ y(t) &= h(x(t), u(t), d(t), \varphi(t)) \end{cases}$$

Trouver une transformation d'état  $\tilde{x} = N(x)$  et une transformation de sortie  $\tilde{y} = M(y)$  telles que le système puisse se mettre sous la forme

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1(t), u(t), \varphi(t)) & (a) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(x_1(t), x_2(t), u(t), d(t), \varphi(t)) & (b) \\ y_1(t) &= h_1(x_1(t), u(t), \varphi(t)) & (c) \\ y_2(t) &= h_2(x_1(t), x_2(t), u(t), d(t), \varphi(t)), & (d) \end{cases} \quad (5.21)$$

Le sous-système

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1(t), u(t), \varphi(t)) \\ y_1(t) &= h_1(x_1(t), u(t), \varphi(t)) \end{cases}$$

est parfaitement découplé des perturbations.

La détermination des transformations d'état et de sortie est un problème difficile qui doit être résolu au cas par cas suivant la classe de systèmes non linéaires considérée et suivant la forme des fonctions  $f_1$  et  $h_1$  souhaitée (qui imposera une structure pour l'observateur).

Dans certains cas, par exemple lorsque les incertitudes ne sont pas structurées, le découplage parfait n'est pas possible à réaliser. Il est alors nécessaire d'utiliser des observateurs robustes ou adaptatifs afin de réduire l'influence des perturbations vis à vis des défaillances.

Les techniques de surveillance (détection et isolation des défaillances) à l'aide d'observateurs ont très rapidement été élargies au problème du diagnostic de la défaillance, c'est à dire à l'identification du signal représentant le défaut. On parle alors de *FD observers* : *Fault Diagnosis Observers* pour "Observateurs pour le diagnostic des défauts". L'identification du défaut est nécessaire pour implanter une commande tolérante à ce défaut.

Deux approches sont utilisées :

1. utilisation directe des équations du modèle, en inversant par exemple l'équation 5.21(c) puis en remplaçant  $x_1$  par son estimation  $\hat{x}_1$ . Ceci donne :

$$\hat{\varphi} = \Upsilon(\hat{x}_1(t), u(t), y_1(t)) \quad (5.22)$$

2. extension du vecteur d'état aux défaillances. L'observateur est ainsi construit de manière à estimer l'état étendu donc les défaillances.

**Remarque 5.2.2** Dans le cas des systèmes non linéaires, la synthèse d'observateurs pour le diagnostic de défaillances utilise les outils de géométrie différentielle. Les principales définitions (Isidori, 1995; Marino and Tomei, 1995) sont :

- (1) La différentielle d'une fonction lisse  $h : R^n \rightarrow R$  est notée

$$dh = \left[ \frac{\partial h}{\partial x_1} \cdots \frac{\partial h}{\partial x_n} \right]$$

- (2) La dérivée de Lie d'une fonction  $h$  le long d'un champ de vecteur  $f$  est notée

$$L_f h = dh \cdot f$$

et récursivement on a

$$L_f^n h = L_f(L_f^{n-1} h) = d(L_f^{n-1} h) \cdot f$$

(3) Le crochet de Lie de deux champs de vecteurs  $f, g : R^n \rightarrow R^n$  est noté

$$[f, g] = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot g - \frac{\partial g}{\partial x} \cdot f$$

où  $\frac{\partial f}{\partial x}$  and  $\frac{\partial g}{\partial x}$  représentent les matrices Jacobiennes correspondantes.

Le crochet de Lie de  $f$  et  $g$  est aussi noté  $ad_f g$ , ce qui donne la notation récursive :

$$ad_f^m g = ad_f(ad_f^{m-1} g)$$

(4)  $\rho_i$  ( $i = 1, \dots, r$ ) dénote l'indice d'observabilité associé à la sortie  $i$  (la définition peut être trouvée dans (Marino and Tomei, 1995, pp. 229)). On a la propriété suivante  $\sum_{i=1}^r \rho_i = n$ . On définit  $l$  l'entier le plus grand tel que  $\rho_1 = \dots = \rho_l = 1$

(5) Le système est observable dans  $R^n$  ssi

$$\dim(\text{span}\{dh_i(x), \dots, d(L_f^{\rho_i-1} h_i(x)) : 1 \leq i \leq r\}) = n, \quad \forall x \in R^n.$$

## 5.2.2 Contributions

### 5.2.2.1 Diagnostic des pannes capteurs et actionneurs à l'aide d'observateurs adaptatifs

Dans [CI\_01\_2], nous avons considéré le problème du diagnostic des défaillances dans le cas linéaire. Les systèmes considérés sont modélisés par les équations d'états suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} &= Ax + Bu + Ef + \eta(t) \\ y &= Cx + Df \end{cases} \quad (5.23)$$

où  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^r$ .

La paire  $(A, C)$  est observable et  $\text{rang}(D) = q$ ,  $q \leq r$ . Le vecteur de défaillances capteurs et actionneurs est  $f(t) \in R^q$ .

$\eta(t)$  représente les erreurs de modélisation et les perturbations externes. Ce vecteur  $\eta(t)$  est tel que  $\|\eta(t)\| \leq \eta_0$ ,  $\|\dot{f}(t)\| \leq f_0$ ,  $\|f(t)\| \leq f_1$ .

Deux observateurs adaptatifs sont conçus pour effectuer le diagnostic complet (détection et estimation) des défaillances. Le premier observateur appelé "observateur de détection de pannes" (Fault detection observer), est un observateur de type Luenberger. Il est décrit par les équations :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(\hat{y} - y) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{cases} \quad (5.24)$$

Les valeurs propres de  $A + LC$  sont choisies négatives de manière à ce que la matrice soit stable. Dans ces conditions, l'erreur de sortie  $\varepsilon_0(t) = \hat{y}(t) - y(t)$  peut être bornée en absence de défaillances :

$$\| \varepsilon_0(t) \| \leq \max_{\omega \geq 0} \| C(j\omega I - A - LC)^{-1} \| \eta_0 \triangleq \lambda \quad (5.25)$$

La détection de défaillances est alors réalisée de la manière suivante :

$$\| \varepsilon_0(t) \| \leq \lambda, \quad \text{aucune défaillance} \quad (5.26)$$

$$\| \varepsilon_0(t) \| > \lambda, \quad \text{une défaillance s'est produite} \quad (5.27)$$

Le second observateur, appelé "observateur de diagnostic de pannes" (Fault diagnosis observer), permet de fournir une estimation de l'amplitude de la panne. Cet observateur adaptatif est décrit par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + E\hat{f}(t) + L(\hat{y}(t) - y(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + D\hat{f}(t) \end{cases} \quad (5.28)$$

où

$$\dot{\hat{f}}(t) = -GD^T(\hat{y}(t) - y(t)) - \sigma_1 G\hat{f}(t) \quad (5.29)$$

avec  $\sigma_1$  une constante strictement positive et  $G = G^T > 0$  une matrice de pondération.

La convergence de l'observateur est prouvée si on peut trouver deux matrices symétriques définies positives  $P, Q$ , telles que l'inégalité matricielle suivante soit respectée :

$$(A - ED^+C)^T P + P(A - ED^+C) + 2C^T D D^+ C \leq -Q. \quad (5.30)$$

La matrice  $L$  est choisie telle que  $L = (P^{-1}C^T D - E)D^+$  où  $P$  est solution de 5.30

### 5.2.2.2 Diagnostic des pannes d'actionneurs pour une classe de systèmes non-linéaires à paramètres inconnus

Dans [CI\_01\_1], nous avons considéré le problème du diagnostic des pannes pour une classe de systèmes non-linéaires à paramètres inconnus. Les équations d'état sont :

$$\dot{x} = f(x) + q_0(x)u + \sum_{i=1}^p \theta_i q_i(x, u) + \sum_{j=1}^d e_j(x) f_{a_j} \quad (5.31)$$

$$y = h(x) \quad (5.32)$$

où  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$  et  $y \in R^r$ .

Le vecteur de défaillances actionneurs  $f_a = [f_{a1}, \dots, f_{ad}] \in R^d$  est modélisé comme une perturbation avec  $d \leq r < n$ . Les incertitudes sont modélisées par le terme  $\theta_i q_i(x, u)$ . De plus,  $f(\cdot)$ ,  $q_0(\cdot)$ ,  $q_i(\cdot, \cdot)$  ( $i = 1, \dots, p$ ) et  $e_j(\cdot)$  ( $j = 1, \dots, d$ ) sont des champs de vecteurs lisses et  $h(\cdot)$  est une fonction vectorielle lisse avec  $\text{rang}(dh/dx) = r$ , ce qui signifie que les  $r$  sorties sont indépendantes.

Dans un premier temps, sous certaines conditions géométriques (détaillées dans [CI\_01\_1]), le système est divisé en deux sous-systèmes. La forme obtenue est appelée FDGAOCF pour *Fault Diagnosis Generalized Adaptive Observer Canonical Form*. Cette forme est la suivante :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{bmatrix} 0_{l \times l} & 0_{l \times (n-l)} \\ 0_{(n-l) \times l} & A \end{bmatrix} z + \gamma(y, u) + \sum_{i=1}^p \psi_i(y, u) \theta_i + \sum_{j=1}^d \begin{bmatrix} \phi_j(z) \\ 0_{(n-l) \times 1} \end{bmatrix} f_{aj} \quad (5.33) \\ y &= \begin{bmatrix} I_{l \times l} & 0_{l \times (n-l)} \\ 0_{(r-l) \times l} & C \end{bmatrix} z \quad (5.34) \end{aligned}$$

avec

$$\begin{aligned} A &= \text{diag}[A_{l+1}, \dots, A_r] \in R^{(n-l) \times (n-l)} \\ C &= \text{diag}[C_{l+1}, \dots, C_r] \in R^{(r-l) \times (n-l)} \\ A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad l+1 \leq i \leq r \\ C_i &= [1 \ 0 \ \dots \ 0], \quad l+1 \leq i \leq r. \end{aligned}$$

Le premier sous-système est sous la forme canonique observable et est découplé des pannes actionneurs. Le second est affecté par les pannes mais le vecteur d'état peut être directement mesuré. En notant

$$\begin{aligned} \bar{z}_1 &\triangleq [z_1^1, \dots, z_l^1]^\tau, \quad \bar{z}_2 \triangleq [z_{l+1}^1, \dots, z_{l+1}^{\rho_{l+1}}, \dots, z_r^1, \dots, z_r^{\rho_r}]^\tau; \\ \bar{y}_1 &\triangleq [y_1, \dots, y_l]^\tau, \quad \bar{y}_2 \triangleq [y_{l+1}, \dots, y_r]^\tau, \end{aligned} \quad (5.35)$$

le système (5.31)-(5.32) peut être réécrit

$$\dot{\bar{z}}_1 = \gamma_1(y, u) + \psi_1(y, u) \theta + M(z) f_a \quad (5.36)$$

$$\bar{y}_1 = \bar{z}_1 \quad (5.37)$$

$$\dot{\bar{z}}_2 = A \bar{z}_2 + \gamma_2(y, u) + \psi_2(y, u) \theta \quad (5.38)$$

$$\bar{y}_2 = C \bar{z}_2 \quad (5.39)$$

où

$$M(z) = \begin{bmatrix} L_{e_1} h_1 & \cdots & L_{e_d} h_1 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ L_{e_1} h_l & \cdots & L_{e_d} h_l \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

En généralisant la synthèse d'observateur développée dans (Krener and Isidori, 1983) et (Marino, 1990) un observateur adaptatif est appliqué sur le deuxième sous système. Cet observateur se présente sous la forme :

$$\frac{d\hat{z}_2(t)}{dt} = A\hat{z}_2 + \gamma_2(y, u) + B\bar{\psi}_2(y, u)\hat{\theta} + K(\bar{y}_2 - C\hat{z}_2) \quad (5.41)$$

et la loi d'adaptation est

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = G\bar{\psi}_2^T(y, u)(\bar{y}_2 - C\hat{z}_2) \quad (5.42)$$

La convergence de l'observateur est prouvée sous l'hypothèse de bornitude de la fonction  $\bar{\psi}_2(y, u)$  et sous la condition dite SPR (*Strictly Positive Realness*) de la fonction de transfert  $C[sI - (A - KC)]^{-1}B$ .

La panne actionneur peut alors être estimée grâce au premier sous-système en utilisant les estimations de l'état et des paramètres fournies par l'observateur adaptatif.

On a

$$\hat{f}_a(t) = (\hat{M}^T \hat{M})^{-1} \hat{M}^T(t) [\hat{y}_1(t) - \gamma_1(y(t), u(t)) - \psi_1(y(t), u(t))\hat{\theta}(t)] \quad (5.43)$$

où  $\hat{M}(t) = M(\bar{y}_1(t), \hat{z}_2(t))$ .

Les résultats obtenus dans [CI\_01\_1] dans le cas des pannes actionneurs ont été étendus au cas des pannes capteurs et aux systèmes à paramètres non-linéaires inconnus. Les résultats ont été publiés dans la revue *International Journal of Control*: [RI\_04\_1]. De plus, nous montrons qu'il est possible de s'affranchir de la condition SPR sur la fonction de transfert du système ce qui rend les conditions d'applicabilité de la méthode beaucoup moins restrictives.

### 5.2.2.3 Utilisation d'observateurs à mode glissant pour la surveillance des systèmes affines

Les observateurs à mode glissant (Sliding Mode Observers) sont une classe particulière d'observateurs non linéaires. Plusieurs résultats de recherche concernant l'utilisation de ces observateurs pour résoudre le problème de surveillance ont été publiés. Ainsi, une approche est proposée dans (Sreedhar *et al.*, 1993) mais en supposant que les états du système sont tous accessibles. Une approche différente est développée dans (Hermanns and Zarrop, 1996) qui tentent de synthétiser un observateur tel que, en présence de défaillances, la surface de glissement est supprimée. Edwards et al (Edwards *et al.*, 2000) considèrent une classe de

systèmes linéaires pour lesquels les états ne sont pas disponibles. Cet observateur est conçu de manière à maintenir la surface de glissement même en présence de défauts. Les pannes sont détectées en analysant l'injection de sortie équivalente. Dans [CI\_02\_2], nous avons étendu ces résultats à une classe de systèmes non linéaires affines décrits par les équations :

$$\dot{x} = f(x) + \Delta f(x) + \sum_{i=1}^m q_i(x)u_i + \sum_{j=1}^{d_a} e_{aj}(x)f_{aj} \quad (5.44)$$

$$y = h(x) + \sum_{k=1}^{d_s} e_{sk}(x)f_{sk} \quad (5.45)$$

où  $x \in R^n$ ,  $u = [u_1, \dots, u_m]^T \in R^m$ , et  $y \in R^r$ .

$\Delta f(x)$  représente les incertitudes de modélisation et les perturbations. Ce terme est supposé lisse et borné.

Les défaillances actionneurs et procédé sont représentées par  $f_a = [f_{a1}, \dots, f_{ad_a}]^T \in R^{d_a}$ , tandis que les défaillances capteurs sont  $f_s = [f_{s1}, \dots, f_{sd_s}]^T \in R^{d_s}$  avec  $d_a, d_s \leq r < n$ .

$f(\cdot)$ ,  $q_i(\cdot)$  ( $i = 1, \dots, m$ ) et les distributions  $e_{aj}(\cdot)$ ,  $e_{sk}(\cdot)$  ( $j = 1, \dots, d_a$ ;  $k = 1, \dots, d_s$ ) sont des champs de vecteurs lisses respectivement à  $x$ .

$h(\cdot) = [h_1(\cdot), \dots, h_l(\cdot), h_{l+1}(\cdot), \dots, h_r(\cdot)]^T$  est un vecteur de fonctions lisses.

On suppose que le système est stable ou peut être stabilisé en l'absence de défaillances.

La première étape consiste à mettre le système sous une forme canonique d'observabilité. Deux formes sont proposées suivant que l'on considère des défaillances actionneurs ou des défaillances capteurs. Dans le cas des défaillances actionneurs, la forme canonique est :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{bmatrix} 0_{l \times l} & 0_{l \times (n-l)} \\ 0_{(n-l) \times l} & A \end{bmatrix} z + \gamma(y, u) + \begin{bmatrix} \Delta F_1(z) \\ \Delta F_2(z) \end{bmatrix} \\ &+ \sum_{j=1}^{d_a} \begin{bmatrix} \psi_j(z) \\ 0_{(n-l) \times 1} \end{bmatrix} f_{aj} \end{aligned} \quad (5.46)$$

$$y = \begin{bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{l \times l} & 0_{l \times (n-l)} \\ 0_{(r-l) \times l} & C \end{bmatrix} z \quad (5.47)$$

où

$$- z = N(x) = \begin{bmatrix} \bar{z}_1 \\ \bar{z}_2 \end{bmatrix} \text{ est le nouveau vecteur d'état. } N \text{ est un difféomorphisme.}$$

– Les deux matrices  $A_{(n-l) \times (n-l)}$  et  $C_{(r-l) \times (n-l)}$  sont

$$A_{(n-l) \times (n-l)} = \text{diag}[A_1, \dots, A_{r-l}]$$

$$C_{(r-l) \times (n-l)} = \text{diag}[C_1, \dots, C_{r-l}]$$

avec  $(A_i, C_i)$  ( $i = 1, \dots, r-l$ ) observable,

–  $\Delta F_1(z)$  et  $\Delta F_2(z)$  les termes relatifs aux défaillances dans les nouvelles coordonnées,

–  $\psi_j(z)$  les distributions des défaillances dans les nouvelles coordonnées,

–  $\gamma(\cdot, \cdot) = \begin{bmatrix} \gamma_1(\cdot, \cdot) \\ \gamma_2(\cdot, \cdot) \end{bmatrix}$  un vecteur de fonctions non linéaires des variables  $y$  et  $u$ .

Dans le cas des défaillances capteurs, la forme canonique est :

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0_{l \times l} & 0_{l \times (n-l)} \\ 0_{(n-l) \times l} & A \end{bmatrix} z + \eta(\bar{y}_2, u) + \begin{bmatrix} \Delta F_1(z) \\ \Delta F_2(z) \end{bmatrix} \quad (5.48)$$

$$y = \begin{bmatrix} I_{l \times l} & 0_{l \times (n-l)} \\ 0_{(r-l) \times l} & C \end{bmatrix} z + \sum_{k=1}^{d_s} \begin{bmatrix} \psi_k(z) \\ 0_{(r-l) \times 1} \end{bmatrix} f_{sk} \quad (5.49)$$

où les matrices  $A, C$  sont identiques au cas précédent.

Les conditions géométriques que doivent satisfaire les équations du modèle pour que l'on puisse trouver un difféomorphisme  $N : z = N(x)$  permettant d'obtenir les formes canoniques sont données dans [CI\_02\_2] (pour les défaillances actionneurs) et [RI\_04\_2] pour les deux types de défaillance.

Il est à noter que dans les deux cas, la forme canonique permet de découpler les perturbations des défaillances. Ainsi, une partie des équations d'état et de mesure dans les nouvelles coordonnées est indépendante des défaillances mais dépend des perturbations. Nous appellerons ce sous système d'état  $\Sigma_1$ . Les autres équations sont robustes aux perturbations mais sensibles aux défaillances (sous-système  $\Sigma_2$ ).

Dans un premier temps, nous proposons d'implanter un observateur non linéaire robuste sur  $\Sigma_1$ . Dans le cas des défaillances actionneurs, l'observateur choisi est :

$$\frac{d\hat{z}_2}{dt} = A\hat{z}_2 + \gamma_2(y, u) + K(\bar{y}_2 - \hat{y}_2) + W(y, \hat{z}_2, t) \quad (5.50)$$

$$\hat{y}_2 = C\hat{z}_2 \quad (5.51)$$

où  $W(y, \hat{z}_2, t)$  est une fonction non linéaire choisie de manière à garantir la convergence de l'observateur en présence des perturbations. Pour les défaillances capteurs, la structure de l'observateur est identique, il suffit de remplacer  $y$  par  $\bar{y}_2$  dans 5.50.

Les conditions géométriques garantissant la convergence de l'observateur robuste sont relativement restrictives. Dans le cas où ces conditions ne peuvent être satisfaites, nous proposons d'utiliser un observateur à mode glissant (Sliding Mode Observer). Dans le cas des défaillances actionneurs, cet observateur se présente sous la forme :

$$\frac{d\hat{z}_2}{dt} = A\hat{z}_2 + \gamma_2(y, u) + K(\bar{y}_2 - \hat{y}_2) + \alpha_2(y)B\text{sign}(L\bar{y}_2 - L\hat{y}_2) \quad (5.52)$$

$$\hat{y}_2 = C\hat{z}_2 \quad (5.53)$$

où  $\text{sign}(\cdot)$  représente la fonction "signe" usuelle,  $L$  est une matrice de pondération et  $\alpha_2(y)$  une fonction non linéaire de  $y$ .  $L$  et  $\alpha_2(y)$  sont choisies de manière à satisfaire les conditions de convergence.

