



UFR Sciences et Techniques Mathématiques Informatique Automatique
Ecole Doctorale IAEM Lorraine



CNRS UMR 7039

Habilitation à Diriger des Recherches

Université Henri Poincaré, Nancy 1
(spécialité Automatique)

présentée par

Didier THEILLIOL

Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

Contribution à l'étude et au développement des systèmes tolérants aux défauts : diagnostic et accommodation à base de modèles linéaires et au-delà

soutenue publiquement le 10 décembre 2003

Composition du jury :

Président :

D. Maquin Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy

Rapporteurs :

L. Foulloy Professeur à l'Université de Savoie, Annecy
J. Quevedo Professeur à l'Université Polytechnique de Catalogne, Barcelone
J.C. Trigeassou Professeur à l'Université de Poitiers

Examineurs :

J.M. Flaus Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble
D. Sauter Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

Remerciements

Je tiens à remercier très sincèrement Laurent FOULLOY, Professeur à l'Université de Savoie, Annecy, Joseba QUEVEDO, Professeur à l'Université Polytechnique de Catalogne, Barcelone et Jean Claude TRIGEASSOU, Professeur à l'Université de Poitiers d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Je leur suis reconnaissant de l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour l'avoir examiné avec attention. Leurs remarques constructives soulèvent de nombreux sujets de réflexion et sont pour moi d'une grande utilité.

Mes remerciements vont à Jean Marie Flaus, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, qui a accepté d'examiner ce manuscrit. Je voudrais également exprimer toute ma reconnaissance à Didier Maquin, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, pour avoir examiné avec attention mes travaux. Je souhaite que nos échanges conservent le caractère bénéfique qu'ils ont eu.

Enfin, je tiens tout particulièrement à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à Dominique Sauter, Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sous sa conduite. Je lui suis extrêmement reconnaissant de m'avoir accordé confiance et autonomie, de se montrer disponible, patient et chaleureux. Son enthousiasme et ses compétences m'ont donné l'envie d'apprendre et d'apprendre à apprendre.

Qu'Alain Richard, Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, soit également remercié pour les conseils dont il m'a fait bénéficier, pour le soutien qu'il a toujours su me témoigner et pour sa cordialité.

Finalement, je ne saurais terminer sans que soient remerciées toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail, par leur soutien moral, administratif, technique avec une mention particulière pour les étudiants qui par leurs travaux ont permis l'avancement de cette recherche, sans oublier Michel Robert, Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, qui m'a incité, un jour de Février 1990 à venir le rejoindre pour une aventure de trois années, aventure qui se poursuit encore aujourd'hui.

Table des Matières

Avant-propos	3
Première Partie : Notice d'activités	7
1 - Situation civile et administrative	9
1.1 - Etat civil	9
1.2 - Situation professionnelle	9
1.3 - Expérience professionnelle	10
1.4 - Formation	10
2 - Activités de recherche et d'encadrement	13
2.1 - Introduction	13
2.2 - Description synthétique des activités scientifiques	15
2.3 - Encadrement de chercheurs	20
2.3.1 - Thèses en cours d'encadrement	20
2.3.2 - Thèses encadrées - soutenues	21
2.3.3 - DEA - Master of Sciences - Ingénieur CNAM	21
2.4 - Réalisations informatiques, coopérations industrielles, valorisation	23
2.5 - Rayonnement scientifique et collaboration	25
2.5.1 - Séjours de recherche à l'étranger et principales collaborations	25
2.5.2 - Participation à des projets européens, à des groupements de recherche et de conseils	26
2.5.3 - Participation à l'organisation de congrès et à des sessions invitées	27
2.6 - Lecteur de revues ou conférences	28
2.7 - Membre de jury	29
3 - Activités d'enseignement	31
3.1 - Activités pédagogiques	31
3.2 - Responsabilités Administratives	33
4 - Liste des publications et des travaux	35
4.1 - Revues Internationales avec comité de lecture	35
4.2 - Rapports de fin de Contrat	36
4.3 - Conférences Internationales avec comité de lecture et actes	36
4.4 - Conférences Nationales avec comité de lecture et actes	41
4.5 - Conférences Internationales Sans comité de lecture	42
4.6 - Conférences Nationales Sans comité de lecture	42
Seconde Partie : Description des travaux de recherche	43
1 - Préambule	45
2 - Méthodes de décision efficiente en terme d'isolation de défauts.	51
2.1 - Introduction générale au diagnostic à base de modèles.	51
2.2 - Le modèle ontologique du diagnostic : un cadre générique pour une décision efficiente.	56
2.2.1 - Introduction	56
2.2.2 - Définition et conception du modèle ontologique du diagnostic	58
2.2.3 - Diagnostic de défauts d'un moteur à courant continu	60
2.2.4 - Conclusion	64
2.3 - Méthode de décision robuste par intégration de connaissances quantitatives et qualitatives ...	65
2.3.1 - Introduction	65