**Remarque 5.2.3** *Les conditions géométriques garantissant la convergence de l'observateur à mode glissant ne sont pas moins strictes que celles garantissant la convergence de l'observateur robuste. Ces conditions sont cependant différentes ce qui élargit la classe de systèmes non linéaires qui peuvent être traités.*

La deuxième étape de notre approche consiste à utiliser les équations d'état du sous-système  $\sum_2$  pour estimer la défaillance en utilisant l'état estimé  $\hat{z}_2$  précédemment.

#### 5.2.2.4 Synthèse d'observateurs de diagnostic robustes pour une classe de systèmes non linéaires avec incertitudes.

Dans [CI\_01\_4], nous avons étendu les résultats présentés dans (Marino, 1990) à une classe de systèmes non linéaires (affines en la commande) soumis à des incertitudes. Le système SISO (single input single output) considéré se présente sous la forme :

$$\dot{x} = f(x) + \Delta f(x) + g(x)u + q(x)f_a \quad (5.54)$$

$$y = h(x) \quad (5.55)$$

où  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$  ( $u$  est supposé borné :  $|u| < U$  et  $y \in R$ ).

Le vecteur de défaillances actionneurs ou procédé est  $f_a$  et les perturbations et erreurs de modélisation sont modélisés par  $\Delta f(x)$ . De plus,  $f(\cdot)$ ,  $g(\cdot)$  et  $q(\cdot)$  sont des champs de vecteurs lisses.  $h(\cdot)$  est une fonction vectorielle lisse.

En supposant que  $\rho_1 = n$ ,  $\rho_2 = 1$  et que le système est localement observable (c'est à dire  $\text{rang}\{d(L_f^i)h : 0 \leq i \leq n-1\} = n$ , on montre que l'on peut trouver un difféomorphisme  $z = T(x)$  permettant de mettre le système (5.54, 5.55) sous la forme canonique observable généralisée :

$$\dot{z} = Az + Bu[L_f^n h(T^{-1}(z)) + L_g L_f^{n-1} h(T^{-1}(z))u] + \Delta F(z) + Q(z)f_a \quad (5.56)$$

$$y = Cz \quad (5.57)$$

avec

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ \cdots \ 0]$$

et

$$\begin{aligned} \Delta F(z) &= [L_{\Delta_f} h L_{\Delta_f} L_f h \dots L_{\Delta_f} L_f^{n-1} h]^\tau \\ Q(z) &= [L_q h L_q L_f h \dots L_q L_f^{n-1} h]^\tau, L_q h \neq 0 \end{aligned}$$

Un observateur robuste est alors construit pour détecter les défaillances. Il est donné par

$$\dot{\hat{z}} = A\hat{z} + Bu[L_f^n h(T^1(\hat{z})) + L_g L_f^{n-1} h(T^{-1}(\hat{z}))u] + K(y - \hat{y}) + W(y, \hat{z}) \quad (5.58)$$

$$\hat{y} = C\hat{z} \quad (5.59)$$

où  $W(y, \hat{z})$  est une fonction choisie pour garantir la convergence.

L'expression de la fonction  $W(y, \hat{z})$  ainsi que les conditions que doivent respecter  $K$  et  $W(y, \hat{z})$  pour que l'observateur converge, sont données dans [CI\_01\_4].

En utilisant l'état estimé, il est alors possible d'estimer la panne à partir de (5.56) et (5.57) et en supposant qu'aucune défaillance n'est intervenue durant le transitoire de l'observateur.

### 5.2.2.5 Filtre $H_\infty$ de détection de pannes pour une classe de systèmes discrets à retards multiples

Ces dernières années, de nombreux travaux ont été réalisés pour résoudre le problème de surveillance en utilisant la théorie  $H_\infty$  de manière à améliorer les possibilités d'atténuation des entrées inconnues. Cette théorie s'applique lorsque le découplage parfait des effets des pannes vis à vis des entrées inconnues (incertitudes de modèle et perturbations externes au système) est impossible à réaliser. Nous avons considéré ce problème de conception de filtre de détection  $H_\infty$  pour les systèmes discrets à retards multiples. Les résultats ont été publiés dans [CI\_02\_1] et étendus dans [RI\_03\_2]. Les systèmes que nous considérons sont modélisés par

$$x(k+1) = Ax(k) + \sum_{i=1}^N A_i x(k - \tau_i) + Bu(k) + F_1 f(k) + D\omega(k) \quad (5.60)$$

$$y(k) = Cx(k) + F_2 f(k) \quad (5.61)$$

où  $x(k) \in R^n$  est le vecteur d'état,  $u(k) \in R^m$  est le vecteur de commande,  $y(k) \in R^r$  est le vecteur de mesure,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , et les entiers  $\tau_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) sont des retards.

Les matrices  $A, B, C, D, F_1, F_2$  et  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) sont des matrices réelles de dimensions appropriées et  $C$  est de rang plein ligne. Le vecteur d'entrées inconnues  $\omega(k) \in R^d$  inclut les incertitudes de modélisation et les perturbations externes. Le vecteur de défaillances est  $f(k) \in R^q$ .

Le filtre considéré est donné par :

$$\hat{x}(k+1) = \tilde{A}\hat{x}(k) + \sum_{i=1}^N A_i \hat{x}(k - \tau_i) + Bu(k) + Ky(k) \quad (5.62)$$

où  $\hat{x}(k) \in R^n$  est le vecteur d'état estimé,  $\tilde{A} \triangleq A - KC$  et  $K$  est la matrice de gain du filtre.

Le vecteur de résidus  $\varepsilon(k)$  est

$$\varepsilon(k) = S[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (5.63)$$

où  $\hat{y}(k) = C\hat{x}(k)$  et  $S$  est une matrice choisie de manière à garantir des propriétés de localisabilité des défaillances (structuration des résidus). La matrice de transfert relative aux perturbations est

$$H_\omega(z) \triangleq \frac{\omega(z)}{\varepsilon(z)} \triangleq SC[zI_n - \tilde{A} - \sum_{i=1}^N z^{-\tau_i} A_i]^{-1}D \quad (5.64)$$

La matrice de transfert relative aux défaillances est

$$H_f(z) \triangleq \frac{f(z)}{\varepsilon(z)} \triangleq SF_2 + SC[zI_n - \tilde{A} - \sum_{i=1}^N z^{-\tau_i} A_i]^{-1}F, \quad F \triangleq F_1 - KF_2 \quad (5.65)$$

Le problème de synthèse  $H^\infty$  du filtre de détection est le suivant :

Etant donné le système décrit par les équations (5.60,5.61) et le filtre donné par (5.62), déterminer la matrice de gain  $K$  telle que

(i) Le filtre 5.62 converge pour tout  $\tau_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ),  $\omega = 0$  and  $f(k) = 0$ ; i.e. la dynamique de l'erreur est asymptotiquement stable.

(ii) La norme  $H^\infty$  de la matrice de transfert  $H_\omega(z)$ , définie par

$$\| H_\omega(z) \|_\infty = \sup_{\omega \in l_2} \frac{\| \varepsilon \|_2}{\| \omega \|_2} = \sup_{\theta \in [0, 2\pi]} \sigma_{max}[H_\omega(e^{j\theta})].$$

satisfait la contrainte

$$\| H_\omega(z) \|_\infty \leq \gamma \quad (5.66)$$

où  $\gamma$  est un scalaire positif appelé indice de performance

(iii) le résidu est sensible aux défaillances.

Une solution à ce problème d'optimisation est proposée dans [CI\_02\_1]. Dans [RI\_03\_2], on montre que les degrés de liberté restants peuvent être utilisés pour garantir une sensibilité satisfaisante des résidus aux défaillances.

### 5.2.2.6 Filtre de diagnostic robuste pour les systèmes bilinéaires et stochastiques

Les systèmes bilinéaires constituent une classe spéciale de systèmes non linéaires dans lesquels la commande apparaît sous forme non seulement additive mais aussi multiplicative. Dans [RI\_01\_1] et [CI\_01\_3], nous avons considéré le problème de détection de pannes pour une classe de systèmes stochastiques bilinéaires soumis à des perturbations inconnues :

$$x(k+1) = Ax(k) + \sum_{i=1}^m A_i u_i(k) x(k) + Bu + Ed(k) + \omega(k) + D_1 f_a(k) \quad (5.67)$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k) + D_2 f_s(k) \quad (5.68)$$

où  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $y \in R^r$

$d(k) \in R^q$  est le vecteur des perturbations inconnues.

$\omega(k)$  and  $v(k)$  sont des bruits non corrélés de moyenne nulle tels que :

$$E \left( \begin{bmatrix} \omega(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega^\tau(j) & v^\tau(j) \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \delta_{kj}$$

où  $Q$  et  $R$  sont des matrices définies positives,  $\delta_{kj}$  est la fonction de Kronecker.

$f_a$  et  $f_s$  sont respectivement les défaillances actionneurs et les défaillances capteurs.  $D_1$  et  $D_2$  sont les matrices d'influence des défauts supposées constantes.

Dans un premier temps, nous avons considéré le problème d'estimation d'état en l'absence de défaillance et proposé d'utiliser le filtre dont la structure générale est donnée par :

$$z(k+1) = Fz(k) + Ly(k) + Ju(k) \quad (5.69)$$

$$+ \sum_{i=1}^m G_i u_i(k) y(k) + \sum_{i=1}^m M_i u_i(k) z(k) \quad (5.70)$$

où  $F_{n \times n}$ ,  $L_{n \times r}$ ,  $J_{n \times m}$ ,  $G_{i(n \times r)}$ ,  $M_{i(n \times n)}$  sont des matrices à déterminer de manière à ce que  $z \rightarrow Tx$  quand  $t \rightarrow \infty$  en présence des perturbations.

En supposant que  $C$  est de rang plein ligne et  $CE$  est de rang plein colonne, on montre qu'une solution au problème d'estimation est :

$$T = I_n - E(CE)^+ C \quad (5.71)$$

$$F = TA - KC \quad (5.72)$$

$$L = K + FE(CE)^+ \quad (5.73)$$

$$G_i = C^- T A_i, \quad i = 1, \dots, m. \quad (5.74)$$

où  $(CE)^+$  est la pseudo-inverse de  $CE$  à gauche et  $C^-$  est la pseudo-inverse de  $C$  à droite.

La matrice de gain  $K$  peut être choisie de manière à ce que la variance de l'erreur d'estimation soit minimale :

$$K(k) = -[H\bar{R}\bar{E}^T - TAP(k)C^T] \times [CP(k)C^T + \bar{E}\bar{R}\bar{E}^T]^{-1} \quad (5.75)$$

où

$$\bar{E}_{r \times r} \triangleq I_{r \times r} - CE(CE)^+ \quad (5.76)$$

$$H_{n \times r} \triangleq TAE(CE)^+ + \sum_{i=1}^m G_i u_i \quad (5.77)$$

Nous considérons ensuite le problème de détection. Le résidu est donné par :

$$r(k) = N_1 z(k) + N_2 y(k) \quad (5.78)$$

où  $N_{1(n \times n)}$  et  $N_{2(n \times r)}$  sont des matrices à déterminer.

Pour garantir la robustesse vis à vis des entrées inconnues  $d$ , il faut :

$$N_1 T + N_2 C = 0 \quad (5.79)$$

Les degrés de liberté restants permettent de garantir la sensibilité du résidu aux défaillances capteurs et actionneurs.

### 5.3 Comparaison des méthodes de génération de résidus par RRA et par observateurs

De nombreux travaux ont cherché à mettre en évidence les liens existants entre les méthodes de surveillance utilisant les observateurs et celles utilisant les Relations de Redondance Analytique (plus connue sous le nom *méthode de l'espace de Parité*). Nos travaux ont largement contribué à la comparaison des deux approches dans le cas des systèmes linéaires (dans le cadre de ma thèse) et non linéaires (dans le cadre de la thèse de Cyrille Christophe).

Dans le cas des systèmes linéaires, on peut citer les articles (Ding and Frank, 1994; Patton and Chen, 1991b; Nuninger *et al.*, 1997) ainsi que nos travaux [OS\_91\_1], [CI\_91\_1], [CI\_91\_3]. Ces études ont montré que les résidus issus des observateurs peuvent être obtenus en filtrant les résidus de parité, à l'aide d'un filtre linéaire dont les caractéristiques dépendent de la matrice de gain de l'observateur. Dans le cas non linéaire, les travaux sont moins abondants. Les articles (Gertler, 2000; Kinnaert, 2003) présentent les 2 approches dans un même contexte et montrent que la démarche est identique. Nos travaux ont permis d'établir de manière explicite le lien entre les approches pour deux observateurs non linéaires particuliers.

Ainsi dans [CI\_00\_1] nous avons étendu les résultats du linéaire au cas des systèmes linéarisables par injection d'entrée sortie et dans [RI\_04\_4] et [CI\_02\_3] nous avons établi qu'une relation différentielle non linéaire lie les résidus issus des RRA et d'un observateur à grand gain.

Le but poursuivi dans ces travaux de comparaison n'est en aucun cas de déterminer quelle est la "meilleure" méthode. Les deux approches ont leurs avantages et inconvénients respectifs et l'objectif est plutôt de mettre en évidence la complémentarité des deux approches afin d'exploiter les points forts de chacune d'elles et éventuellement établir des passerelles qui permettrait d'utiliser une approche mixte.

Même si des liens ont été mis en évidence entre les approches, l'équivalence des méthodes n'est pas totalement démontrée en particulier concernant les possibilités de découplage. La comparaison des conditions de découplage est un problème difficile car celles-ci ne s'expriment pas de la même manière pour les deux approches : conditions de rang de la matrice Jacobienne étendue aux perturbations dans le cas de la méthode par RRA, conditions géométriques pour les méthodes par observateur.

	Avantages	Inconvénients
Méthode par RRA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• on dispose d'une forme analytique d'évaluation du résidu</li> <li>• l'étude de la sensibilité des résidus aux pannes ou aux perturbations est possible</li> <li>• les techniques d'éliminations sont les mêmes quelle que soit la "structure" du modèle,</li> <li>• l'analyse structurelle ne limite pas cette méthode aux modèles polynômiaux,</li> <li>• on élimine l'état initial, il n'y a donc pas de problème de convergence.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• complexité (non maîtrisée) de la procédure d'élimination,</li> <li>• les signaux doivent être dérivables,</li> <li>• calcul des dérivées : des outils parfois complexes doivent être utilisés,</li> <li>• grande sensibilité aux bruits,</li> </ul>
Méthode à base d'observateur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• outils utilisés en commande,</li> <li>• robustesse aux bruits,</li> <li>• estimation possible des défaillances.</li> <li>• peut-être utilisée même si les signaux ne sont pas dérivables</li> <li>• les non linéarités peuvent être non dérivables (seuils, saturations par exemple)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• structuration difficile en non linéaire,</li> <li>• pas de forme d'évaluation des résidus : étude de sensibilité difficile,</li> <li>• chaque classe de système non linéaire nécessite une étude spécifique,</li> </ul>

## 5.4 Conclusions et perspectives

Les travaux concernant les méthodes de génération de résidus pour la détection et l'isolation des défaillances ont été très nombreux dans les 20 dernières années. Même si les méthodes sont désormais formellement bien définies, il reste encore de nombreux points à développer, que ce soit pour les méthodes à base de RRA que pour les méthodes à base d'observateurs, afin d'améliorer chacune des approches et de limiter, voire supprimer, leurs inconvénients respectifs. Les perspectives de recherche sont nombreuses et concernent non seulement la conception (hors ligne) du générateur de résidus mais aussi l'exploitation (en ligne) des résidus.

### Conception du générateur de résidus

Comme nous l'avons vu, la génération des RRA est un problème général d'élimination de variables dans un système d'équations. Pour la classe des systèmes non linéaires polynomiaux, les méthodes d'élimination formelles (par exemple l'utilisation des bases de Groebner) nécessitent de fixer *a priori* un ordre d'élimination. Suivant l'ordre choisi, la complexité de l'élimination peut être totalement différente. Rien ne permet à l'heure actuelle de guider le choix de cet ordre. Ceci constitue une perspective de recherche théorique intéressante.

Concernant les méthodes à base d'observateurs, la théorie est bien établie dans le cas des systèmes linéaires et pour certaines classes de systèmes non linéaires. Des travaux doivent être poursuivis afin d'étendre les méthodes à d'autres classes de systèmes non linéaires.

Afin d'être utilisables, les résidus doivent être *le plus sensible possible* aux défaillances et *le plus robuste possible* aux perturbations et erreurs de modèles. L'optimisation des résidus est nécessaire lorsque les conditions de découplage au sens strict ne sont pas vérifiées. De nombreux travaux ont été réalisés dans le cas des systèmes linéaires. Par contre peu de choses existent dans le cas des systèmes non linéaires. Le but recherché est de maximiser la sensibilité des résidus aux défaillances tout en minimisant la sensibilité aux perturbations et erreurs de modélisation. Le problème est beaucoup plus difficile en non linéaire où les *sensibilités* des résidus ne sont pas constantes comme c'est le cas pour les systèmes linéaires mais sont des fonctions non linéaires non seulement des variables connues mais aussi des perturbations et des défaillances elles-mêmes.

### Exploitation des résidus

En ce qui concerne les méthodes à base de RRA le principal problème vient de la nécessité de calculer et d'utiliser les dérivées de signaux bruités. Deux voies de recherche peuvent être envisagées : développer des techniques performantes d'estimation des dérivées ou trouver des moyens d'éviter le calcul des dérivées.

Afin d'estimer les dérivées sans amplifier les bruits, différentes pistes peuvent être explorées :

- pré-traitement et/ou post-traitement des signaux et des résidus. Ces traitements consistent

généralement en des techniques de filtrage ou de lissage des données. Ceci ne pose pas de problèmes dans le cas des systèmes linéaires pour lesquels le principe de superposition s'applique. Par contre, dans le cas non linéaire, le problème est beaucoup plus délicat.

- utilisation d'observateurs ou de filtres pour estimer les dérivées. Des travaux dans ce sens ont été réalisés dans (Levant, 1998).
- transformation des équations du modèle et des signaux de manière à éviter certains types de signaux entraînant un calcul plus délicat des dérivées (signaux sinusoïdaux, ruptures brusques). Cette méthode ne s'applique qu'au cas par cas. Nous l'avons utilisé dans [CI\_00\_2] pour le modèle de la machine asynchrone.

L'autre voie de recherche consiste à éviter le calcul des dérivées en transformant (intégrant) les résidus. Des travaux dans ce sens ont déjà été réalisés par A. Shumsky (Shumsky, 1999) ou P. Taillibert : (Taillibert, 1999). Nous avons complété ceux-ci dans le cadre du contrat n°51 565 LAIL/Thomson Detexis (voir le rapport [RC\_00\_1]) et en particulier établi des conditions nécessaires et suffisantes d'obtention de la forme analytique du résidu adaptée à l'intégration. Des travaux dans cette voie ont été poursuivis dans l'équipe SFSD dans le cadre du projet CHEM et de la thèse de Rim Mrani ((Mrani, 2004) : co-encadrement B. Ould Bouamama et P. Taillibert). Les résultats obtenus montrent que la méthode est très prometteuse.

# Chapitre 6

## Surveillance des systèmes dynamiques hybrides

### 6.1 Introduction

De nombreux procédés industriels sont hybrides par nature, ce qui signifie que leur comportement résulte de l'évolution et de l'interaction de variables continues et de variables discrètes. Ces dernières années, ces systèmes ont fait l'objet d'importants travaux concernant la modélisation, la simulation, la vérification et la synthèse de lois de commandes (Branicky, 1996), (Pettersson, 1999), (Zaytoon and et al, 1999).

Le comportement dynamique d'un système hybride peut être représenté par une succession de modes. Chaque mode est caractérisé par une modalité de l'état discret, un ensemble de contraintes égalités (équations d'état par exemple) et la définition d'un domaine d'admissibilité (décrit par des contraintes inégalités). Une transition d'un mode vers un autre mode a lieu lorsque certaines conditions logiques sont vérifiées. Une transition peut être contrôlée ou spontanée suivant qu'elle est provoquée par un événement externe contrôlé ou un événement interne.

Pour ce type de système, peu de travaux ont été consacrés à la détection, la localisation ou le diagnostic des défaillances (Narasimhan *et al.*, 2000). De plus, même en fonctionnement normal, une des hypothèses classiquement formulée pour la commande discrète de ces systèmes, est que le mode dans lequel se trouve le système (le mode courant) est à tout instant connu. Ceci est une hypothèse parfois très forte qui n'est pas toujours vérifiée sur une installation industrielle et qui nécessite une instrumentation (capteurs) parfois abondante, performante et coûteuse. La détermination du mode courant est donc une fonctionnalité supplémentaire que doit présenter la couche logicielle de surveillance.

Dans [CI\_03\_2], nous avons proposé d'utiliser les résidus de parité pour identifier le mode courant du système et estimer l'instant de transition. Dans [CI\_04\_1], le problème

de diagnostic des défaillances est clairement défini. Les défaillances survenant sur un système hybride peuvent affecter le comportement du système au sein d'un mode ou affecter la séquence d'états discrets. Nous avons ainsi montré comment les résidus d'élimination, issus des relations de redondance analytique, permettent sous certaines conditions de détecter et isoler ces deux types de défaillances. Enfin dans [CI\_04\_4], nous appliquons notre démarche de diagnostic dans le cadre plus général des systèmes hybrides à dynamique continue non-linéaire.

Les sections suivantes rappellent l'ensemble de notre approche.

## 6.2 Modèle d'un système hybride et défaillances

L'évolution dynamique d'un système hybride peut être décrite par une succession de modes. Chaque mode  $i$  ( $i \in \mathcal{M}$ ;  $\mathcal{M}=\{1, 2, \dots, m\}$ , où  $m$  est le nombre de modes) correspond à une configuration physique possible.

### 6.2.1 Modèle de bon fonctionnement

**Définition 7** *Un système hybride est formellement modélisé par les 8 éléments suivants :*

$$\langle Q, X, G, F, Y, H, \sigma_s, \sigma_c \rangle$$

où

- $Q$  est l'ensemble de modalités que peut prendre le vecteur d'état discret  $q$ ,  $Q = \{q_i : i \in \mathcal{M}\}$  et  $q_0$  est l'état discret initial.

- $X = \bigcup_{i \in \mathcal{M}} X_i$  définit l'espace d'état continu.  $X_i$  représente l'espace d'état atteignable dans le mode  $i$ .  $x_i(t) \in X_i$  ( $\dim[x_i(t)] = n_i$ ) est le vecteur d'état continu à l'instant  $t$ . Le domaine  $X_i$  est décrit par un ensemble de contraintes inégalité  $g_i : g_i(x_i(t)) \leq 0$ .

$G$  représente l'ensemble de toutes les contraintes inégalité.

Le couple  $(q_i(t), x_i(t)) \in Q \times X$  représente l'état complet du système dans le mode  $i$ .

- $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  est un ensemble fini de fonctions lisses. Chaque fonction définit une trajectoire du vecteur d'état continu  $x_i(t)$ .

$\dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t))$  où  $u_i(t) \in R^{p_i}$  est un vecteur d'entrée (commande continue) supposé connu,  $d_i(t) \in R^{d_i}$  est un vecteur d'entrées inconnues (ou de perturbations).

- $Y = \bigcup_{i \in \mathcal{M}} Y_i$  définit l'espace des sorties.  $Y_i \subseteq R^{n_i}$  dénote l'espace de sortie associé au mode  $i$ .  $y_i(t) \in Y_i$  est le vecteur des sorties mesurées à l'instant  $t$ .

- $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$  est un ensemble fini de fonctions vectorielles qui décrit le lien entre les variables d'état et les variables mesurées  $y_i = h_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t))$ .

- $\sigma_s = \{\sigma_s^{ij}\}$ , où  $\sigma_s^{ij}$  est une application :  $Q \times X \times \mathcal{T} \rightarrow Q \times X$  qui définit une transition spontanée :  $\sigma_s^{ij}(q_i, x_i, t) = (q_j, x_j^0)$ , ( $q_i$  et  $q_j \in Q$ ;  $x_i \in X_i$  and  $x_j^0 \in X_j$ ). Une transition d'un

mode  $i$  vers un mode  $j$  (appelé mode successeur) se produit lorsque la trajectoire d'état continue  $x_i(t)$  intersecte une surface :  $S_{ij} = \{x_i \in X_i \text{ t.q. } s_{ij}(x_i) = 0\}$  où  $s_{ij}(x)$  représente la condition de transition.

- $\sigma_f = \{\sigma_f^{ij}\}$ , où  $\sigma_f^{ij}$  est une application :  $Q \times E \rightarrow Q \times X$  qui définit une transition contrôlée :  $\sigma_f(q_i, e_{ij}) = (q_j, x_j^0)$  où  $e_{ij} \in E$  est un événement externe contrôlé.

Dans nos travaux nous avons choisi d'utiliser le formalisme des automates hybrides pour représenter le comportement des SDH. Cet outil résulte de la combinaison d'un automate à état fini avec des équations d'état continues. Dans cette représentation les arcs orientés sont étiquetés par les conditions de transition (spontanée ou contrôlée). Chaque place correspond à un mode. Dans chacune des places, les équations différentielles et algébriques qui contraignent l'évolution de l'état continu dans ce mode ainsi que le domaine (contraintes inégalité) associé au mode sont indiqués. Il existe bien entendu d'autres possibilités de représentations des SdH : Réseaux de Pétri ou modélisations de type MLD : Mixed Logic and Dynamic par exemple, qui présentent, tout comme les automates hybrides, certains avantages et inconvénients dans le contexte du diagnostic des défaillances. Ces autres modélisations sont étudiées par les partenaires de l'AS193 "Diagnostic des SDH".

## 6.2.2 Description et caractérisation des défaillances

Comme nous l'avons spécifié dans le chapitre introductif (chap. 4), un système est dit défaillant lorsque son comportement réel ne correspond pas au modèle de bon fonctionnement. Plusieurs sortes de défaillances peuvent se produire sur un système hybride. En effet, les défaillances peuvent affecter soit l'évolution de l'état continu dans un mode, soit l'évolution discrète c'est à dire la séquence d'états discrets.

### Défaillances affectant le comportement du système dans un mode

Un mode est entièrement défini par :

- Un ensemble de contraintes égalité (équations différentielles ou algébriques)
- Un domaine défini par un ensemble de contraintes inégalité.
- Une modalité de l'état discret, c'est à dire une configuration physique du système.

Une défaillance se produisant dans un mode peut affecter une de ces trois entités.

### Défaillances affectant l'évolution discrète

L'évolution discrète du système correspond à un chemin (ou trajectoire) dans l'automate hybride, c'est à dire à une succession de places dans un ordre déterminé lorsque le système

est en bon fonctionnement. Toute évolution dans l'automate non conforme au comportement normal est considérée comme une défaillance. Trois types de défaillances peuvent être considérées :

**a) Transition vers un mode non successeur** Si le système fonctionne correctement, seul un sous ensemble  $\Sigma(i)$  de modes (appelés successeurs) sont accessibles à partir d'un mode  $i$ . Une transition du mode  $i$  vers un mode n'appartenant pas à  $\Sigma(i)$  est donc une défaillance.

**b) Non transition** Ce type de défaillance se produit lorsque le système reste dans le mode courant alors que la condition de transition est vérifiée et que le système devrait normalement changer de mode.

**c) Transition anormale vers un mode successeur** Ce type de défaillance se produit lorsque le système passe d'un mode  $i$  vers un successeur potentiel  $j$  alors que la condition normale de transition n'est pas vérifiée.

Ces trois types de défaillances peuvent être détectées en comparant l'évolution de l'état discret du système en fonctionnement avec l'évolution prévue si le système se comporte normalement. Ceci revient à comparer les trajectoires réelles et théoriques dans l'automate hybride. Si le seul objectif est de détecter les comportements anormaux, seuls les modes accessibles en fonctionnement normal sont considérés. Si le mode courant ne fait pas partie de l'ensemble de modes normaux accessibles, le système est déclaré défaillant. Par contre, si l'on veut caractériser voire diagnostiquer complètement (identifier la cause) les défaillances, il est nécessaire de considérer toutes les configurations (atteignables ou non en fonctionnement normal) du système, c'est à dire toutes les modalités que peut prendre l'état discret. Ceci entraîne bien évidemment une explosion du nombre de modes, mais le diagnostic des défaillances est à ce prix! Des solutions intermédiaires (utilisation d'un mode correspondant à plusieurs types de défaillances) peuvent être envisagées afin de réduire le nombre de modes à considérer. Cependant ces solutions ne permettront pas d'atteindre la même finesse de diagnostic.

## 6.3 Utilisation des résidus pour la surveillance des systèmes hybrides

**Hypothèse 6.3.1** *Nous supposons que la dynamique discrète est "lente", c'est à dire que le système reste présent dans chaque mode suffisamment longtemps pour permettre de prendre une décision. Le temps entre deux transitions est donc supposé largement supérieur à la taille de la fenêtre de décision.*

**Hypothèse 6.3.2** *Nous supposons aussi que les changements d'état discret sont instantanés.*

Les résidus sont des indicateurs de cohérence des signaux prélevés en ligne sur le système avec un modèle. Classiquement ces résidus sont utilisés pour détecter des défaillances. Dans le

cadre des systèmes hybrides, ces résidus peuvent, en plus, être utilisés pour identifier le mode courant. Cette identification peut être réalisée sans ambiguïté si les modes sont discernables.

### 6.3.1 Discernabilité entre modes

**Définition 8** Deux modes  $i$  et  $j$  sont non discernables si et seulement si le couple de signaux réels  $(u_r(t), y_r(t))$ , prélevés en ligne sur le système, peut provenir indifféremment du mode  $i$  ou du mode  $j$ . On dit aussi que le couple  $(u_r(t), y_r(t))$  est consistant avec les deux modèles d'états définissant les modes  $i$  et  $j$ .

Les résidus étant des indicateurs de consistance, ils permettent donc de caractériser la discernabilité.

Soit  $w_{ci}$  et  $w_{cj}$  deux formes de calcul de résidus obtenues à partir des équations d'état des modes respectifs  $i$  et  $j$ . Ces formes de calcul s'écrivent :

$$w_{ci}(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) \quad (6.1)$$

et

$$w_{cj}(\bar{y}_j^{\bar{s}_j}, \bar{u}_j^{\bar{s}_j}) \quad (6.2)$$

**Théorème 6.1** Les deux modes  $i$  et  $j$  sont non discernables si et seulement si,  $w_{ci}$  et  $w_{cj}$  sont identiquement nuls lorsque :

- les vecteurs  $\bar{y}_i^{\bar{s}_i}$  et  $\bar{u}_i^{\bar{s}_i}$  sont remplacés respectivement par l'expression de  $\bar{y}_j^{\bar{s}_j}$  (donnée par (5.3)) et  $\bar{u}_j^{\bar{s}_j}$  dans l'expression de  $w_{ci}$
- les vecteurs  $\bar{y}_j^{\bar{s}_j}$  et  $\bar{u}_j^{\bar{s}_j}$  sont remplacés respectivement par l'expression de  $\bar{y}_i^{\bar{s}_i}$  (donnée par (5.3)) et  $\bar{u}_i^{\bar{s}_i}$  dans l'expression de  $w_{cj}$

Lorsque les équations d'état sont linéaires, nous avons montré dans [CI\_03\_2] que deux modes sont non discernables en l'absence de perturbation et de défaillance si et seulement si la condition suivante est vérifiée :

$$\text{rang}[OBS_i] = \text{rang}[OBS_j] = \text{rang}[OBS_i \quad OBS_j \quad \Delta_{ij}] \quad (6.3)$$

### 6.3.2 Surveillance des défaillances survenant dans un mode

Lorsque le système se trouve dans un mode donné  $i$ , deux types de défaillances peuvent se produire :

- les défaillances affectant les équations d'état du mode

- les défaillances affectant les contraintes inégalités

Les résidus structurés issus des relations de redondance analytiques sont parfaitement adaptés à la détection et à la localisation des défaillances affectant les équations d'état. Les contraintes inégalité définissent un domaine d'admissibilité de l'état dans le mode  $i$ . Elles s'expriment par :

$$g_i(x_i(t)) \leq 0 \quad (6.4)$$

Dans (Staroswiecki and Guerchouh, 1999) et (Guerchouh and Staroswiecki, 1999), la méthode de l'espace de parité a été étendue pour surveiller ce type de contraintes dans le cas linéaire. Le principe de cette approche peut être généralisé au cas non linéaire. En fait, sous l'hypothèse que la fonction  $g_i(x_i(t))$  est observable, il est possible de transformer ces contraintes inégalité en d'autres contraintes inégalités équivalentes dans lesquelles seules les variables connues (entrées et sorties mesurées du système) interviennent. On obtient ainsi le système d'inégalités :

$$\Upsilon_i(\bar{y}_i^s, \bar{u}_i^s) \leq 0 \quad (6.5)$$

Les fonctions  $\Upsilon_{ik}$  sont calculables en ligne. Une défaillance sera détectée si l'évaluation d'une fonction  $\Upsilon_{ik}$  fournit un résultat positif.

**Remarque 6.3.1** *Il n'existe pas de méthode, à notre connaissance, permettant d'obtenir le système 6.5 à partir des équations du modèle, c'est à dire de méthode d'élimination formelle de variables dans un système constitué d'équations et d'inéquations. Ceci constitue une perspective de recherche.*

### 6.3.3 Surveillance des défaillances influençant la dynamique discrète

Supposons que pour chaque mode  $i \in M$  un vecteur de résidus structuré par rapport à chacune des défaillances peut être obtenu. Dans le cas où cette structuration n'est pas possible le raisonnement qui suit s'applique pour des sous-ensembles de défaillance et non pour chaque défaillance prise séparément.

En l'absence de défaillance et de perturbations, les résidus calculés à partir du modèle correspondant au mode courant sont nuls. Les autres résidus sont différents de zéro sous l'hypothèse que les modes soient discernables. Quand une défaillance  $\varphi_k$  se produit dans le mode courant, seuls les résidus du mode correspondant, robustes à cette défaillance, sont nuls.

Sous l'hypothèse que les modes soient tous discernables, les résidus structurés permettent donc d'identifier le mode courant défaillant ou non, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser une instrumentation (capteurs) spécifique.

Lorsqu'une transition d'un mode  $i$  vers un mode  $j$  survient, tous les résidus seront potentiellement différents de zéro pendant une courte période puisque les entrées et sorties prélevées sur le système ne vont pas tous appartenir au même mode sur la fenêtre de calcul des résidus. Il

est possible de tenir compte de ceci en calculant des résidus "mixtes" (Kratz and Aubry, 2003) et en adaptant la procédure de décision comme nous l'avons proposé dans [CI\_03\_2].

Une transition peut être contrôlée ou spontanée. Supposons que grâce aux résidus une transition soit détectée en ligne. Les raisons de cette transition doivent être analysées afin de déterminer si elle est la conséquence d'une défaillance ou non. Le problème se pose pour les transitions spontanées dont l'instant d'occurrence n'est a priori pas connu. Une transition spontanée d'un mode  $i$  vers un mode  $j$  a lieu lorsque l'état intersecte une surface  $S_{ij} = \{x_i \in X_i \text{ t.q. } s_{ij}(x_i) = 0\}$ . Un ensemble supplémentaire de résidu peut être généré afin de surveiller ces contraintes égalité. Comme pour la surveillance des contraintes inégalités, il est possible d'intégrer les contraintes  $s_{ij}$  dans la procédure d'élimination de l'état et obtenir ainsi des relations de transition indépendantes de l'état. Le système d'équation  $s_{ij}(x_i) = 0$  est ainsi transformé de manière équivalente en

$$\Lambda_{ij}(\bar{y}_i^{\bar{s}_{ij}}, \bar{u}_i^{\bar{s}_{ij}}) = 0 \quad (6.6)$$

Ces relations ne seront théoriquement vérifiées qu'à l'instant exact où une transition a lieu. Il est donc en pratique et dans un environnement non déterministe très peu probable qu'elles seront exactement vérifiées. Cependant, dans certains cas, le calcul et le suivi en ligne de ces relations peuvent permettre de faire la différence entre une transition spontanée normale et une défaillance ayant le même effet.

En résumé, trois quantités, calculables en ligne permettent de surveiller les défaillances de nature continue et de nature discrète : Les résidus (structurés) issus des RRA permettent de surveiller les contraintes égalité. Les fonctions  $\Upsilon_i$  permettent de surveiller les contraintes inégalité et les fonctions  $\Lambda_{ij}$  permettent une surveillance des transitions.

## 6.4 Exemple d'illustration

### 6.4.1 Description et modélisation du système

A titre d'illustration de la méthode de surveillance proposée, nous avons pris l'exemple du système hydraulique décrit par la figure 1. Ce système constitue le "benchmark" de l'AS 193 "Diagnostic des Systèmes Hybrides". Il est constitué de

- 2 réservoirs  $R_1$  et  $R_2$ , de section  $S_1 = S_2 = 0.0154m^2$  reliés par les conduites  $C_2$  et  $C_3$ .  
La conduite  $C_2$  est équipée de la vanne  $V_2$ ,
- 2 vannes  $V_1$  et  $V_4$  permettant l'évacuation du liquide pour l'utilisation,
- 1 pompe P de débit  $Q_p$ ,

- 3 capteurs: 2 capteurs de débits mesurant  $Q_p$  et  $Q_1$  (débit au travers de  $V_1$ ) et un capteur de niveau mesurant  $h_2$  la hauteur de liquide dans le réservoir  $R_2$

**Remarque 6.4.1** Afin de simplifier l'étude, nous avons considéré que les vannes  $V_1$  et  $V_2$  sont maintenues constamment ouvertes.

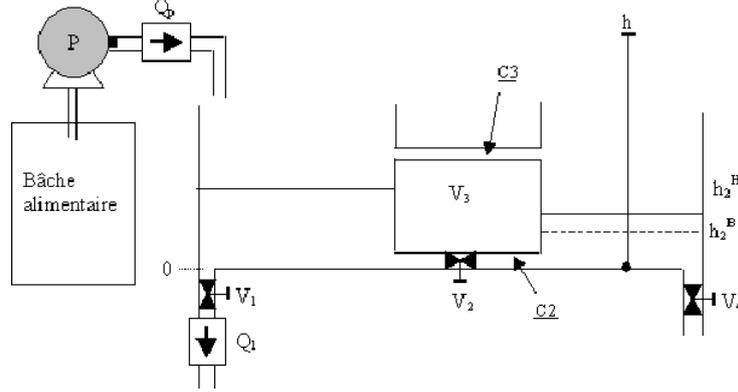


FIG. 6.1: Description du système hydraulique

La pompe est commandée en tout ou rien de manière à maintenir  $h_2$  dans un intervalle fixé. La pompe est mise en route lorsque  $h_2 = h_2^H = 0.2m$ , la pompe est arrêtée lorsque  $h_2 = h_2^B = 0.1m$ . Le débit de la pompe étant mesuré, l'état de la pompe (marche ou arrêt) n'est pas considéré par la suite. Lorsque la pompe est à l'arrêt, le débit est nul ( $Q_p = 0$ ), lorsqu'elle fonctionne  $Q_p = Q_0 = 0.001m^3/s$ .

La vanne  $V_4$  est manuelle. Elle peut être ouverte ou fermée à tout instant par l'utilisateur. Seuls 2 états discrets sont considérés : l'état de la conduite  $C_3$  qui peut prendre les modalités Vide (V) ou Pleine (P), et l'état de la vanne  $V_4$  qui peut prendre les modalités Ouverte (O) ou Fermée (F). 4 modes permettent donc de caractériser le comportement du système. Chacun d'entre eux est caractérisé par une modalité de l'état discret (état conduite  $C_3$ , état vanne  $V_4$ ), des équations d'état et des contraintes inégalités.