2.3.2 - Synthèse de la méthode de décision robuste	67
2.3.3 - Application au diagnostic de défauts capteurs	73
2.3.4 - Conclusion	77
2.4 - Conclusion	78
3 - Analyse et synthèse de méthodes de détection, isolation, estimation et accommodation de défauts. ...	79
3.1 - Introduction	79
3.2 - Représentation des systèmes en présence de défauts à base de modèles analytiques	80
3.3 - Détection, isolation et estimation des défauts par découplage exact	85
3.3.1 - Introduction	85
3.3.2 - Système linéaire	85
3.3.3 - Système non linéaire	89
3.3.4 - Système non linéaire représenté sous forme d'une combinaison convexe	93
3.3.5 - Conclusion	103
3.4 - Accommodation de défauts par rejet de perturbations.	103
3.4.1 - Introduction	103
3.4.2 - Système linéaire	104
3.4.3 - Système non linéaire représenté sous forme d'une combinaison convexe	106
3.4.4 - Système non linéaire représenté sous forme exacte	109
3.4.5 - Conclusion	110
3.5 - Application à un benchmark : le système des trois cuves	111
3.5.1 - Introduction	111
3.5.2 - Description et modèle mathématique du système	112
3.5.3 - Résultats et Commentaires	114
3.5.4 - Conclusion	123
3.6 - Conclusion	123
Troisième Partie : Perspectives de recherche	125
Quatrième Partie : Références bibliographiques	133
Cinquième Partie : Publications significatives	153
D. Theilliol, J.C. Ponsart, J. Harmand, C. Join, P. Gras. <i>CEP 2003</i>	157
D. Theilliol, H. Noura, J.C. Ponsart. <i>ISA Transactions 2002</i>	173
H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin, D. Theilliol. <i>IEEE CSM 2000</i>	193
M.A. Medina, D. Theilliol, D. Sauter. <i>SAFEPROCESS 2003</i>	213

Avant-propos

Le mémoire¹, intitulé “*Contribution à l’étude et au développement des systèmes tolérants aux défauts : diagnostic et accommodation à base de modèles linéaires et au-delà*”, dresse un panorama de mes travaux de recherche entrepris depuis ma nomination en qualité de Maître de Conférences à l’Université Henri Poincaré, Nancy 1 en 1994 ; travaux de recherche théorique, méthodologique et appliquée qui s’inscrivent au sein du groupe thématique “Surveillance et Détection de Défauts”, menés sous la responsabilité du Professeur Dominique SAUTER, au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN - CNRS UMR 7039 dirigé par le Professeur Francis LEPAGE).

Dans ce mémoire, je tente de restituer toute la passion et l’énergie, que j’ai déployées pour aborder et appréhender le diagnostic de défauts, thème de recherche récent, par comparaison à l’identification ou la commande par exemple. La récente parution de livres consacrés au diagnostic témoigne de la jeunesse de ce thème de recherche. Ma démarche scientifique a consisté à découvrir le diagnostic de défauts dans son ensemble. Les premiers travaux méthodologiques et appliqués ont été dédiés au développement et à la mise en œuvre pratique d’une boîte à outils logiciels, intégrant des techniques avancées de diagnostic de défauts en temps réel. Soucieux de pouvoir informer de manière correcte l’utilisateur de la présence des défauts, je synthétise des méthodes de décision efficace, en terme d’isolation, par la caractérisation des méthodes internes du diagnostic sous forme de modèle ontologique et par l’intégration de données qualitatives et quantitatives. Mais, plutôt que de générer des informations exploitées uniquement par un opérateur, pourquoi ne pas les intégrer dans une boucle de régulation de telle sorte qu’autour d’un point de fonctionnement le diagnostic de défauts devienne un acteur au sein de la boucle fermée? Très attaché à proposer des solutions en réponse à cette question, je choisis d’orienter ma recherche vers l’étude des systèmes tolérants aux défauts, expression définissant la problématique à résoudre. De même, pourquoi étudier uniquement les systèmes linéaires alors que les procédés qui nous entourent sont généralement plus complexes? Ainsi, je propose de vous faire découvrir, dans ce mémoire, mes travaux de recherche, consacrés à l’étude et au développement de méthodes de diagnostic et d’accommodation au-delà des procédés représentés par des modèles analytiques linéaires.