L'automate hybride représentant le système en fonctionnement normal est donné par la figure 2. Les débits  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  et  $Q_4$  sont donnés par :

$$Q_1 = A_1 \sqrt{2g} \sqrt{h_1} \quad (6.7)$$

$$Q_2 = A_2 \sqrt{2g} \sqrt{|h_1 - h_2|} \quad (6.8)$$

$$Q_3 = A_3 \sqrt{2g} \sqrt{|h_1 - 0.5|} \quad (6.9)$$

$$Q_4 = A_4 \sqrt{2g} \sqrt{h_2} \quad (6.10)$$

$$\text{avec } A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 3.6e - 5m^2 \quad (6.11)$$

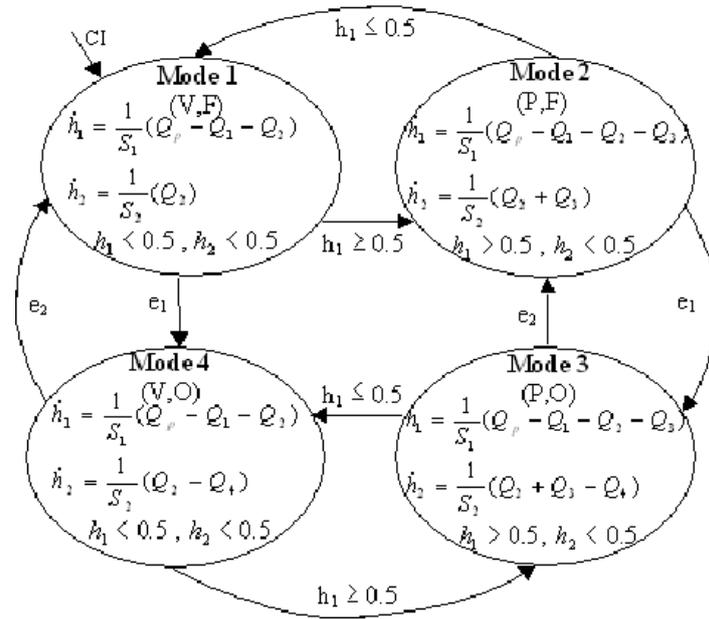
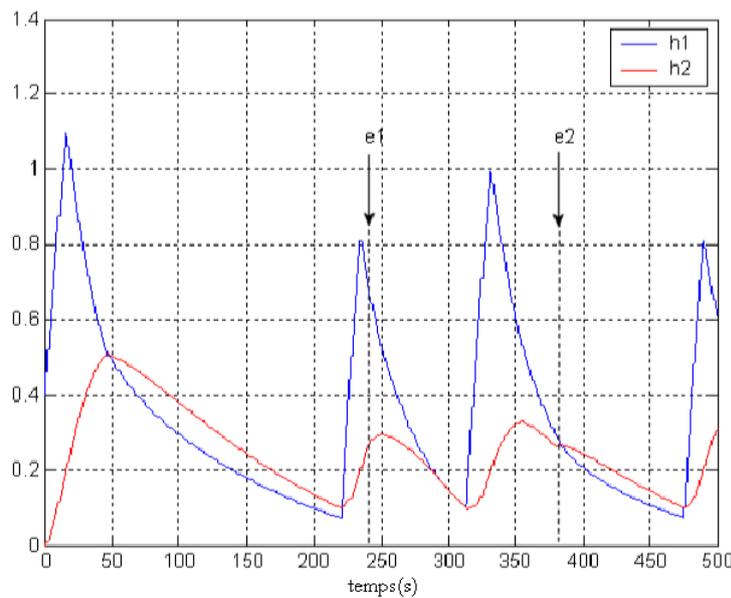


FIG. 6.2: Automate hybride

La commande tout ou rien de la pompe n'est pas considérée ici. Le débit  $Q_p$  est mesuré. Les niveaux  $h_1$  et  $h_2$  simulés sont donnés par la figure 3. En réalité, seul  $h_2$  est mesuré. L'évolution des modes est donnée par la figure 4.

FIG. 6.3: Simulation des niveaux  $h_1$  et  $h_2$  lors d'un fonctionnement normal

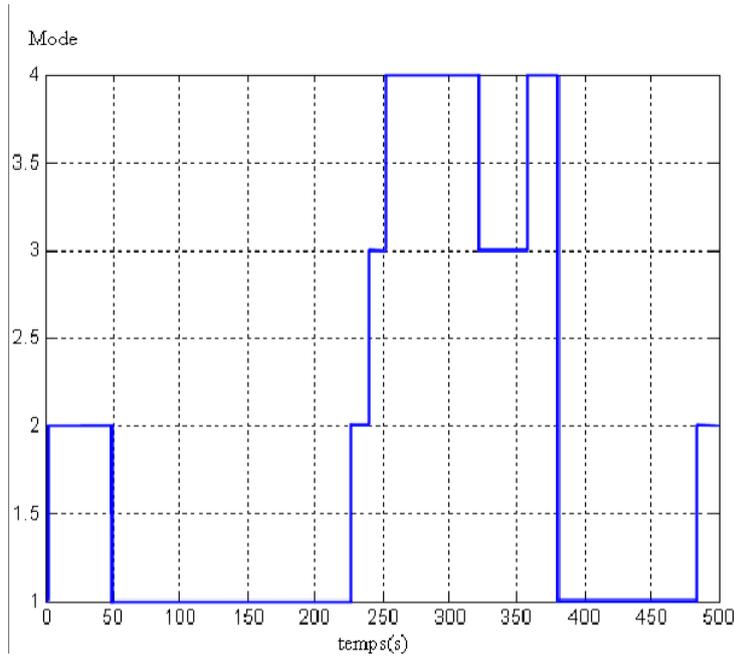


FIG. 6.4: Evolution des modes, cas non défaillant

### 6.4.2 Les défaillances considérées

8 défaillances peuvent être considérées afin d'illustrer les différentes défaillances pouvant survenir sur un SdH. Cette liste n'est pas exhaustive. D'autres défaillances peuvent être considérées sur ce système.

1. Le capteur  $Q_1$  est défaillant (biais),
2. Le capteur  $h_2$  est défaillant (biais),
3. Le réservoir  $R_1$  présente une fuite,
4. Le réservoir  $R_2$  présente une fuite,
5. La conduite  $C_3$  est bouchée complètement,
6. La vanne  $V_4$  reste bloquée fermée lorsque l'événement  $e_1$  se produit,
7. La vanne  $V_4$  reste bloquée ouverte lorsque l'événement  $e_2$  se produit,
8. La vanne  $V_4$  change d'état alors qu'aucun événement ( $e_1$  ou  $e_2$ ) ne s'est produit.

Les quatre premières défaillances vont perturber les équations d'état et de mesure du mode courant. La cinquième défaillance empêchera la transition du mode 1 vers le mode 2 (ou du mode 4 vers le mode 3), les deux défaillances suivantes empêcheront les transitions des modes 1 et 2 vers respectivement les modes 4 et 3 (et inversement). La dernière défaillance va conduire

à un changement de mode incorrect. Ces 8 défaillances permettent donc d'illustrer tous les types de défaillances (continues et discrètes) décrites dans la section précédente.

**Remarque 6.4.2** *Nous avons considéré ici que les défaillances des vannes sont de type "discrètes" et qu'une défaillance correspond à une des deux modalités de l'état discret "normal" de la vanne. D'autres défaillances pourraient être considérées : vanne partiellement ouverte ou dynamique lente à l'ouverture ou à la fermeture. La prise en compte de ces défaillances est possible mais nécessiterait de compléter le modèle en ajoutant soit des états discrets supplémentaires (donc des modes), soit des paramètres (et équations d'états) supplémentaires.*

### 6.4.3 Relations de Redondance Analytique et surveillance

2 RRA indépendantes peuvent être générées pour chaque mode. Celles-ci donnent les formes de calcul de deux résidus  $r_{i1}$  et  $r_{i2}$ . Les expressions des RRA sont omises pour ne pas alourdir la rédaction.

Pour chaque mode, les 2 résidus  $r_{i1}$  et  $r_{i2}$  peuvent être combinés entre eux de manière à être sensibles (ou robustes) aux défaillances capteurs  $Q_1$  et  $h_2$ . On notera  $r_i(Q_1, \overline{h_2})$  le résidu du mode  $i$  sensible à  $Q_1$  et robuste à  $h_2$  et  $r_i(\overline{Q_1}, h_2)$  le résidu du mode  $i$  sensible à  $h_2$  et robuste à  $Q_1$ . Une fuite  $\phi_1$  du réservoir  $R_1$  ou  $\phi_2$  du réservoir  $R_2$  se traduit par une modification d'une des 2 équations d'état du mode. En combinant les deux résidus  $r_{i1}$  et  $r_{i2}$ , il est possible d'obtenir  $r_i(\phi_1, \overline{\phi_2})$  et  $r_i(\overline{\phi_1}, \phi_2)$  2 résidus sensibles respectivement à  $\phi_1$  et  $\phi_2$ , et robustes resp. à  $\phi_2$  et  $\phi_1$ .

Les quatre résidus  $r_i(Q_1, \overline{h_2})$ ,  $r_i(\overline{Q_1}, h_2)$ ,  $r_i(\overline{\phi_1}, \phi_2)$  et  $r_i(\phi_1, \overline{\phi_2})$  constituent, pour chaque mode  $i$  un ensemble de résidus structurés par rapport aux défaillances considérées qui affectent les équations d'état continues. Celles-ci peuvent donc être détectées et localisées. De plus, avec les paramètres choisis (sections des réservoirs et des conduites), tous les modes sont discernables entre-eux, ce qui permet d'identifier sans ambiguïté le mode courant. Grâce aux 4 résidus, les défaillances 6, 7, et 8 peuvent être détectées :

- Défaillances 6. L'événement  $e_1$  est contrôlé. Il se produit à l'instant  $t = 240s$ . Si cet événement n'a aucun effet sur l'évolution de l'état discret (la vanne  $V_4$  reste bloquée ouverte), le système va rester dans le mode 2. Cette situation sera déterminée car tous les résidus du mode 2 seront nuls alors que tous les résidus des autres modes seront différents de 0.
- Défaillance 7. L'événement  $e_2$  est contrôlé. Il se produit à l'instant  $t = 380s$ . Si cet événement n'a aucun effet sur l'évolution de l'état discret (la vanne  $V_4$  reste bloquée fermée), le système va rester dans le mode 4. Cette situation sera déterminée car tous les résidus du mode 4 seront nuls alors que tous les résidus des autres modes seront différents de 0.

- Défaillance 8. Supposons que la vanne  $V_4$  s'ouvre à l'instant  $t = 100s$  alors que l'ouverture n'a pas été demandée (événement  $e_1$ ). Le système, initialement dans le mode 1, va transiter vers le mode 4. Cette transition incorrecte est détectée car tous les résidus du mode 4 deviendront nuls alors que les résidus du mode 1 deviendront différents de 0

En complément à ces 4 résidus, les contraintes inégalités peuvent être testées en ligne pour chacun des modes. En effet,  $h_2$  est mesuré donc peut être testé par rapport à 0.5. De plus on a

$$h_1 = \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} \quad (6.12)$$

ce qui permet de tester le domaine d'appartenance de  $h_1$ . Grâce à ces tests supplémentaires, la défaillance n°5 peut être détectée. En effet, si la conduite  $C_3$  est bouchée complètement (par exemple dès la mise en route du système), le système va rester dans le mode 1 alors que le niveau dans le réservoir  $h_1$  devient supérieur à  $0.5m$ . Cette non transition sera détectée car la quantité  $\frac{Q_1^2}{2gA_1^2}$  deviendra supérieure à 0.5.

## 6.5 Conclusions et perspectives

Notre travail a mis en évidence certaines notions qui nécessiteront d'être approfondies ou complétées. En particulier, les points suivants devront être étudiés :

- Afin d'identifier sans ambiguïté le mode courant, la propriété de discernabilité des modes doit être vérifiée. Des conditions nécessaires et suffisantes de discernabilité ont été établies dans le cas des SDH linéaires ([CI\_04\_1]). L'extension au cas non linéaire n'est pas triviale. De plus, plusieurs types de *discernabilité* peuvent être considérés. En effet, une défaillance (ou une perturbation) survenant dans un mode peut le rendre non discernable d'un autre alors que les deux modes l'étaient en fonctionnement normal.
- La surveillance des contraintes inégalité est un problème difficile qui nécessite de développer des méthodes d'élimination de variables dans un système constitué d'égalités et d'inégalités. Dans le cas non linéaire, aucune solution effective n'existe actuellement.
- Nous avons choisi dans nos travaux de modéliser le comportement des systèmes hybrides par des automates hybrides. L'inconvénient de cette modélisation vient de l'explosion combinatoire du nombre de modes lorsque le nombre d'états discrets augmente. Il existe d'autres modèles qui peuvent dans certains cas être mieux adaptés au système considéré.

# Chapitre 7

## Analyse structurelle pour la surveillance

### 7.1 Concepts fondamentaux

#### Introduction

L'analyse structurelle est un outil puissant qui permet de déterminer de nombreuses propriétés d'un système. Ces propriétés sont obtenues à partir de la seule connaissance de l'existence de liens (contraintes) entre variables sans que les valeurs des paramètres soient nécessaires. Ce pré-traitement, qui peut être entièrement automatisé de manière efficace même pour les très grands systèmes, permet par exemple de connaître les conditions structurelles d'observabilité ou de comandabilité (Blanke *et al.*, 2003), (Staroswiecki, 2002), les possibilités de détection et de localisation des défaillances (Declerck, 1991; Staroswiecki *et al.*, 2000; Pulido and Alonso, 2000; Krysander and Nyberg, 2002) ou d'étudier la reconfigurabilité du système en cas de perte de composants (Hoblos, 2001; Gehin *et al.*, 2000; Assas, 2002). Cette analyse est effectuée lors de la phase de conception et permet de déterminer le nombre et la place des capteurs à implanter afin de respecter le cahier des charges de surveillance (Maquin *et al.*, 1997; Carpentier, 1998; Travé-Massuyès *et al.*, 2001; Narasimhan and Jordache, 1999; Bagajewicz, 2000). Pour toutes les propriétés structurelles étudiées, les conditions obtenues sont nécessaires mais en général non suffisantes car elles sont indépendantes de la valeur réelle des paramètres.

#### 7.1.1 Modélisation structurelle

Un système automatisé est constitué d'un ensemble de composants qui interagissent entre eux afin de réaliser la (les) fonction(s) pour laquelle (lesquelles) le système est conçu. Le fonctionnement de chaque composant peut être décrit par un ensemble d'équations dynamiques et

algébriques, linéaires ou non linéaires, qui définissent - contraignent - la trajectoire temporelle d'un ensemble de variables.

Classiquement, deux types de variables apparaissent dans un modèle de bon fonctionnement :

- les variables connues : mesures, consignes, commandes.
- les variables inconnues : variables internes non mesurées, entrées inconnues, perturbations.

Le modèle structurel ne considère que l'existence de liens entre les variables. Il s'agit donc d'une représentation relativement pauvre d'un système puisque ce modèle fait abstraction de la nature des contraintes et de la valeur réelle des paramètres. L'analyse structurelle s'intéresse aux propriétés concernant uniquement la structure du système. Les propriétés obtenues sont donc valides quelle que soit la nature des équations et la valeur des paramètres.

Soit  $C$  l'ensemble des contraintes et  $Z$  l'ensemble des variables. Le modèle structurel est un graphe biparti  $G$ , dont les sommets sont les éléments de  $C \cup Z$ . Une arête relie un élément  $c_i$  de  $C$  et un élément  $z_j$  de  $Z$ , lorsque la variable  $z_j$  est contrainte par la relation  $c_i$ . Soit  $(c_i, z_j)$  une arête du graphe, on dira que  $c_i$  et  $z_j$  sont adjacentes. Aucune orientation du graphe n'est considérée a priori.

La matrice d'adjacence correspondant au graphe  $G$  est une matrice booléenne où chaque ligne correspond à une équation et chaque colonne à une variable. Un 1 à la position  $(i, j)$  indique que la variable  $j$  apparaît dans l'équation  $i$ , c'est-à-dire qu'il existe une arête reliant la contrainte  $c_i$  et la variable  $z_j$ . Les représentations graphiques et matricielles du système sont totalement équivalentes.

### 7.1.2 Prise en compte des dérivées

Les modèles dynamiques font intervenir des variables qui apparaissent sous forme dérivée. Dans la littérature, deux manières sont utilisées pour représenter ces dérivées dans les modèles structurels :

1. La variable  $x$  et sa dérivée  $\dot{x}$  sont représentées par la même variable. Les équations dynamiques sont alors traitées comme des équations statiques (Declercq, 1991).
2. Les variables  $x$  et  $\dot{x}$  sont considérées comme des variables différentes. Afin d'étudier l'observabilité structurelle, des relations de différentiation  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$  sont ajoutées au modèle (Blanke *et al.*, 2003).

### 7.1.3 Calculabilité

Bien que l'on soit dans un cadre structurel, il se peut que l'on ait une connaissance supplémentaire sur la calculabilité de certaines variables. Par exemple, dans l'équation  $\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt}$ , si on connaît  $x_1$  on peut calculer  $\dot{x}_1$  mais le contraire n'est pas vrai si on ne connaît pas la condition initiale sur  $x_1$ . Le même problème existe pour toutes les fonctions non inversibles.

**Définition 9 (Calculabilité)** *Soit une contrainte  $c_i : f(\dots, x_p, \dots) = 0$ . La variable  $x_p$  est calculable s'il est possible de déterminer sa valeur à partir de la contrainte  $c_i$  connaissant les valeurs des autres variables.*

Cette notion de calculabilité permet d'intégrer dans le traitement structurel le fait que certaines activités ont un comportement non inversible (e.g. non linéaire, hystérésis).

On représentera par un triangle ( $\Delta$ ) les variables non calculables dans la matrice d'adjacence.

### 7.1.4 Analyse structurelle

L'analyse du modèle structurel, ou analyse structurelle, a été largement utilisée afin de déterminer les propriétés du système relatives à la détection et à la localisation des défaillances. Ces travaux ont donné lieu à de nombreuses publications : (Declerck, 1991; Staroswiecki *et al.*, 2000; Blanke *et al.*, 2003; Pulido and Alonso, 2000; Krysander and Nyberg, 2002; Ragot *et al.*, 1993; Commault *et al.*, 1997). Dans cette section, je rappelle très brièvement le principe de l'analyse structurelle pour la surveillance.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 5, la génération des résidus issus des Relations de Redondance Analytique est un problème général d'élimination de variables dans un système d'équation. L'analyse structurelle permet de déterminer le sous-système pour lequel cette élimination est a priori possible. L'outil qui permet de réaliser cette étape de l'analyse structurelle s'appelle la décomposition de Dulmage-Mendelsohn.

La décomposition de Dulmage-Mendelsohn (Dulmage and Mendelshon, 1958), notée DM-décomposition est le point de départ de l'analyse structurelle. La DM-décomposition peut être obtenue en appliquant des algorithmes classiques de la théorie des graphes (Dulmage and Mendelshon, 1958; Berge, 1973; Murota, 1987). Ceux-ci consistent à permuter les colonnes et les lignes de la matrice d'adjacence représentant le graphe afin d'obtenir une représentation bloc triangulaire inférieur. Il a été prouvé (Dulmage and Mendelshon, 1958) que tout graphe se décompose en trois composantes canoniques que l'on appellera respectivement  $S^+$ ,  $S^0$  et  $S^-$ .

Puisque le but de l'analyse structurelle est de trouver les sous-systèmes pour lesquels il est possible d'éliminer les variables inconnues, seules les variables inconnues et les contraintes

associées sont considérées pour effectuer la DM-décomposition. Après permutation des lignes et colonnes, on obtient la structure de la figure 7.1.

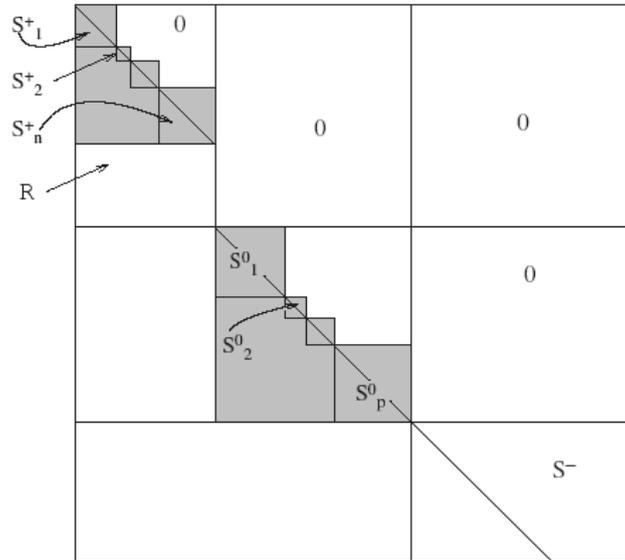


FIG. 7.1: DM-décomposition

Les trois composantes obtenues sont interprétées de la manière suivante :

- $S^+$  : C'est le sous-système  $S_1^+ \cup S_2^+ \cup \dots \cup S_n^+ \cup R$ . Le nombre d'équations étant supérieur au nombre de variables, ce sous-système est dit *sur-déterminé* (ou *sur-contraint*). Le surplus d'équations est redondant (partie hachurée dans la figure (7.1)).
- $S^0$  : C'est le sous-système  $S_1^0 \cup S_2^0 \cup \dots \cup S_p^0$ . Le nombre d'équations étant égal au nombre de variables, ce sous-système d'équations est dit *juste-déterminé* (ou *juste-contraint*). Ce sous-système a un nombre fini de solutions. Il peut être résolu indépendamment des variables de  $S^-$ , une fois que  $S^+$  est résolu.
- $S^-$  : Le nombre d'équations étant inférieur au nombre de variables, ce sous-système est dit *sous-déterminé* (*sous-contraint*). Ce sous-système ne peut être résolu, même si les variables de  $S^+$  et  $S^0$  ont été calculées.

La partie sur-déterminée ( $S^+$ ) définit la partie surveillable du système (Staroswiecki et al., 2000).