Le mémoire se décompose selon les cinq parties suivantes :

- la première partie, “*Notice d’activités*”, présente une synthèse de mes activités d’enseignement, de recherche, d’encadrement et de fonctions administratives, de coopérations et collaborations industrielles, et responsabilités collectives. Une liste bibliographique énumère, en fin de partie, les travaux dont je suis auteur ou co-auteur.

1.L’intégralité de ce document, au format informatique pdf, ainsi que les publications personnelles et également les citations en référence non soulignées, présentes dans la quatrième partie peuvent être obtenues en accès restreint à l’adresse suivante http://gtident.cran.uhp-nancy.fr/hdr_dt/ muni du login: jury et du mot de passe: theilliol

- la seconde partie, “**Description des travaux de recherche**”, est entièrement consacrée à une présentation de mes travaux scientifiques. Comme je le précise dans l’introduction générale, ces activités de recherche contribuent à l’étude et au développement des systèmes tolérants aux défauts au-delà des procédés représentés par des modèles analytiques linéaires. Mes travaux scientifiques concernent, dans une première étape, le développement de méthodes de décision efficiente, en terme d’isolation de défauts, et dans une seconde étape, l’analyse et la synthèse de méthodes de diagnostic de défauts par découplage exact et de techniques d’accommodation de défauts par le principe de compensation. Tout au long de cette partie, je m’applique à décrire, de manière la plus complète possible, le positionnement de mes travaux au sein de la communauté scientifique du domaine. L’objectif scientifique suivi est de décrire nos contributions sans obligatoirement présenter tous les détails techniques accessibles dans les articles publiés.

- la troisième partie, “**Perspectives de recherche**”, propose de nouveaux axes de recherche à cours, moyen et long terme alliant les connaissances acquises et une réflexion sur les besoins futurs permettant d’envisager et de mettre en place de nouveaux axes de recherche.

- la quatrième partie, “**Références bibliographiques**”, réunit les articles de bibliographie pour l’ensemble du document.

- la cinquième et dernière partie, “**Publications significatives**”, est constituée de quatre articles donnant une vue d’ensemble, représentative de mes travaux de recherche.

Dans ce mémoire, les citations bibliographiques se rapportant aux articles qui nous ont guidés dans nos recherches sont regroupées dans la quatrième partie entre crochets avec le nom des auteurs ainsi que l’année de publication. Les autres références mentionnées concernent les travaux que j’ai réalisés ou encadrés et sont détaillés dans la première partie. Le préfixe précise la nature de référence : **RI** ou **RC** signale une Revue Internationale avec comité de lecture ou un Rapport de fin de Contrat, **CI** ou **CN** indique une Conférence Internationale avec comité de lecture et actes ou une Conférence Nationale avec comité de lecture et actes, **Th** et **DEA** ou **CNAM** ou **MS** sont relatifs aux thèses et mémoire de stages de DEA ou CNAM ou Master.