Les blocs  $S_1^+, S_2^+, \dots, S_n^+$  et  $S_1^0, S_2^0, \dots, S_p^0$  sont appelés *composantes de Hall* (Hall, 1935).  $S_1^0, S_2^0, \dots, S_p^0$  sont les sous-blocs connexes de  $S^0$  (un graphe est connexe si et seulement si il existe un chemin entre chaque paire de sommets).  $S_1^+, S_2^+, \dots, S_n^+$  sont les sous-blocs connexes

de  $S_1^+ \cup S_2^+ \cup \dots \cup S_n^+$ . Ces composantes représentent les sous-ensembles de variables mutuellement dépendantes, c'est-à-dire les sous-systèmes d'équations qu'il faut résoudre en même temps. Par ailleurs, ces blocs sont ordonnés entre eux selon un ordre topologique, en d'autres termes un ordre compatible avec les dépendances du graphe, qui nous permet de connaître l'ordre de résolution du système global : la résolution de  $S^+$  nécessite la résolution successive de  $S_1^+, \dots, S_n^+$ , les équations de chacun des sous-ensembles devant être résolues simultanément.

La décomposition en composantes de Hall est unique pour  $S^0$  mais ne l'est pas pour  $S^+$ . Les différentes décompositions de  $S^+$  en composantes de Hall sont obtenues en utilisant des couplages différents.

**Définition 10 (Couplage)** *Un couplage sur le graphe biparti est un ensemble d'arêtes indépendantes c'est-à-dire n'ayant pas de sommet en commun. Le cardinal d'un couplage est le nombre d'arêtes sélectionnées dans le graphe.*

**Définition 11 (Couplage maximal)** *Un couplage sur un graphe est dit maximal s'il n'est pas possible de construire un autre couplage de cardinal supérieur sur ce même graphe.*

**Définition 12 (Couplage complet)** *Un couplage est dit complet sur les variables lorsque toutes les variables sont couplées. Il est dit complet sur les contraintes lorsque toutes les contraintes sont couplées.*

Le couplage d'une variable à une contrainte induit une relation de causalité (en terme de calcul) entre cette variable et la contrainte. En d'autres termes, un couplage  $(c_i, x_j)$  signifie que la variable  $x_j$  est calculée à partir de la contrainte  $c_i$ . Un couplage sur le graphe implique une orientation des arêtes de la manière suivante :

- pour toutes arêtes  $(c_i, z_j)$  où  $c_i$  n'est pas couplé, l'orientation est  $z_j \rightarrow c_i$ .
- pour toutes arêtes  $(c_i, z_j)$  où  $c_i$  est couplé, si  $z_j$  est couplé à  $c_i$  l'orientation est  $c_i \rightarrow z_j$ , sinon elle est  $z_j \rightarrow c_i$ .

Il se peut qu'un couplage induise des cycles dans le graphe orienté. Un cycle est un ensemble de variables mutuellement dépendantes (ou de manière équivalente un ensemble de contraintes à résoudre simultanément). Cela correspond aux composantes de Hall de dimension supérieure à 1.

Il existe deux sortes de cycles qui ont des propriétés très différentes : les cycles algébriques et les cycles différentiels. Les cycles algébriques sont formés de contraintes algébriques seulement. Il est donc possible de résoudre le système d'équations qui est représenté par ce cycle (sous réserve de solvabilité numérique du système, mais ceci dépasse le cadre de l'analyse

structurale). Par contre les cycles différentiels représentent un système d'équations algébro-différentielles qui ne peut être résolu si les conditions initiales ne sont pas connues (Blanke *et al.*, 2003). Pour différencier ceux-ci, le concept de couplage causal est introduit.

**Définition 13 (Couplage causal)** *Un couplage causal est un couplage qui induit un graphe orienté ne contenant pas de cycle différentiel.*

La DM-décomposition fournit le sous-système sur-déterminé comportant  $n$  variables inconnues et  $n + p$  équations. Un couplage causal complet sur les  $n$  variables, lorsqu'il existe, permet de choisir  $n$  équations parmi les  $n + p$  afin de générer une séquence de calcul des variables inconnues. Les séquences de calcul des résidus sont alors obtenues en considérant les  $p$  équations redondantes et les séquences de calcul des variables inconnues induites par le couplage causal complet choisi. Un résidu sera structurellement sensible à une défaillance  $f_i$  si celle-ci concerne une des contraintes utilisées pour générer ce résidu.

La forme de calcul est obtenue en suivant la séquence de calcul et en utilisant les équations de fonctionnement normal. On obtient une relation du type  $w_c(\bar{y}, \bar{u}) = 0$  où  $\bar{u}$  et  $\bar{y}$  sont les vecteurs d'entrées et de sorties et leur dérivées successives jusqu'à un certain ordre  $n$ . En appliquant la même séquence de calcul mais en utilisant les équations du modèle défaillant, on obtient  $w_f(\bar{y}, \bar{u}, \bar{f}) = 0$ . La forme d'évaluation du résidu est  $w_e = w_f(\bar{y}, \bar{u}, \bar{f}) - w_c(\bar{y}, \bar{u})$ .

En étendant le couplage aux variables de défaillances (les variables  $f_i$ ), il est possible d'obtenir des résidus sensibles (structurellement) à des sous-ensembles de défaillances et complètement découplés d'un autre sous-ensemble de défaillances. La structure d'un résidu est donnée par l'ensemble des variables de défaillances adjacentes aux contraintes apparaissant dans sa séquence de calcul. En déterminant l'ensemble des couplages causaux complets donnant lieu à différentes composantes de Hall, il est possible de construire la table de signature théorique (voir chapitre 4, p. 33).

## 7.2 Contributions

### 7.2.1 Isolabilité structurelle et modèle de défaillance

L'analyse de la table de signature théorique permet de déterminer les propriétés de détectabilité et d'isolabilité structurelles des défaillances. Une défaillance est détectable si sa signature comporte au moins un "1". Deux défaillances sont isolables si leurs signatures sont différentes.

Le nombre de résidus de structures différentes peut être très important. Afin d'étudier et visualiser l'isolabilité des défaillances il est possible de construire une matrice appelée *table d'isolabilité* ([RI\_04\_3], [CI\_03\_3]).

**Définition 14** *La table d'isolabilité est une matrice carrée où chaque ligne et chaque colonne*

correspond à une défaillance. Un 1 à la position  $(i, j)$  indique que la défaillance  $i$  n'est pas isolable de la défaillance  $j$ .

Par permutation de lignes et colonnes, la table d'isolabilité peut être mise sous forme bloc-diagonale, où chaque bloc est une matrice carrée constituée uniquement de 1. Chaque bloc représente un sous-ensemble de défaillances non isolables entre elles.

La matrice d'isolabilité permet d'indiquer les sous-ensembles de défaillances non isolables entre elles, c'est-à-dire ne pouvant être différenciées à l'aide des résidus. Afin d'améliorer l'isolabilité des défaillances, une connaissance supplémentaire sur le système doit être utilisée. Un moyen possible consiste à ajouter des capteurs. Un autre moyen consiste à utiliser les modèles des défaillances c'est-à-dire le troisième niveau de connaissance sur les défaillances (voir chapitre 4, section 4.2) lorsque ceux-ci sont disponibles. L'utilisation de ces modèles peut permettre en effet d'améliorer les performances du système de surveillance en terme d'isolabilité des défaillances. L'analyse de la table d'isolabilité structurelle permet d'indiquer sur quelles défaillances un effort de modélisation doit être porté afin de respecter le cahier des charges de surveillance en terme d'isolabilité des défaillances. Le résultat issu de cette analyse doit être considéré avec précautions. Rien ne garantit en effet que l'ajout d'un modèle de défaillance va réellement améliorer les performances du système de surveillance en terme d'isolabilité des défaillances. Il est tout à fait possible que l'ajout d'un modèle de la défaillance ne permette pas de générer des résidus supplémentaires de structure différentes donc améliorant l'isolabilité. De plus, rien ne garantit que dans le cas où les résidus découplés existent, ceux-ci restent (suffisamment) sensibles aux autres défaillances. Cette étude a été menée en collaboration avec Erik Frisk de l'université de Linköping (Suède) dans le cadre du projet européen DAMADICS et a donné lieu aux publications [CI\_03\_3], [RI\_04\_3] et [RIS\_??\_3].

### 7.2.2 Aspects algorithmiques et considérations pratiques

Dans la thèse de Dilek Düstegor, nous nous intéressons aux aspects algorithmiques de l'analyse structurelle pour la surveillance afin d'améliorer l'implémentation de cette méthode.

Dans [CI\_04\_3], [CI\_04\_5] et [CI\_04\_8], nous considérons le problème du choix du couplage sur le graphe (matching) pour la génération de résidus.

Sur un bloc de König-Hall, il existe plusieurs façons de coupler les variables et relations de contraintes. Ceci entraîne des séquences de calcul différentes pour les variables donc pour les résidus. Etant donné que l'ensemble de contraintes est identique, la sensibilité structurelle des résidus est la même quel que soit le couplage choisi. Nous avons ainsi proposé dans [CI\_04\_8] un algorithme de couplage permettant de tenir compte de ces blocs de König-Hall. En ne considérant qu'un couplage par bloc, il est possible de réduire considérablement le nombre de couplages nécessaires pour générer l'ensemble des résidus de structure différente.

D'un point de vue structurel tous les couplages sur des blocs de König-Hall sont équivalents. Ceci n'est plus vrai lorsque les résidus sont implantés en considérant les formes explicites des contraintes. Les raisons sont les suivantes :

- **Complexité de calcul** : certaines contraintes sont plus facilement calculables ou implantables *dans un sens plutôt que dans un autre*. Certaines non linéarités ou tables par exemple sont difficilement inversibles.
- **Robustesse des calculs** : en présence de perturbations (incertitudes de modélisation, bruits), il est préférable d'utiliser certaines fonctions d'une manière plutôt que d'une autre afin de ne pas amplifier l'effet de ces incertitudes.
- **Sensibilité aux défaillances** : la sensibilité d'un résidu à une défaillance agissant sur une contrainte peut être différente suivant l'utilisation qui est faite de cette contrainte.

Nous avons proposé dans [CI\_04\_3] et [CI\_04\_5], de prendre en compte ces considérations pratiques (lorsque l'information est disponible) d'utilisation des contraintes dans l'analyse structurelle. L'idée originale est d'introduire des ordres partiels de préférence, notés  $\preceq$ , sur les variables et sur les contraintes. Formellement, ces ordres partiels sont définis de la manière suivante :

- Par rapport aux variables :  $c_j \preceq_{x_i} c_k$  lorsqu'il est préférable de coupler  $x_i$  à  $c_j$  plutôt qu'à  $c_k$ .
- Par rapport aux contraintes :  $x_j \preceq_{c_i} x_k$  lorsqu'il est préférable de coupler  $c_i$  à  $x_j$  plutôt qu'à  $x_k$ .

Dans [CI\_04\_3], nous avons cherché à obtenir le "meilleur" couplage sur le graphe en tenant compte des ordres de préférences sur les variables et sur les contraintes. Nous avons rapproché notre problème à un problème classique de combinatoire : le Stable Marriage Problem (SMP) (Gale and Shapley, 1955) et pour lequel de nombreux algorithmes ont été proposés dans la littérature (Gusfield and Irving, 1989; Manlove, 1999). L'adaptation du SMP à notre problème a nécessité de définir les concepts de *paire (ou couple contrainte/variable) bloquante* et de *couplage stable*.

Dans [CI\_04\_5], l'ordre partiel est transformé en pondération, ou coût, sur chaque arête du graphe structurel. Le coût global d'un couplage  $M$  sur le graphe est donné par la somme des pondérations de chaque couplage contrainte/variable impliqué dans  $M$ . Nous cherchons alors le "meilleur" couplage  $M^*$  au sens du minimum de coût global. Il s'agit d'un problème classique dans la théorie des graphes, pour lequel de nombreux algorithmes ont été proposés (Galil, n.d.).

### 7.2.3 Applications

Depuis que je travaille sur l'analyse structurelle, j'ai eu l'occasion d'appliquer la méthode sur 4 applications. Ceci a bien entendu contribué à la diffusion de cette approche vers la communauté scientifique et vers l'industrie mais aussi révélé des points sur lesquels un travail théorique a été nécessaire. Ces applications sont :

- Etude des possibilités de surveillance d'une chaîne de traction (contrat THOMSON CSF/LAIL)
- Analyse structurelle du "Ship propulsion Benchmark" dans le cadre du projet COSY, en collaboration avec Roozbeh Izadi Zamanabadi
- Analyse structurelle de la vanne du projet Damadics en collaboration avec Erik Frisk, dans le cadre de la thèse de Dilek Düstegör
- Analyse du système de freinage d'un Poids-Lourd dans le cadre de la thèse Samuel Artus

## 7.3 Conclusions et perspectives

L'analyse structurelle est un outil bien adapté aux systèmes de grandes dimensions, c'est à dire comportant un grand nombre de contraintes et de variables. Même si les concepts de base de cette méthode sont relativement simples, des algorithmes performants doivent être utilisés si l'on ne veut pas perdre tous les avantages de cette approche. Nous avons travaillé sur ces aspects relatifs à l'implémentation de l'analyse structurelle dans le cadre de la thèse de Dilek Düstegör. Cet effort doit être poursuivi particulièrement pour développer des algorithmes permettant de

- rechercher efficacement les couplages causaux, c'est à dire ne comportant pas de cycles différentiels,
- choisir les "meilleurs" couplages en considérant des critères relatifs à la surveillance et à la tolérance aux défaillances,

De plus, dans un contexte de tolérance aux défaillances (voir chapitre 8), il serait intéressant que ces algorithmes soient "adaptatifs" ou "récursifs" de manière à ne pas devoir reprendre l'analyse au point de départ en cas de perte de composants.

# Chapitre 8

## Reconfiguration et tolérance aux défaillances

### 8.1 Généralités, position du problème

La surveillance n'est pas une fin en soi. Ce n'est qu'un module d'un processus complet permettant à une installation de fonctionner en respectant des critères de sécurité, de productivité et de qualité même en présence de défaillance.

Lorsqu'une défaillance est détectée, localisée et diagnostiquée plus ou moins précisément, des décisions doivent être prises et des actions automatiques ou humaines doivent être entreprises.

Ces décisions et ces actions concernent le système physique lui-même (en incluant les actionneurs, les capteurs, les systèmes de communication) mais aussi les autres sous-systèmes (ou fonctions) du système automatisé que sont

- la commande,
- l'estimation,
- la surveillance.

Deux cas sont à envisager :

- Les objectifs d'un sous-système peuvent toujours être atteints même en présence de défaillances : le sous-système est dit *Tolérant aux Défaillances*. On parlera alors de Commande Tolérante aux défaillances (*FTC : Fault Tolerant Control*), d'Estimation Tolérante aux défaillances (*FTE : Fault Tolerant Estimation*) ou encore de Surveillance Tolérante aux défaillances (*FTM : Fault Tolerant Monitoring*). La tolérance d'un sous-système ou d'une fonction aux défaillances est donc définie **par rapport à un ensemble d'objectifs** et **pour un ensemble de défaillances** (Blanke *et al.*, 2003).

- Les objectifs ne peuvent plus être atteints quand une défaillance survient: le sous-système n'est pas tolérant à la défaillance. Le sous-système ne peut plus être utilisé pour répondre aux mêmes objectifs. Il est donc nécessaire de changer les objectifs ou le sous-système.

Deux approches sont utilisées pour qu'une fonction, répondant à un ensemble d'objectifs fixés, soit tolérante aux défaillances. On distingue l'approche passive (*PFT: Passive Fault Tolerance*) et l'approche active (*Active Fault Tolerance*)

Dans l'approche passive, on considère que les défaillances sont des perturbations. La fonction est conçue, réalisée de manière à être robuste vis à vis de ces perturbations. La fonction est donc la même en absence ou en présence de défaillances. Les outils utilisés sont ceux de la commande robuste ou de l'estimation robuste. Les résidus structurés permettent de rendre le système de surveillance tolérant aux défaillances par une approche passive.

Dans l'approche active, la fonction est modifiée lorsqu'une défaillance est détectée. Cette approche utilise donc les informations du module de surveillance: détection, localisation et estimation du défaut.

Un système automatisé, constitué de plusieurs sous-systèmes, est tolérant vis à vis d'un ensemble de défaillances si tous les objectifs peuvent être atteints en présence de défaillances. Il y a alors deux situations: tous les sous-systèmes sont tolérants aux défaillances, certains ne le sont pas. Dans le second cas, les sous-systèmes non tolérants doivent être remplacés si l'on veut conserver les mêmes objectifs. On dira alors que le système doit être reconfiguré.

Les travaux sur les approches actives de tolérance aux défaillances sont récents et concernent principalement les problèmes de commande (FTC). Pour plus de précisions, on se référera à (Blanke *et al.*, 2003).

## 8.2 Commande tolérante aux défaillances pour une classe de systèmes non linéaires

Dans [CI\_03\_1] et [RIS\_??\_1], nous nous sommes intéressés à l'approche active de commande tolérante aux défaillances (FTC) pour une classe de systèmes non linéaires.

### 8.2.1 Résultats théoriques

Nous considérons la classe de systèmes non linéaires modélisés par les équations d'état suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + g(t, x(t)) + Bu(t) + E\varphi(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{cases} \quad (8.1)$$

où

–  $x(t) \in R^n$  (vecteur d'état),  $u(t) \in R^m$  (vecteur des commandes) et  $y(t) \in R^r$  (vecteur

des mesures).

- $A, B, E$  et  $C$  : matrices réelles constantes
- $(A, C)$  est observable,  $(A, B)$  est commandable.
- $\varphi(t) \in \mathbb{R}^q$  : vecteur des défaillances processus
- $g(t, x(t))$  est une nonlinéarité de type Lipschitz (constante  $L_g$ ), i.e.

$$\|g(t, x_1) - g(t, x_2)\| \leq L_g \|x_1 - x_2\|$$

Nous ne considérons dans ce travail que les défaillances de type processus. Dans le cas des défaillances capteurs ou actionneurs le système peut devenir non observable ou non commandable (voir (Hoblos, 2001; Gehin *et al.*, 2000))

Dans une première étape, nous construisons un filtre de diagnostic puis nous utilisons l'estimation d'état et des défaillances pour construire une commande stabilisante.

**Hypothèse 8.2.1**  $\exists$  une matrice  $R_{(r \times q)}$  t.q.

$$PE = C^T R \tag{8.2}$$

où  $P_{(n \times n)}$  est une matrice définie positive solution de l'inégalité de Riccati :

$$(A - KC)^T P + P(A - KC) + \varepsilon L_g^2 I_n + \frac{P^2}{\varepsilon} + Q \leq 0 \tag{8.3}$$

avec  $Q_{(n \times n)}$  : une matrice définie positive,  $K$  : une matrice réelle telle que  $A - KC$  est stable, et  $\varepsilon$  : un paramètre positif.

Soit l'observateur adaptatif de diagnostic défini par

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} &= A\hat{x}(t) + g(t, \hat{x}(t)) + Bu(t) + E\hat{f}(t) + K[\hat{y}(t) - y(t)] \\ \frac{d\hat{f}(t)}{dt} &= \Gamma R^T [\hat{y}(t) - y(t)] - \sigma \Gamma \hat{f}(t) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{cases} \tag{8.4}$$

où  $R$  est donnée par l'hypothèse 8.2.1,  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  est une matrice de pondération,  $\sigma$  est un scalaire positif.

Nous avons montré alors la convergence de l'observateur adaptatif dans le cas des défaillances constantes ou bornées. Ces résultats sont donnés sous la forme des deux théorèmes suivants :

**Théorème 8.1** Soit  $e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  et  $e_\varphi(t) = \varphi_0 - \hat{\varphi}(t)$ .

Sous l'hypothèse 8.2.1, on montre que :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = 0 \text{ et } e_\varphi(t) \text{ est bornée}$$

De plus,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_\varphi(t) = 0 \text{ si } \text{rang}(E) = q \text{ (défaillances indépendantes)}$$

**Théorème 8.2** Sous les mêmes hypothèses, on montre que lorsque la défaillance est telle que :

$$\|\varphi(t)\| \leq \varphi_0, \quad \|\dot{\varphi}(t)\| \leq \varphi_1.$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_x(t) = 0 \text{ et } e_\varphi \text{ est bornée.}$$

Nous construisons ensuite une commande par retour d'état permettant de stabiliser le système commandé même en présence de défaillance. Cette commande utilise les estimations  $\hat{x}(t)$  et  $\hat{f}(t)$ .

**Hypothèse 8.2.2**  $\exists$  une fonction  $\tau(x, t)$  et deux matrices réelles constantes  $H_{(n \times n)}, W_{(n \times n)}$  telles que

$$(i) \quad W = W^T > 0$$

(ii)  $H = H^T > 0$  est la solution de l'équation de commande de Riccati

$$A^T H + H A - 2H B B^T H + W = 0 \tag{8.5}$$

(iii)  $\|x^T H g(x, t)\| \leq \tau(x, t)$  et  $\tau(x, t) / [\|x^T H B\|]$  est une fonction continue et localement bornée par rapport à  $x$ .