Première Partie :

Notice d'activités

1 - Situation civile et administrative

1.1 - Etat civil

Didier THEILLIOL

né le 29 août 1967 à Sézanne (Marne)

de nationalité française, marié, deux enfants

service national effectué en tant que Volontaire de Formation en Informatique

Adresse personnelle :

14, rue de la Chapelle

54330 Houdreville

Tél.: 03 83 26 25 93

Adresse professionnelle :

Faculté des Sciences et Techniques

CRAN - BP 239

54506 Vandoeuvre cedex

Tél. : 03 83 68 44 65 - fax : 03 83 68 44 62

courriel : didier.theilliol@cran.uhp-nancy.fr

1.2 - Situation professionnelle

<i>Grade</i>	Maître de Conférences nommé le 1 septembre 1994 titulaire en 1995
<i>Section</i>	61ème (Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal)
<i>Emploi</i>	n°0925 à l'Université Henri Poincaré Nancy 1 Enseignant à l'Institut Universitaire Professionnalisé - Génie Electrique et Informatique Industrielle de la Faculté des Sciences et Techniques Membre du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN - CNRS UMR 7039 dirigé par le Professeur Francis LEPAGE)
<i>Classe</i>	Normale
<i>Echelon</i>	5ème à compter du 1 juillet 2001 (à titre indicatif 1 ^{ère} classe - locale obtenue en 1998)
<i>Divers</i>	Bénéficiaire d'un contrat d'Encadrement Doctoral et de Recherche depuis septembre 2000 Autorisé à co-diriger des recherches à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 depuis février 2002

1.3 - Expérience professionnelle

- 1993-1994 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 au sein de l'Institut Universitaire Professionnalisé - Génie Electrique et Informatique Industrielle de la Faculté des Sciences et Techniques (192h TD).
- 1992-1993 : Service national effectué du 01/10/92 au 31/07/93 en qualité de Volontaire de Formation en Informatique dans un organisme de formation continue Gerape Asfo (Maxéville 54).
- 1991-1992 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 au sein de l'École Supérieure des Sciences et Technologies de l'Ingénieur de Nancy (ESSTIN) (192h TD).
- 1990-1991 : Agent Temporaire Vacataire à l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Nancy-Longwy (80h dédiées à l'encadrement des travaux dirigés d'Électricité au groupe SYRIE VII - année préparatoire de l'IUT Département Génie Électrique)
- 1990-1991 : Agent Temporaire Vacataire à l'ESSTIN (16h dédiées à l'animation des travaux dirigés de Logique auprès des élèves de deuxième année)

1.4 - Formation

- 1993 : Doctorat de l'Université de Nancy 1, spécialité Automatique
Mention Très Honorable avec Félicitations du jury
Thèse effectuée au sein du CRAN sous la direction du Pr Michel ROBERT intitulée "Identification de systèmes SISO linéaires et non linéaires par réseaux de neurones multicouches"
Soutenue le 23 septembre 1993 devant la commission d'examen :
Président :
C. HUMBERT, Professeur à l'Université Henri Poincaré Nancy 1 (61è)
Rapporteurs :
A. BILLAT, Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne (61è)
J.C. TRIGEASSOU, Professeur à l'Université de Poitiers (61è)
Examineurs :
F. ALEXANDRE, Chargé de Recherche INRIA Lorraine (27è)
G. BLOCH, Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré Nancy 1 (61è)
M. ROBERT, Professeur à l'Université Henri Poincaré Nancy 1 (61è)
- 1990 : Diplôme d'Études Approfondies
spécialité Métrologie Automatique Électrotechnique option Automatique
Université Henri Poincaré, Nancy 1 - Mention Bien
- 1989 : Maîtrise Électronique Électrotechnique Automatique
Université de Reims Champagne-Ardenne - Mention Assez Bien

1988 : Licence Électronique Électrotechnique Automatique
Université de Reims Champagne-Ardenne

1987 : Diplôme d'Études Universitaires Générales
mention Sciences section "A" Sciences des Structures et de la Matière
Université de Reims Champagne-Ardenne