**Remarque 8.2.1** Les hypothèses (8.2.2i) et (8.2.2ii) sont les mêmes que pour une commande LQ classique.

L'hypothèse 8.2.2(iii) exprime que la non-linéarité  $g(t, x(t))$  est bornée. Elle garantit que la commande qui va être définie est continue et localement bornée.

En supposant qu'il existe une matrice  $\bar{E}_{(m \times q)}$ , telle que  $E = B\bar{E}$ , nous montrons le théorème suivant:

**Théorème 8.3** Sous les hypothèses 8.2.1 et 8.2.2, le système peut être stabilisé en utilisant

la loi de commande suivante:

$$u = u_1 + u_2 \tag{8.6}$$

$$u_1 = -B^T H \hat{x} - \bar{E} \hat{\varphi} \tag{8.7}$$

$$u_2 = -\frac{\phi(\hat{x}, t)}{\|\phi(\hat{x}, t)\| + \epsilon/2} \cdot \frac{\tau(\hat{x}, t)}{\|\hat{x}^T H B\|} \tag{8.8}$$

avec

$$\phi(x, t) \triangleq \frac{B^T H x}{\|x^T H B\|} \cdot \tau(x, t) \tag{8.9}$$

où  $\epsilon$  est une constante positive,  $\tau(x, t)$  est donné par la condition (iii) de l'hypothèse 8.2.2.

### 8.2.2 Application à un bras manipulateur à 1 degré de liberté

Dans [RIS\_??\_1] nous appliquons la théorie précédente sur un exemple classique de la littérature. Le modèle du système est :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_m = \omega_m \\ \dot{\omega}_m = \frac{k}{J_m}(\theta_1 - \theta_m) - \frac{b}{J_m}\omega_m + \frac{K_\tau}{J_m}u \\ \dot{\theta}_1 = \omega_1 \\ \dot{\omega}_1 = \frac{k}{J_1}(\theta - \theta_m) - \frac{mgh}{J_1}\sin(\theta_1) \end{cases}$$

avec  $J_m$  l'inertie du moteur;  $J_1$  l'inertie du bras;  $\theta_m$  la position angulaire du moteur;  $\theta_1$  la position angulaire du bras;  $\omega_m$  la vitesse de rotation du moteur et  $\omega_1$  la vitesse de rotation du bras.

Les valeurs numériques sont celles trouvées dans (Spong, 1987):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -48.6 & -1.25 & 48.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \\ 1.95 & 0 & -1.95 & 0 \end{bmatrix}, \quad g(t, x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.333\sin(x_3) \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 21.6 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 12.5 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

On choisit par placement de pôles:

$$K = \begin{bmatrix} 0.8307 & 0.4514 & 0.8238 & 0.0706 \\ 0.4514 & 6.2310 & 1.3072 & 0.2574 \end{bmatrix}$$

et  $Q = 0.2I_4$ , ceci donne:

$$R = \begin{bmatrix} 1.7612 \\ 1.3862 \end{bmatrix}.$$

En choisissant  $W = 0.5I_4$ , la matrice  $H$  peut être calculée à partir de l'équation de commande de Riccati:

$$H = \begin{bmatrix} 1.8648 & 0.0352 & -1.1085 & 1.0446 \\ 0.0352 & 0.0234 & -0.0024 & 0.0442 \\ -1.1085 & -0.0024 & 1.2434 & 0.0660 \\ 1.0446 & 0.0442 & 0.0660 & 7.5282 \end{bmatrix}.$$

La défaillance suivante est considérée:

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0; & t < 1 \text{ (sec)} \\ 0.4 + 0.2\cos(2\pi t); & 1 \leq t \leq 8 \text{ (sec)} \end{cases}$$

**Résultats de simulation** Les figures 8.2.2 et 8.2.2 donnent respectivement l'estimation de la défaillance et la stabilisation de l'état.

### 8.3 Conclusions et perspectives

La reconfiguration et la tolérance aux défaillances ne concernent pas uniquement la commande du système. Toutes les fonctions ou algorithmes intervenant (en-ligne) dans le système automatisé sont concernés. Ainsi, lorsque des défaillances surviennent, les fonctions d'estimation, d'identification de paramètres, de surveillance peuvent ne plus être opérationnelles. L'analyse des propriétés du système en présence de défaillances (observabilité, identifiabilité, surveillabilité, diagnosticabilité, ...) est une étape à considérer dès la phase de conception. En fonction des résultats de ces analyses, des contraintes supplémentaires (par exemple des contraintes sur le placement des capteurs) peuvent être introduites de manière à ce que les fonctions puissent toujours être exécutées même en présence de défaillances.

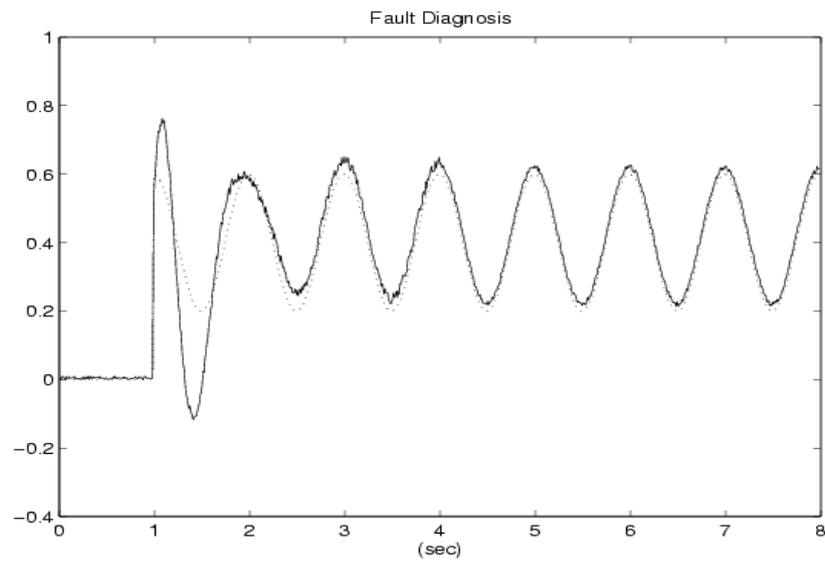


FIG. 8.1: Défaillance  $\varphi$  (pointillés) et son estimation  $\hat{\varphi}$  (trait plein).

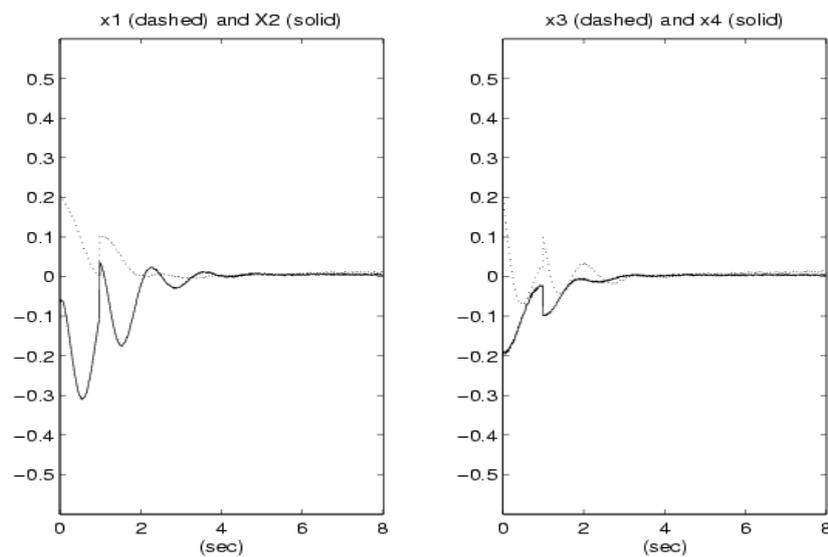


FIG. 8.2: Réponse temporelle des variables d'état  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  et  $x_4$

## Chapitre 9

# Conclusions et perspectives générales

Dans ce mémoire, j'ai tenté de retracer mes 15 années de carrière d'enseignant/chercheur tant d'un point de vue de l'enseignement que d'un point de vue de la recherche. Ces deux fonctions de l'enseignant/chercheur sont complémentaires et aussi passionnantes l'une que l'autre. Durant toutes ces années, j'ai essayé de ne négliger aucun des deux aspects. Je pense y être parvenu, même s'il n'a pas toujours été facile de concilier les deux fonctions.

La rédaction du mémoire d'habilitation m'a permis de faire un point complet sur l'ensemble de mes activités. Elle permet aussi de mettre en exergue des perspectives en matière de recherche.

Tout au long de la deuxième partie du mémoire, j'ai énoncé de nombreuses perspectives scientifiques aussi bien sur les aspects *conception* qu'*exploitation* de systèmes de surveillance. Même si les développements sont encore nombreux sur les méthodes de génération de résidus et sur l'analyse structurelle, je pense cependant orienter fortement mes travaux de recherche, au moins à court et moyen terme, vers les deux thématiques nouvelles que j'ai décrites dans les chapitres 6 et 8 c'est à dire la *surveillance des systèmes dynamiques hybrides* et la *tolérance aux défaillances* des fonctions d'un système automatisé.

Parallèlement à ces travaux, je compte travailler sur les trois aspects suivants :

1. La sûreté de fonctionnement (étude de fiabilité, analyse de risque,...) et la surveillance en-ligne (FDI) sont deux domaines de recherche dont les développements se font en parallèle et qui pourtant sont liés. L'analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) par exemple permet de spécifier les composants pour lesquels la surveillance doit être très performante. Cette information peut être prise en compte lors de la conception du système de surveillance. De même, la fiabilité globale d'un système est une quantité dynamique qui évolue dans le temps en fonction de la fiabilité des composants et de l'évolution de l'état du système donc des informations issues des procédures de surveillance en-ligne. Ces passerelles entre méthodes de Sûreté de Fonctionnement et Surveillance devraient permettre d'augmenter la sécurité des systèmes

---

industriels et d'optimiser la maintenance sans augmenter le coût global.

2. La surveillance (ou diagnostic) en ligne du système a pour but de déterminer l'état dans lequel se trouve celui-ci à chaque instant. Dans bien des applications, il peut être très utile de prédire l'évolution future du système sous certaines hypothèses d'évolution des commandes et des conditions environnementales et d'exploitation. La prédiction, ou le pronostic, peut être réalisée en simulant le modèle du système sur un horizon temporel donné, en partant des conditions initiales qui sont en fait l'état actuel du système connu par la procédure de surveillance. La qualité du pronostic dépend donc directement de la qualité de la surveillance et de la qualité du modèle. Cet axe de recherche intéresse fortement les industriels car la mise en place d'une procédure de prédiction permet d'améliorer la productivité et la sécurité, d'optimiser la maintenance et les coûts d'exploitation. Nous avons récemment entamé des travaux sur ces aspects "prédiction" en collaboration avec l'INRETS et Renault Trucks dans le cadre de la thèse de Samuel Artus.
3. Les méthodes de surveillance à base de modèles et les méthodes "sans modèle" sont développées parallèlement. Ces approches peuvent cependant dans bien des cas être complémentaires. L'information portée par les résidus peut être utilisée comme une donnée d'entrée des procédures d'apprentissage. De même les techniques d'apprentissage peuvent être utilisées pour améliorer par exemple les procédures de décision appliquées sur les résidus.

Enfin, d'une façon générale, on peut constater que les méthodes de surveillance et de tolérance aux défaillances que nous développons restent relativement théoriques et ne sont pour le moment que très peu utilisées dans le monde industriel. Un effort doit être fait par l'ensemble de la communauté pour rendre ces approches plus attractives (moins théoriques) et plus facilement utilisables et implémentables dans un contexte industriel. La complexité des systèmes industriels et les contraintes d'exploitation doivent ainsi être mieux prises en compte dans la conception des outils et méthodes destinés à améliorer la sécurité et la disponibilité de ces systèmes.



## Troisième partie

# Références bibliographiques

## Chapitre 10

# Mes publications

### 10.1 Revues internationales

- [RI\_94\_1] | CASSAR J.P, LITWAK R., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour des procédés industriels complexes. Revue Européenne de Diagnostic et sûreté de fonctionnement - Vol 4, n°2, pp 179-202, 1994. ([cliquez ici](#))
- [RI\_01\_1] | JIANG B, STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V., Robust fault diagnostic filter design for bilinear stochastic systems. Control and Intelligent Systems, Vol. 29, n°1, 2001, pp 1-7. ([cliquez ici](#))
- [RI\_03\_1] | CHANG X., COCQUEMPOT V., CHRISTOPHE C. A Model of Asynchronous Machines for Stator Fault Detection and Isolation. IEEE transaction on Industrial Electronics, Volume 50, Number 3, pp 578-584, June, 2003. ([cliquez ici](#))
- [RI\_03\_2] | JIANG B., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. H-infinity fault detection filter design for linear discrete-time systems with multiple time delays. International Journal of System Science (IJSS) - Pub. Taylor & Francis - pp. 365 - 373, Vol. 34, No. 5, 2003. ([cliquez ici](#))
- [RI\_04\_1] | JIANG B., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. Fault diagnosis based on adaptive observer for a class of nonlinear systems with unknown parameters. Int. Journal of Control (IJC), 10 March 2004, VOL. 77, NO. 4, 415-426, 2004. ([cliquez ici](#))
- [RI\_04\_2] | JIANG B., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. Fault Estimation in Nonlinear Uncertain Systems using Robust/Sliding Mode Observers. IEE Control Theory and Application (IEE-CTA), vol 151, n°1, pp. 29-37, January 2004. ([cliquez ici](#))

- [RI\_04\_3 ] DÜSTEGÖR D., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., FRISK E. Isolabilité Structurelle des défaillances - Application à un modèle de vanne. JESA : Journal Européen des Systèmes Automatisés. RS - JESA. Volume 38 - n°1-2/2004, pages 103 à 123 ([cliquez ici](#))
- [RI\_04\_4 ] CHRISTOPHE C., COCQUEMPOT V., JIANG B. Link between high gain observer-based residual and parity space one for FDI. The Transactions of the Institute of Measurement and Control, Arnold Publisher, Volume 26, Issue 4, August 2004. ([cliquez ici](#))

## 10.2 Revue nationale

- [RN\_03\_1 ] CHANG X. , COCQUEMPOT V., ZHAO S., CHRISTOPHE C. The New Three Phase Asynchronous Machine Model and Comparing Experiment. Proceedings of the CSEE : Chinese Society of Electrical Engineering, in chinese, Vol.22, No.8, Août 2003.

## 10.3 Chapitres d'ouvrages collectifs

- [OC\_00\_1 ] ISIDORI A., KINNAERT M., COCQUEMPOT V., DE PERSIS C., FRANK P.M. AND SHIELDS D.N Residual Generation for FDI in Non linear Systems. Control of Complex Systems : a book of the COSY group, chapitre 10, ed. Springer (2000).
- [OC\_00\_2 ] IZADI-ZAMANABADI R., AMANN P., BLANKE M., COCQUEMPOT V., GISSINGER G.L., KERRIGAN E.C., LOOTSMA T.F., PERRONNE J.M., SCHREIER G. Fault Detection and Reconfigurable Control for a Ship. Control of Complex Systems : a book of the COSY group, chapitre 13, ed. Springer (2000).

## 10.4 Articles de congrès internationaux republiés en ouvrage de synthèse après sélection

- [OS\_91\_1 ] STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V., CASSAR J.P Comparison of observer based and parity space approaches for failure detection and Identification. Issu d'une communication présentée au symposium IMACS/IFAC, Lille, Mai 1991 Publié dans "IMACS Trans. on Mathematics of the Analysis and Design of Processes ".
- [OS\_91\_2 ] STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V., CASSAR J.P Generation of analytical redundancy relations in a linear interconnected system. Issu d'une communication présentée au symposium MIN-S2'90, Bruxelles, Septembre 1990 Publié dans "Mathematical

and Intelligent Models in System Simulation ", Ed. R.Hanus, P. Kool and S. Tzafestas, J.C. Baltzer AG, Sc. Pub. Co., pp 391-396, 1991.

## 10.5 Congrès internationaux avec actes

- [CI\_90\_1 ] STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V., CASSAR J.P Generation of relations for system supervision using the transfer function representation. 9th IASTED on Modelling, Identification and Control, Innsbruck, Février 1990
- [CI\_90\_2 ] STAROSWIECKI M, CASSAR J.P, COCQUEMPOT V. Generation of analytical redundancy relations in a linear interconnected system. IMACS, MIN-S2'90, Bruxelles, Septembre 1990. ([cliquez ici](#))
- [CI\_91\_1 ] STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V., CASSAR J.P Observer based and parity space approaches for failure detection and identification. IMACS/IFAC Symposium on "Modelling and Control of Techno-Logical Systems", Lille, Vol 2, Proc. pp 536-541, Mai 1991. ([cliquez ici](#))
- [CI\_91\_2 ] COCQUEMPOT V., CASSAR J.P, STAROSWIECKI M Generation of robust analytical redundancy relations. European Control Conference 91, Grenoble, Vol 1, pp309-314, Juillet 1991. ([cliquez ici](#))
- [CI\_91\_3 ] STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V., CASSAR J.P. Optimal design of FDI system via parity space and observer based approach. IECON'91 Kobé (Japon), octobre 1991, Vol 1, pp 143-148. ([cliquez ici](#))
- [CI\_92\_1 ] CASSAR J.P, DJEGHABA M, STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V. Sensitivity robustness trade off via the generation of optimal residuals in the parity space. IEEE SICI'92, Singapour (Malaisie), Février 1992, Vol 1, p 54. ([cliquez ici](#))
- [CI\_93\_1 ] STAROSWIECKI M, CASSAR J.P., COCQUEMPOT V. A general approach for multi-criteria optimization of structured residuals. TOOLDIAG'93, Toulouse, Avril 1993, Vol 2, pp 800-807. ([cliquez ici](#))
- [CI\_93\_2 ] CASSAR J.P, STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V. Generation of optimal structured residuals in the parity space. IFAC World Congress, Sydney (Australie), Juillet 1993, Vol 8, pp 299-306. ([cliquez ici](#))
- [CI\_93\_3 ] CASSAR J.P, STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V. Optimal residual design for model based fault detection and isolation. A review and new results. IEEE International conf. on syst., Man and Cybernetics - Le Touquet - France - Octobre 1993. ([cliquez ici](#))

- [CI\_95\_1] | CASSAR J.P, STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V. Optimal Residual Design for Model-Based Fault Detection and Isolation. 3rd European Control Conference ECC95, Roma, Italy, pp. 1986-1992, september 1995. ([cliquez ici](#))
- [CI\_97\_1] | COCQUEMPOT V., CASSAR J.P., STAROSWIECKI M. How does the Time Window Size Influence the Sensitivity/Robustness Trade-off of Optimal Structured Residuals. SafeProcess'97, IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Hull (UK), Août 1997, pp. 329-334. ([cliquez ici](#))
- [CI\_97\_3] | COCQUEMPOT V., DAGUES B., ROBOAM X., LEMAIRE-SEMAIL B. Fault Detection and Isolation System Evaluation for an Asynchronous Drive Using POSTMAC Software. SDEMPED'97, IEEE Symp. on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drive, Carry-le Rouet (France), Sept. 1997, pp.270-276. ([cliquez ici](#))
- [CI\_97\_4] | MAQUIN D., COCQUEMPOT V., CASSAR J. PH, STAROSWIECKI M., RAGOT J. Generation of Analytical Redundancy Relations for FDI Purposes. SDEMPED'97, IEEE Symp. on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drive, Carry-le Rouet (France), Sept. 1997, pp.86-93. ([cliquez ici](#))
- [CI\_98\_1] | COCQUEMPOT V, IZADI-ZAMANABADI R., STAROSWIECKI M., BLANKE M. Residual Generation for the Ship Benchmark Using Structural Approach. International Conference on CONTROL'98, Swansea (UK), Sept. 1998, pp. 1480-1485. ([cliquez ici](#))
- [CI\_99\_1] | COMTET-VARGA G., CHRISTOPHE C., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. FDI for the induction motor using elimination theory. European Control Conference ECC'99, Karlsruhe, Germany, Septembre 1999. ([cliquez ici](#))
- [CI\_99\_2] | CHRISTOPHE C., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., Robust residual generation for the induction motor using elimination theory. SDEMPED'99: IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Spain, September 1999. ([cliquez ici](#))
- [CI\_00\_1] | COCQUEMPOT V., CHRISTOPHE C. On the Equivalence between Observer-Based and Parity Space Approaches for F.D.I in Non-Linear Systems. SafeProcess 2000, IFAC Symp. on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Budapest, juin 2000, pp. 232-237. ([cliquez ici](#))
- [CI\_00\_2] | CHRISTOPHE C., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. Non Sinusoïdal Residual Generation for FDI of Induction Motor. 4th IFAC International Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications SICICA 2000, Buenos Aires, Septembre 2000. ([cliquez ici](#))