2 - Activités de recherche et d'encadrement

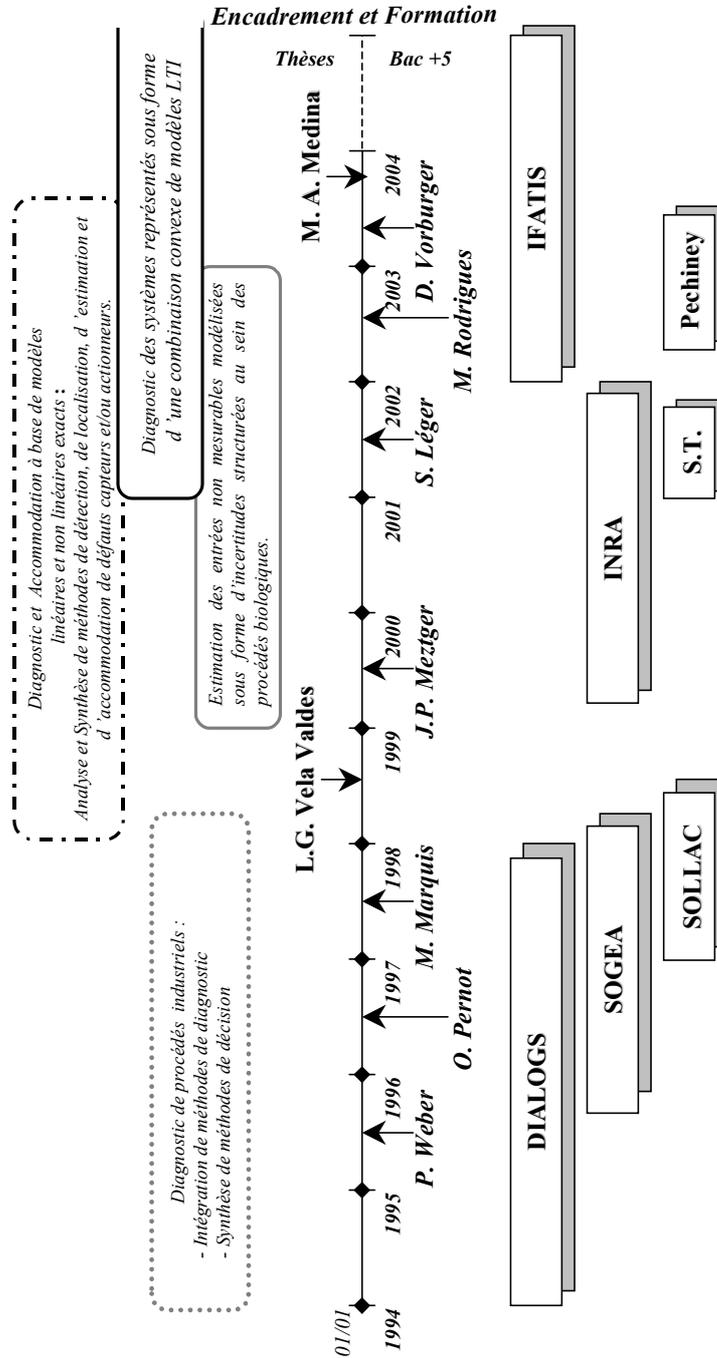
2.1 - Introduction

Depuis ma nomination en tant que Maître de Conférences en septembre 1994, mes activités de recherche et d'encadrement m'ont conduit à une réorientation thématique par rapport aux travaux entrepris au cours de la préparation de ma thèse soutenue en septembre 1993 qui traitait de l'«*Identification de systèmes SISO linéaires et non linéaires par réseaux de neurones multicouches*». Ce travail est valorisé par différentes publications dans des congrès ([CI_1], [CI_2], [CI_3], [CI_4] et [CI_5]) ainsi que dans une revue ([RI_1]). Depuis cette date, ces activités sont menées sous la responsabilité du Professeur Dominique SAUTER au sein du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN - CNRS UMR 7039 dirigé par le Professeur Francis LEPAGE <http://www.cran.uhp-nancy.fr>). Parmi les six thèmes de recherche développés au CRAN (Commande et Observation des Systèmes, Conception des Systèmes Sûrs de Fonctionnement, Ingénierie pour la Santé, Instrumentation, Robotique, Images, Signaux, Productique et Automatisation des Procédés Discrets, Surveillance et Détection de Défauts), mes travaux de recherche s'inscrivent au sein du groupe thématique «Surveillance et Détection de Défauts». Ils traitent dans leur début, dans le cadre de ma réorientation thématique, de l'intégration de méthodes de diagnostic de défauts en temps réel et me conduisent à développer des méthodes de décision efficiente en terme d'isolation par l'intégration de données qualitatives et quantitatives et également par la caractérisation des méthodes internes du diagnostic sous forme de modèle ontologique. Après avoir contribué à la robustesse des méthodes de décision, je concentre mes activités de recherche sur la résolution des problèmes de la détection, de l'isolation, et de l'estimation de défauts, essentiellement capteur ou actionneur, au sein de systèmes décrits à partir de modèles linéaires ou non linéaires exacts. L'intérêt porté au diagnostic à base de modèles trouve une autre dimension dans l'analyse et la synthèse de méthodes spécifiques et déterminantes pour l'accommodation de défauts au sein de systèmes en boucle fermée. Ces activités de recherche, liées au diagnostic à base de modèles linéaires ou non linéaires exacts, m'ont engagé vivement à étudier le diagnostic de défauts au sein de systèmes représentés sous forme de modèles linéaires invariants interpolés, que je préfère définir, conformément aux propriétés mathématiques des coefficients d'interpolation considérés, par l'expression, systèmes représentés sous forme d'une combinaison convexe de modèles LTI. Les compétences acquises dans le domaine de l'isolation et l'estimation des défauts m'ont amené à fortement m'impliquer dans la résolution de la problématique de l'estimation des entrées non mesurées ou non mesurables, information essentielle au bon fonctionnement des bioprocédés.