- [CI\_01\_1 ] JIANG B, M. STAROSWIECKI, COCQUEMPOT V. Fault diagnosis for a class of nonlinear systems with unknown parameters. IFAC Supervision of Chemical Processes 2001, Séoul, Corée, pp. 181-186. ([cliquez ici](#))
- [CI\_01\_2 ] JIANG B, STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V., CHRISTOPHE C. Adaptive observer based FDI: Application to sensor fault diagnosis for induction motor. IEEE SDEMPED'01, Trieste, Italie, pp. 265-270. ([cliquez ici](#))
- [CI\_01\_3 ] JIANG B, STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. Robust Fault Diagnostic Filter Design for Bilinear Stochastic Systems. Proceedings of European Control Conference (ECC'01), Porto (Portugal), 4-7 Septembre 2001, pp.1373-1377. ([cliquez ici](#))
- [CI\_01\_4 ] JIANG B, M. STAROSWIECKI, V. COCQUEMPOT V. Robust observer based fault diagnosis for a class of nonlinear systems with uncertainties. Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'01), Orlando, Florida USA, December 2001, pp. 161-166. ([cliquez ici](#))
- [CI\_02\_1 ] JIANG B, M. STAROSWIECKI, V. COCQUEMPOT V. H-infinity fault detection filter for a class of discrete-time systems multiple time delays. IFAC World Congress'02, Barcelone, Juillet 2002 , pp. 770-775. ([cliquez ici](#))
- [CI\_02\_2 ] JIANG B, COCQUEMPOT V., CHRISTOPHE C. Fault diagnosis using sliding mode observer for nonlinear systems. IFAC World Congress'02, Barcelone, Juillet 2002, pp. 674-679. ([cliquez ici](#))
- [CI\_02\_3 ] CHRISTOPHE C., COCQUEMPOT V., JIANG B Link between high-gain observer based residual and parity space one. American Control Conference (ACC'02), Anchorage (Alaska), mai 2002. ([cliquez ici](#))
- [CI\_02\_4 ] JIANG B, M. STAROSWIECKI, COCQUEMPOT V. Fault Identification for a class of time-delay systems. American Control Conference (ACC'02), Anchorage (Alaska), mai 2002. ([cliquez ici](#))
- [CI\_02\_5 ] CHANG X., COCQUEMPOT V., CHRISTOPHE C. Modélisation de la machine asynchrone en présence de pannes stator. CIFA02: Conférence Internationale en Automatique, Nantes, Juillet 02. ([cliquez ici](#))
- [CI\_02\_6 ] CHANG X., COCQUEMPOT V., ZHAO S., CHRISTOPHE C. The Model of Asynchronous Induction Machines. PowerCon'02: International Conference on Power System Technology. Kunming, P.R.China., paper n° 1086, Oct.13-17, 2002. ([cliquez ici](#))

- [CI\_03\_1] | JIANG B., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V., Active fault tolerant control for a class of nonlinear systems. Proc. of IFAC SAFEPROCESS'03, Washington, Juin 2003. ([cliquez ici](#))
- [CI\_03\_2] | COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., EL MEZZYANI T. Switching time estimation and fault detection for hybrid systems using structured parity residuals. Proc. of IFAC SAFEPROCESS'03, Washington, Juin 2003. ([cliquez ici](#))
- [CI\_03\_3] | FRISK E., DÜSTEGOR D., KRYSANDER M., COCQUEMPOT V. Improving fault isolability properties by structural analysis of faulty behavior models: Application to the DAMADICS benchmark problem. Proc. of IFAC SAFEPROCESS'03, Washington, Juin 2003. ([cliquez ici](#))
- [CI\_03\_4] | ARTUS S., HAYAT S, STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. A brake disc's temperature estimation module. SCSC2003, Summer Computer Simulation Conference, Montreal, Juil. 2003. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_1] | COCQUEMPOT V., EL MEZZYANI T., STAROSWIECKI M. Fault Detection and Isolation for Hybrid Systems using Structured Parity Residuals. IEEE/IFAC-ASCC'2004: Asian Control Conference, Juil 2004. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_2] | KALLESØE C., IZADI-ZAMANABADI R., COCQUEMPOT V., RASMUSSEN H. Model Based Fault Diagnosis in a Centrifugal Pump Application using Structural Analysis. IEEE Conference on Control Application: CCA'04, sept 2004, Taipei, Taiwan. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_3] | DÜSTEGÖR D., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. Structural Analysis for Residual Generation: Towards Implementation. IEEE Conference on Control Application: CCA'04, sept 2004, Taipei, Taiwan. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_4] | COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., EL MEZZYANI T. Surveillance des systèmes hybrides non linéaires à l'aide de Relations de Redondance Analytiques. IEEE-CIFA04: Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Douz (Tunisie) 2004. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_5] | DÜSTEGÖR D., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. Structural Analysis for Residual Generation: implementation Issues Consideration. IEE-Control 2004, Bath (UK), septembre 2004. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_6] | ARTUS S., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., HAYAT S., COVO C. Temperature Estimation of CHV Brake Discs using an Energy Balance Approach. IEEE-ITS'04: Intelligent transportation systems, Washington DC, Octobre 2004. ([cliquez ici](#))

- [CI\_04\_7 ] CONRARD B., COCQUEMPOT V., BAYART M. Design of Safe Distance Control System. IEEE VPP : Vehicle Power Propulsion, Paris, 6-8 Octobre 2004. ([cliquez ici](#))
- [CI\_04\_8 ] DÜSTEGÖR D., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. Structural Analysis for Fault Detection and Isolation : an Algorithmic Study. Accepté à IFAC SSSC'04 : System, structure and Control, Oaxaca (Mexique). ([cliquez ici](#))

## 10.6 Congrès, colloques nationaux avec actes

- [CN\_99\_1 ] CHRISTOPHE C., COCQUEMPOT V. Génération de résidus non sinusoïdaux pour la machine asynchrone Journées doctorales d'Automatique, Nancy, France, Septembre 1999. ([cliquez ici](#))
- [CN\_00\_1 ] COCQUEMPOT V. Méthodes de Redondance Analytique pour la Surveillance de la Machine Asynchrone". Synthèse rédigée à partir des contributions des équipes du CEGELY, LAG, LAIL, LAP, LEG (G. Clerc, C. Combastel, S. Gentil, O. Sename, V. Cocquempot, C. Christophe, M. Staroswiecki, D. Henry, M. Monsion, A. Zolghadri, N. Jérance, B. Raison, G. Rostaing, J.-P. Rognon). Journées Nationales du GDR SDSE "Sûreté et disponibilité des Systèmes Electrotechniques", Villeurbanne, 20 et 21 janvier 2000, pp. 62-69.
- [CN\_01\_1 ] COCQUEMPOT V. Bilan du projet "Méthodes de Redondance Analytique pour la Surveillance de la Machine Asynchrone". Synthèse rédigée à partir des contributions des équipes du CEGELY, LAG, LAIL, LAP, LEG (G. Clerc, C. Combastel, S. Gentil, O. Sename, V. Cocquempot, C. Christophe, M. Staroswiecki, D. Henry, M. Monsion, A. Zolghadri, N. Jérance, B. Raison, G. Rostaing, J.-P. Rognon) Journées Nationales d'Automatique, 31 Janvier au 2 février 2001, Autrans. ([cliquez ici](#))
- [CN\_01\_2 ] COCQUEMPOT V. Bilan du projet "Méthodes de Redondance Analytique pour la Surveillance de la Machine Asynchrone". Synthèse rédigée à partir des contributions des équipes du CEGELY, LAG, LAIL, LAP, LEG (G. Clerc, C. Combastel, S. Gentil, O. Sename, V. Cocquempot, C. Christophe, M. Staroswiecki, D. Henry, M. Monsion, A. Zolghadri, N. Jérance, B. Raison, G. Rostaing, J.-P. Rognon) Journée bilan du GDR SDSE, 14 décembre 2001, Lyon. ([cliquez ici](#))
- [CN\_03\_1 ] DÜSTEGOR D, COCQUEMPOT V. Isolabilité structurelle des défaillances : application à un modèle de vanne. Journées Doctorales d'Automatique, JDA'03, Valenciennes, Juin 2003. ([cliquez ici](#))

## 10.7 Rapports de fin de contrat

- [RC\_97\_1] | COCQUEMPOT V., Etude des possibilités de surveillance d'une chaîne de traction. Contrat Thomson/CSF-USTL, Février 1997.
- [RC\_00\_1] | JOLLY V., COCQUEMPOT V., CHRISTOPHE C., Contribution au diagnostic de pannes dans les circuits électroniques analogiques. Rapport de fin de contrat Thomson Detexis/LAIL, contrat n°51 565, Novembre 2000.
- [RC\_02\_1] | ARTUS S., COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., HAYAT S., Etude de faisabilité d'un modèle d'échauffement des disques de frein de véhicules poids lourds. Septembre 2002.
- [RC\_04\_1] | COCQUEMPOT V., CONRARD B., BAYART M., Etude de fiabilité: application à la RAPL (Route Automatisée Poids Lourds). Projet "Scénarios de la route automatisée poids-lourds" soutenu par le ministère des transports et coordonné par le LCPC. Rapport final fourni en mai 2004.

## 10.8 Colloques sans actes et diffusion de la connaissance

- [DC\_91\_1] | STAROSWIECKI M, COCQUEMPOT V., CASSAR J.Ph., Equivalence entre observateurs et espace de parité en détection de défaillances. Réunion GRECO Automatique, GT "Diagnostic", Juin 1991.
- [DC\_95\_1] | COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M, CASSAR J.P Robustesse et sensibilité des algorithmes de surveillance. Journée d'étude "Supervision, détection et localisation des pannes dans les procédés industriels ", IBRA (Institut Belge de Régulation et d'Automatisme), 26 oct. 1995.
- [DC\_98\_1] | COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M., CASSAR J.Ph. Optimisation géométrique des résidus structurés dans l'espace de parité. Réunion du projet2 de l'Action Incitative S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), 27/01/1998.
- [DC\_98\_2] | IZADI ZAMANABADI R., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V., "Structural Analysis Approach to FDI for the Ship Propulsion Benchmark". Workshop COSY (Control of complex system) (thème 2), Mulhouse, 3-4 avril 1998.
- [DC\_98\_3] | COCQUEMPOT V., "Problématique et approches de la surveillance des systèmes technologiques: Méthodes, modèles et outils". Cours ESIEE, 130 transparents.

- [DC\_99\_1] | CHRISTOPHE C.,COCQUEMPOT V. Génération de résidus pour les systèmes non-linéaires : Equivalence entre la méthode de l'espace de parité et les méthodes par observateur. Réunion du groupe de travail S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), 25/11/99.
- [DC\_00\_1] | JIANG B.,COCQUEMPOT V., STAROSWIECKI M. Robustesse et structuration des résidus des systèmes non linéaires. Application à la surveillance de la machine asynchrone. Réunion du groupe de travail S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), 29/O9/00.
- [DC\_02\_1] | JIANG B., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. Robust Observer based fault diagnosis for a class of nonlinear systems with uncertainties 3rd DAMADICS Workshop on Robust Methods in Fault Diagnosis, University of Hull, 25th to 26th January 2002.
- [DC\_03\_1] | FRISK E., DÜSTEGOR D., KRYSANDER M., COCQUEMPOT V. Improving fault isolability properties by structural analysis of faulty behavior models: Application to the DAMADICS benchmark problem. 3rd DAMADICS Workshop, Lille, 9 avril 2003.
- [DC\_04\_1] | COCQUEMPOT V., JIANG B., STAROSWIECKI M. Contrôle tolérant aux défaillances pour une classe de systèmes non linéaires. Réunion du groupe de travail S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), 12/02/04.
- [DC\_04\_2] | COCQUEMPOT V., EL MEZYANI T., STAROSWIECKI M. Surveillance des systèmes dynamiques hybrides l'aide de Relations de Redondance Analytiques. Réunion du groupe de travail SDH : Systèmes Dynamiques Hybrides, 17/06/04.

## 10.9 Articles soumis

### Revues internationales

- [RIS\_??\_1] | JIANG B., STAROSWIECKI M., COCQUEMPOT V. Fault accommodation for non-linear dynamic systems. Soumis à IEEE Transaction on Automatic Control, Juin 2003. Version corrigée envoyé en juin 2004.
- [RIS\_??\_2] | KALLESØE C.S, COCQUEMPOT V., AND IZADI-ZAMANABADI R. Model Based Fault Detection in a Centrifugal Pump. Application IEEE Transaction on Control Systems Technology, soumis octobre 2003. Version corrigée envoyée en Novembre 2004.
- [RIS\_??\_3] | DÜSTEGÖR D., FRISK E., COCQUEMPOT V., KRYSANDER, M., STAROSWIECKI M. Structural Analysis of Fault Isolability in the DAMADICS Benchmark Soumis à CEP n° spécial DAMADICS, version corrigée envoyée en Juillet 2004.

# Bibliographie

- Assas, M. (2002). Analyse de la tolérance aux fautes: approche fonctionnelle et structurelle. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille.
- Bagajewicz, M. (2000). *Process plant instrumentation. Design and upgrade*. CRC Press.
- Basseville, M. (1999). On Fault Detectability and Isolability. *ECC'99, Karlsruhe (Allemagne)*.
- Beard, R.V. (1971). Failure Accommodation in Linear System Through Self Reorganization. Ph-d. MIT.
- Berge, C. (1973). *Graphes et hypergraphes*. Dunod.
- Blanke, M., M. Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki (2003). *Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Springer-Verlag.
- Bornard, G. and H. Hammouri (1991). A High Gain Observer for a Class of Uniformly Observable Systems. *CDC'91, Brighton (Angleterre)* pp. 1494–1496.
- Branicky, M. (1996). General hybrid dynamical systems: Modeling, analysis, and control.. *Lecture note: Hybrid system III 4066*, 187–200.
- Carpentier, T. (1998). PLacement de capteurs. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille.
- Chen, J. and R. J. Patton (1999). *Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publisher.
- Chen, J., R.J. Patton and h.Y. Zhang (1991). A Multi-Criteria Optimization Approach to the Design of Robust Fault Detection Algorithm. In: *Tooldiag'93*. Toulouse (France). pp. 239–255.
- Chow, E. Y. and A. S. Willsky (1984). Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **29**(7), 602–615.

- Christophe, C. (2001). Surveillance des systèmes non linéaires Application aux machines électriques.. Thèse de doctorat. Université des Sciences et technologies de lille.
- Clark, R. N., D. C. Fosth and W. M. Walton (1975). Detecting Instrument Malfunctions in Control Systems. *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys.* **11**(4), 465–473.
- Commault, C., J.M. Dion and Hovelaque (1997). A geometric approach for structured systems - application to the disturbance decoupling problem. *Automatica* **33**(3), 403–409.
- Comtet-Varga, G. (1997). Surveillance des Systèmes Non Linéaires : Application aux Machines Asynchrones. PhD thesis. Université des Sciences et Technologies de Lille 1. France.
- Cox, D., J. Little and D. O'Shea (1992). *Ideals, Varieties and Algorithms*. Springer. New York.
- De Persis, C. and A. Isidori (1999). A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **46**(6), 853.
- Declerck, P. (1991). Analyse structurale et fonctionnelle des grands systèmes. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille.
- Delmaire, G. (1996). Comparaison des Méthodes d'Identification Paramétrique et de l'Espace de Parité pour la Détection et la Localisation de Défaillances dans les Systèmes Automatisés. PhD thesis. Université des Sciences et Technologies de Lille 1. France.
- Ding, X. and P.M. Frank (1994). Comparison of Observer-Based Fault Detection Approaches. *SAFEPROCESS'94, Helsinki (Finlande)* pp. 556–561.
- Diop, S. (1991). Elimination in Control Theory. *Math. Control Signals systems* **4**, 17–32.
- Dulmage, A. L. and N. S. Mendelshon (1958). Covering of bipartite graphs. *Canadian Journal of Mathematics* **10**, 517–534.
- Edwards, C., S.K. Spurgeon and R.J. Patton (2000). Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica* **36**, 541–553.
- Frank, P.M. (1990). Fault Diagnosis in Dynamic Systems using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and some New Results. *Automatica* **26**(3), 459–474.
- Frank, P.M. (1994). On-Line Fault Detection in Uncertain Nonlinear Systems Using Diagnostic Observers : A Survey. *Int. J. Systems SCI.* , **25**(12), 2129–2154.
- Gale, D. and L.S. Shapley (1955). College admissions and the stability of marriage. *Naval Research Logistics, V. Quarterly* **2**, 83–97.

- 
- Galil, Z. (n.d.). Efficient algorithms for finding maximum matching in graphs. *ACM Comp. Surv.*
- Gehin, A.L., M. Assas and M. Staroswiecki (2000). Structural analysis of system reconfigurability. In: *Proc. of IFAC Safeprocess'2000*. Vol. 1. pp. 292–297.
- Gertler, J. (1988). Survey on Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants. *IEEE Control System Magazine* **8**(6), 3–11.
- Gertler, J. (1991). Analytical Redundancy Methods in Fault Detection and Isolation, Survey and Synthesis. *IFAC Safeprocess'91, Baden Baden, Germany* **1**, 9–21.
- Gertler, J. (2000). All linear method are equal - and extendable to nonlinearities. In: *Proc. of IFAC Safeprocess'2000*. Vol. 1. pp. 52–63.
- Gertler, J. and R. Monajemy (1995). Generating Directionnal Residuals with Dynamic Parity Relations. *Automatica* **31**(4), 627–635.
- Glad, S.T. (1989). Nonlinear State Space and Input Output Descriptions Using Differential Polynomials. *Lecture Notes in Control and Information Science* **122**, 182–189.
- Grewal, M.S. and A.P. Andrews (1993). *Kalman Filtering - Theory and Practice*. Prentice Hall. Information and System Sciences.
- Guerchouh, D. and M. Staroswiecki (1999). A parity space approach for monitoring inequality constraints, part 2: Dynamic case. Proc. of 14th IFAC World Congress, pages 10-15. Beijing China.
- Guernez-Jean, C. (1998). Surveillance des Systèmes à Modèles Polynomiaux : Generation de Résidus et Étude de Sensibilité. PhD thesis. Université des Sciences et Technologies de Lille 1. France.
- Gusfield, D. and R. Irving (1989). *The Stable Marriage Problem : Structure and Algorithms*. the MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Hall, P. (1935). On representatives of subsets. *J. of London Math. Soc.* (10), 26–30.
- Hammouri, H., M. Kinnaert and E.H. Yaagoubi (1998). Fault Detection and Isolation for State Affine Systems. *European Journal of Control* **4**, 2–16.
- Hammouri, H., M. Kinnaert and E.H. Yaagoubi (1999). Observer Based Approach to Fault Detection and Isolation for Nonlinear Systems. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **44**(10), 1879–1884.

- Hermanns, F. and M. Zarrop (1996). Sliding mode observers for robust sensor monitoring. *Proceedings of the 13th IFAC World Congress* pp. 211–216.
- Hoblos, G. (2001). Contribution à l'analyse de la tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation. PhD thesis. Université des sciences et technologies de Lille.
- Hou, M. and P.C. Muller (1992). Design of observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **37**, 871–875.
- Isermann, R. (1984). Process Fault Detection Based on Modelling and Estimation. *Automatica* **20**(4), 387–404.
- Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems*. Springer Verlag.
- Jones, H. L. (1973). Failure Detection in Linear System. Ph. d thesis. MIT, Cambridge, MA.
- Kaboré, P. (1992). Contribution a la Détection et à l'Isolation de Pannes dans les Systèmes Non-Linéaires. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard, Lyon I. France.
- Keller, H. (1987). Nonlinear Observer Design by Transformation into a Generalized Observer Canonical Form. *Int J. Control* **46**(6), 1915–1930.
- Kinnaert, M. (1999). Robust fault detection based on observers for bilinear systems. **35**, 1829–1842.
- Kinnaert, M. (2003). Fault Diagnosis based on Analytical Models for Linear and Nonlinear Systems - A Tutorial. *Proceedings of IFAC Safeprocess'03, Washington DC (USA)* pp. 37–50.
- Kratz, F. and D. Aubry (2003). Finite memory observer for state estimation of hybrid systems. *Proceedings of IFAC Safeprocess'03, Washington DC (USA)*.
- Krener, A.J. and A. Isidori (1983). Linearization by Output Injection and Nonlinear Observers. *Systems and Control Letters* **3**, 47–52.
- Krener, A.J. and W. Respondek (1985). Non Linear Observers with Linearizable Error Dynamics. *SIAM J. Contr. Optim.* **23**(2), 197–216.
- Krysander, M. and M. Nyberg (2002). Structural analysis utilizing MSS sets with application to a paper plant. Proc. of the Thirteenth International Workshop on Principles of Diagnosis. Semmering, Austria.
- Levant, A. (1998). Robust Exact Differentiation via Sliding Mode Technique. *Automatica* **34**(3), 379 – 384.

- 
- Ljung, L. and S. Glad (1999). On Global Identifiability for Arbitrary Model Parametrizations. *Automatica* **Vol 30**, 265–276.
- Luenberger, D. G. (1971). An Introduction to Observers. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **AC-16**(6), 596–602.
- Lyche, T. and L. L. Schumaker (1974). Procedures for Computing Smoothing and Interpolating Natural Splines. *Communications of the ACM* **17**(8), 463–467.
- Magni, J.F. and P. Mouyon (1994). On Residual Generation by Observer and Parity Space Approaches. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **2**(39), 441–447.
- Manlove, D.F (1999). Stable marriage with ties and unacceptable partners. Technical Report TR-1999-29. University of Glasgow. Computing Science Department.
- Maquin, D., M. Luong and J. Ragot (1997). Fault detection and isolation and sensor network design. *European Journal of Automation* **31**(2), 393–406.
- Marino, R. (1990). Adaptive observers for single output nonlinear systems. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **35**, 1054–1058.
- Marino, R. and P. Tomei (1995). *Nonlinear Control Design - Geometric, Adaptive and Robust*. Prentice Hall. London.
- Massoumnia, M.A. (1986). A Geometric Approach to the Synthesis of Failure Detection Filter. *IEEE Trans. on Aut. Control*, **31**(9), 839–846.
- Mehra, R. and J. Peschon (1971). An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamic system. *Automatica* **7**, 637–640.
- Mrani, R. (2004). Conception d’un module de diagnostic à base des suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques. Application en ligne à un générateur de vapeur.. PhD thesis. Université des Sciences et Technologies de Lille 1. France.
- Murota, K. (1987). *Systems analysis by graphs and matroids*. Algorithm and Combinatorics 3. Springer-Verlag.
- Narasimhan, S. and C. Jordache (1999). *Data reconciliation and gross error detection: an intelligent use of process data*. Gulf publishing compagny.
- Narasimhan, V.S., G. Biswas, G. Karsai, T. Pasternak and F. Zhao (2000). Building observers to handle fault isolation and control problems in hybrid systems. Proc. IEEE Intl. Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Nashville, TN. pp. 2393–2398.

- Nuninger, W., F. Kratz and J. Ragot (1997). Structural Equivalence Between Direct Residuals Based on Parity Space and Indirect Residuals Based on Unknown Inputs Observers. *SAFEPROCESS'97, Hull (Angleterre)* **1**, 462–467.
- Patton, R. J. and J. Chen (1991a). A review of Parity Space Approaches to Fault Diagnosis. *SAFEPROCESS'91, Baden-Baden (Allemagne)* pp. 239–255.
- Patton, R. J. and J. Chen (1991b). A Re-Examination of the Relationships Between Parity Space and Observer-Based Approaches in Fault Diagnosis. *Revue Européenne de Diagnostique et Sécurité de fonctionnement* **1**(2), 183–200.
- Patton, R. J., P. Frank and R. Clark (1989). *Fault Diagnosis in Dynamic Systems*. Prentice Hall.
- Patton, R., P. Frank and R. Clark (2000). *Issues of fault diagnosis for Dynamic Systems*. Springer Verlag.
- Petterson, S. (1999). Analysis and Design of Hybrid Systems. PhD thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg, (Sweden).
- Plestan, F. (1995). Linéarisation par Injection d'Entrée-Sortie Généralisée et Synthèse d'Observateurs. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes. France.
- Powell, M.J.D. (1970). Curve Fitting by Splines in One Variable. pp. 65–83.
- Pulido, B. and C. Alonso (2000). An alternative approach to dependency-recording engines in consistency-based diagnosis. In: *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Vol. 1904. Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications. 9th International Conference, AIMS 2000.. Springer-Verlag, Berlin, Germany. pp. 111–121.
- Ragot, J., D. Maquin and F. Kratz (1993). Analytical redundancy for systems with unknown inputs. application to faults detection. *Control Theory and Advanced Technology* **9**(3), 775–788.
- Ritt, J. F. (1950). *Differential Algebra*. American Mathematical Society, Providence, RI.
- Shields, D. and S. Ashton (1999). *New directions in Nonlinear Observer Design*. Chap. "A fault detection observer for a class of nonlinear systems", pp. 353–373. H. Nijmeijer and T.I. Fossen, editors ed.. Springer-Verlag, London.
- Shumsky, A. (1999). Continuous - time Parity Relation Method for Fault Diagnosis in Nonlinear Uncertain Systems. *ECC'99, Karlsruhe, (Allemagne)*.

- 
- Slotine, J. J. E., J. K. Hedrick and E. A. Misawa (1986). Nonlinear State Estimation Using Sliding Observers. *CDC'86, Athènes (Grèce)* pp. 332–339.
- Spong, M. (1987). Modeling and control of elastic joint robots. *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control* **109**, 310–319.
- Sreedhar, R., B. Fernandez and G. Masawa (1993). Robust fault detection in nonlinear systems using sliding mode observers. *Proceedings of IEEE CCA* pp. 715–721.
- Staroswiecki, M. (2002). Structural analysis for fault detection and isolation and for fault tolerant control. in *Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control*, edited by P.M. Frank and M. Blanke, *Encyclopedia of Life Support Systems. Developed under the auspices of the UNESCO*, Eolss Publishers, Oxford, UK.
- Staroswiecki, M. and D. Guerchouh (1999). Parity space approach for monitoring inequality constraints, part 1: Stac case.. Proc. of 14th IFAC World Congress, pages 5-9. Beijing China.
- Staroswiecki, M. and G. Comtet-Varga (2001). Analytic Redundancy Relations for Fault Detection and Isolation in Algebraic Dynamic Systems. *Automatica* **37**, 687–699.
- Staroswiecki, M., M. Cassar and J.P.H. Declerck (2000). A structural framework for the design of FDI in large scale industrial plants. In: *Issues of fault diagnosis for Dynamic Systems ed. R. Patton, P. Frank, and R. Clark*. Springer Verlag.
- Taillibert, P. (1999). Residual Evaluation without Derivative Computation. *DX'99, Loch Awe (Angleterre)* pp. 617–622.
- Travé-Massuyès, L., T. Escobet and R. Milne (2001). Model-based diagnosability and sensor placement. application to a frame 6 gas turbine subsystem. In: *DX01 twelfth international workshop on principles of diagnosis* (D. T. Dupré S. Mcilraith, Ed.). pp. 205–212.
- Tsao, N.K. (1993). On the Numerical Computation of the Derivatives of a B-Spline Series. *IMA Journal of Numerical Analysis* **13**, 343–364.
- Viswanadham, N. and R. Srichandert (1987). Fault Detection Using Unknown Input Observers. *Control-Theory and Advanced Technology* **3**, 91–101.
- Willsky, A. S. (1976). A Survey of Several Failure Detection Method. *Automatica* pp. 601–611.
- Woodford, C.H. (1970). An Algorithm for Data Smoothing using Spline Functions. *BIT* **10**, 501–510.

- Wünnenberg, J. (1990). Fault Detection in Dynamic Systems. Ph-d thesis. University of Duisburg. Allemagne.
- Zaytoon, J. and et al (1999). Automation of mixed processes–hybrid dynamical systems : Adpm '98. *RAIRO. APII. JESA. Journal européen des systèmes automatisés* **32**, 9–10.
- Zhang, Q., M. Basseville and A. Benveniste (1998). Fault Detection and Isolation in Nonlinear Dynamical Systems: a Combined Input-Output and Local Approach. *Automatica* **34**(11), 1359–1374.

## Quatrième partie

### Annexes

# Chapitre 11

## Sigles et adresses internet

**AS** : Action Spécifique du CNRS. AS 193 "Diagnostic des Systèmes Hybrides" :

<http://www.univ-lille1.fr/lail/AS193> - AS 124 "Etude de systèmes de commande tolérants aux fautes"

**ASPIC** : Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes. Equipe du LAIL, rebaptisée SFSD.

**Authoris** : Automatique pour la Route Intelligente et Sûre. Projet de recherches d'innovation et de transfert.

<http://www.univ-valenciennes.fr/graisyhm/>

**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique.

<http://www.cnrs.fr/>

**CNT** : Conseil National sur les Transports.

<http://www.cnt.fr>

**CSE** : Commission de Spécialistes

**COSY** : Control of Complex Systems, financé par l'European Science Foundation.

<http://www.esf.org/>

**EC Lille** : École Centrale de Lille.

<http://www.ec-lille.fr/>

**EPML** : Équipe projet multi laboratoire.

**FSA** : Faculté des Sciences Appliquées (Université d'Artois, pôle de Béthune)

**GEII** : Génie Électrique et Informatique Industrielle (département d'IUT)

**GDR** : Groupement de Recherche du CNRS. GDR MACS : Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques.

<http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS>

**GRAISyHM** : Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Systèmes Homme-Machine de la région Nord-Pas de Calais.

<http://www.univ-valenciennes.fr/graisyhm>

---

**GRRT** : Groupement Régional Nord-Pas de Calais pour la Recherche sur les Transports. Création en 1983.

<http://www.grrt.org/>

**I3D** : Laboratoire Interaction, Image et Ingénierie de la Décision, FRE 2497. Fusion avec le LAIL en Janvier 2004 pour former le LAGIS UMR 8146.

**IEEE** : The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

<http://www.ieee.org>

**IFAC** : International Federation of Automatic Control. <http://www.oew.ac.at/ifac>. TC-SAFEPROCESS : Technical Committee on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes.

<http://saas.ulb.ac.be/safeprocess/index.html>

**INRETS** : Institut National de Recherche sur les Transports et leur sécurité.

<http://www.inrets.fr>

**IUT** : Institut Universitaire de Technologie

**LAGIS** : Laboratoire d'Automatique, de Génie Informatique et Signal, UMR CNRS 8146, créé en Janvier 2004. Issu de la fusion du LAIL et de I3D.

<http://www.lagis.univ-lille1.fr>

**LAIL** : Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille. UPRESA CNRS puis UMR. Fusion avec I3D en Janvier 2004 pour former le LAGIS UMR 8146.

**RAPL** : Route Automatisée Poids Lourds. Projet financé par la DRAST (Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques)

<ftp://rapl@ftp.groupegis.com/pub>

**RTP** : Réseau Thématique Pluridisciplinaire du CNRS. RTP20 : Fiabilité, diagnostic et tolérance aux fautes des systèmes complexes.

<http://www.lag.ensieg.inpg.fr/rtp20/>

**S3** : Groupe de travail Sûreté, Surveillance, Supervision. Reconnu par le GDR MACS et le GDR ISIS. En lien avec le RTP20.

<http://www.ensem.inpl-nancy.fr/dmaquin/S3>

**SCAS** : Service Commun d'Action Sociale

**SdH** : groupe de travail SDH : Système Dynamique Hybride du GDR MACS.

<http://www.supelec-rennes.fr/sdh/>

**SFSD** : Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques. Equipe du LAIL puis du LAGIS.

**ST2** : Pôle de recherche sur la Sécurité des Transports Terrestres.

<http://www.univ-valenciennes.fr/congres/PoleST2>

**STIC** : Département CNRS Science des Technologies d'Information et de Communication.

<http://www.cnrs.fr/STIC/>

**SuSyH** : Supervision des Systèmes Hybrides, sous-projet du projet TACT-Autoris soutenu par le GRAISyHM, CPER (contrat de plan état/région) 2000-2006.

<http://www.univ-valenciennes.fr/graisyhm/autorissusyh.htm>

**TACT** : Technologie Avancée dans le domaine de la Communication et des Transports Terrestres. Projet du GRAISyHM. Période 2000-2003 du CPER.

<http://www.univ-valenciennes.fr/graisyhm/>

**TRAVEL** : Train de Véhicules. Plate-forme expérimentale du LAGIS.

**USTL** : Université des Sciences et Technologies de Lille.

<http://www.univ-lille1.fr>

**UMR** : Unité Mixte de Recherche du CNRS

**UVHC** : Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrais.

<http://www.univ-valenciennes.fr>

## Chapitre 12

# Tableaux récapitulatifs des publications par année et par thème

### Abréviations utilisées dans les tableaux

- RRA : Relation de Redondance Analytique
- L/NL : Modèle Linéaire/Non Linéaire
- Optim : Optimisation
- Robust. : robustesse vis à vis des perturbations
- SdH : Systèmes dynamiques Hybrides
- MAS : Machine Asynchrone
- MotCC : Moteur à courant continu
- Ship : Ship Propulsion Benchmark (projet COSY)
- Vanne : Vanne du projet DAMADICS

Article	Thème							Application
	RRA	Observateurs Filtres	Type de modèle	Analyse structurale	Estimation des défaillances & Tolérance aux fautes	Optimisation robustesse	SdH	
[CI_90_1]	X		L					
[CI_90_2]	X		L					
[OS_91_1]	X	X	L					
[OS_91_2]	X		L					
[CI_91_1]	X	X	L					
[CI_91_2]	X		L	X		Robust.		
[CI_91_3]	X	X	L			Optim.		
[CI_92_1]	X		L			Optim.		
[CI_93_1]	X		L			Optim.		
[CI_93_2]	X		L			Optim.		
[CI_93_3]	X	X	L			Optim.		
[RI_94_1]	X			X				
[CI_95_1]	X		L			Optim.		
[CI_97_1]	X		L			Optim.		
[CI_97_3]	X		NL	X				MAS
[CI_97_4]	X		NL	X				
[CI_98_1]	X		NL	X				Ship

Article	Thème							Application
	RRA	Observateurs Filtres	Type de modèle	Analyse structurelle	Estimation des défaillances & Tolérance aux fautes	Optimisation robustesse	SdH	
[CI_99_1]	X		NL					MAS
[CI_99_2]	X		NL			Robust.		MAS
[CN_99_1]	X		NL			Optim.		MAS
[OC_00_1]	X	X	NL					
[OC_00_2]	X	X	NL	X	X			
[CI_00_1]	X	X	NL					
[CI_00_2]	X		NL					MAS
[CN_00_1]	X	X	L/NL					MAS
[RI_01_1]		X	NL bilin.			Robust.		
[CI_01_1]		X	NL			Robust.		MotCC
[CI_01_2]		X	NL			Robust.		MAS
[CI_01_3]		X	NL bilin.			Robust.		
[CI_01_4]		X	NL		X	Robust.		
[CN_01_1]	X	X	L/NL					MAS
[CN_01_2]	X	X	L/NL					MAS
[CI_02_1]		X	L, retard			Robust.		
[CI_02_2]		X	NL		X	Robust.		
[CI_02_3]	X	X	NL					MotCC
[CI_02_4]		X	NL retard		X			
[CI_02_5]			NL défaut					MAS
[CI_02_6]			NL défaut					MAS

Article	Thème							Application
	RRA	Observateurs Filtres	Type de modèle	Analyse structurelle	Estimation des défaillances & Tolérance aux fautes	Optimisation robustesse	SdH	
[RI_03_1]			NL défaut					MAS
[RI_03_2]		X	L, retard			X		
[RN_03_1]			NL défaut					MAS
[CI_03_1]		X	NL		X			
[CI_03_2]	X		L				X	
[CI_03_3]	X		NL Défaut.	X				Vanne
[CI_03_4]		X	NL					Transports
[CN_03_1]	X			X				Vanne
[RI_04_1]		X	NL		X	X		
[RI_04_2]		X	NL		X	X		
[RI_04_3]	X			X				Vanne
[RI_04_4]	X	X	NL					MotCC
[CI_04_1]	X		NL				X	
[CI_04_2]	X	X	NL	X				Pompe
[CI_04_3]	X			X				Vanne
[CI_04_4]	X		NL				X	
[CI_04_5]	X			X				Vanne
[CI_04_6]		X	NL					Transport
[CI_04_7]								Transport
[CI_04_8]	X			X				
[RIS_??_1]		X	NL		X	X		
[RIS_??_2]	X	X	NL	X				Pompe
[RIS_??_3]	X			X				Vanne

## Chapitre 13

# Tableaux récapitulatifs des enseignements par année

**Remarque 13.0.1** *Les volumes horaires indiqués par matière sont exprimés en heures effectives. Le nombre total d'heures effectuées est indiqué en heures équivalent TD (1h cours = 1h30 éq. TD, 1h TP = 0.75h éq. TD). Ce nombre inclus les encadrements de stage ou de projets.*

	Moniteur d'initiation à l'enseignement supérieur (USTL-UFR IEEA)		ATER EUDIL
	1989-1990	1990-1991	1992-1993
TP d'automatique (Régulation continue à l'aide de Fonctions de Transfert)	DESS double compétence (24h) Licence EEA (2×21h)	Licence EEA (2×21h)	1ère année (3×21h) 2ème année (3×21h)
TD de systèmes séquentiels (GRAF CET)			1ère année (2×20h)
TP de systèmes séquentiels (GRAF CET)	Licence EEA (21h)	Licence EEA (21h)	1ère année (3×21h)
TD de signaux, circuits et systèmes (SCS)			1ère année (2×15h)
TP de physique		DEUG A(30h)	
Total	64h	64h	192h

	Maître de Conférences à l'IUT de Béthune - dépt. GEII			
	1993-1994	1994-1995	1995-1996	1996-1997
Cours d'Automatique (Régulation continue à l'aide de Fonctions de Transfert)			IUT 2ème année (12h)	IUT 2ème année (12h)
TP d'automatique (Régulation continue à l'aide de Fonctions de Transfert)	IUT 2ème année (12×21h : 3 séries différentes)	IUT 2ème année (9×21h : 3 séries différentes)	IUT 2ème année (6×21h : 3 séries différentes)	IUT 2ème année (6×21h : 3 séries différentes)
TD d'Automatique (Régulation continue à l'aide de Fonctions de Transfert)	Licence IE (24h)	Licence IE (24h)	Licence IE (24h)	Licence IE (24h)
TD et TP d'automatique (Espace d'état : estimation et commande)		Maîtrise EEA (20hTP, 24hTD), Prép. à l'Agrég. de GE (24h)	Maîtrise EEA (20hTP, 24hTD), Prép. à l'Agrég. de GE (24h)	Maîtrise EEA (20hTP, 24hTD), Prép. à l'Agrég. de GE (24h)
TD programmation structurée	Licence IE (12h)	Licence IE (12h)		
TP programmation structurée	Licence IE (16h)	Licence IE (16h)	Licence IE (24h)	Licence IE (24h)
Cours et TD d'architecture des ordinateurs	IUP Productive(28h) Formation continue DEUP (28h)			
Total	300	310	320	320

	Maître de Conférences à l'IUT A de Lille - dépt. GEII			
	1997-1998	1998-1999	1999-2000	2000-2004
Cours et TD d'Automatique (Régulation continue à l'aide de Fonctions de Transfert)	Licence SPI (24h C/TD)	Licence SPI (20h C/TD)	Licence SPI (24h C/TD)	IUT 2ème année (21hC, 2×24hTD)
TD et TP d'automatique (Espace d'état: estimation et commande)	Maîtrise EEA (20hTP, 24hTD) Prép. à l'Agrég. de GE (24h)			
TP d'automatique (Régulation continue à l'aide de Fonctions de Transfert)	IUT 2ème année (9×21h : 3 séries), IUP QEPI (21h)	IUT 2ème année (21h), Licence SPI (21h)	IUT 2ème année (21h)	IUT 2ème année (21h)
TD et TP programmation structurée	IUT 1ère année (2×26hTP)	IUT 1ère année (2×26hTP)	IUT 1ère année (10hTD, 24hTP)	IUT 1ère année (10hTD, 24hTP)
Cours architecture des ordinateurs (systèmes numériques)				IUT 1ère année (2×11h)
TD et TP de systèmes numériques (logique câblée combinatoire et séquentielle, logique programmée: VHDL à partir de 2003)		IUT 1ère année (2×42hTP, 2×26hTD)	IUT 1ère année (2×42hTP, 2×26hTD)	IUT 1ère année (42hTP, 26hTD).
TP et TD de systèmes séquentiels, GRAFCET	IUT 2ème année (21h TP, 20h TD)	IUT 2ème année (21h TP, 20h TD)		
TP Supervision				IUT 2ème année depuis 2002 (10h)
Total	315	320	320	entre 310 et 330 (2000-2003) puis 240 en 2003-2004



# Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes

## Résumé

Résumé en Français ...[A COMPLETER](#)

# Contribution for FDI in complex industrial systems

## Abstract

Abstract in English ....[A COMPLETER](#)