Le synoptique suivant illustre de manière synthétique mes activités de recherche, d'encadrement, et mes missions en relation avec le monde industriel. Les paragraphes suivants sont consacrés au développement de l'ensemble de ces activités.

Projet de Recherche

Contrat et Collaboration



2.2 - Description synthétique des activités scientifiques

Au début des années 1990, un grand nombre de méthodes de détection et d'isolation de défauts ont été développées, il faut noter que le premier *Symposium IFAC* consacré au diagnostic voit le jour en 1991 (*Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS, Baden-Baden, Allemagne*). Certains ouvrages consacrés au domaine sont publiés ([Patton et al., 1989]), et certaines communications de référence, établissant un état de l'art sur le diagnostic, apparaissent dans des revues de qualité ([Frank, 1990] ou [Gertler, 1991]). Une partie de la communauté scientifique, intéressée par le problème du diagnostic, s'accorde pour combler le fossé séparant le développement théorique et la mise en oeuvre pratique de ces méthodes de détection et d'isolation de défauts sur des installations réelles, en collaborant dans un projet européen EUREKA MAINE DIALOGS EU 96 (Diagnostics with LOGistics support for systems Supervision de 1994 à 1997). L'objectif de DIALOGS consiste en l'élaboration d'une boîte à outils logiciels intégrant des techniques avancées de diagnostic de défauts en temps réel, conçue selon une approche modulaire, basée sur des cellules de diagnostic génériques pour répondre à une large gamme de processus industriels. C'est dans ce contexte et sous la conduite du Professeur Dominique SAUTER, que je m'implique, dès ma nomination, au sein de ce projet dont l'objectif intrinsèque est d'améliorer la qualité et la flexibilité de la surveillance, pour garantir la sécurité et faciliter la maintenance des systèmes industriels. En 1995, le développement des modules constituant DIALOGS, à l'interface entre recherche méthodologique et technologique, m'est confié. La responsabilité de ce projet constitue une expérience professionnelle indéniable, me permettant d'appréhender le fonctionnement et les limites des méthodes spécifiques de détection et de localisation de défauts ainsi que de leur combinaison dans le but de fournir une aide déterminante à l'opérateur dans le processus de prise de décision. La coordination et la répartition des tâches ont représenté un travail permanent. Cette mission m'a amené à rédiger des documents et des notices techniques, mais aussi à définir et concevoir des interfaces graphiques adéquates et utiles lors de la phase de configuration, soit la rédaction de plus de 25 rapports confidentiels ainsi qu'une participation à des congrès internationaux ([CI_12] et [CNS_1]). En parallèle, de juillet 1996 à début 1998, je contribue à la mise en oeuvre d'un système de diagnostic de pannes au sein du centre de traitement des eaux usées de la ville de NANCY (contrat portant sur 3 ans avec la société SOGEA [RC_2]). Ce site de traitement constitue une plate-forme industrielle pilote pour l'évaluation du progiciel DIALOGS ([CI_21], [CI_15] et [CIS_3]). En outre, ce projet me conduit à participer activement à l'encadrement de jeunes "apprentis" chercheurs ([DEA_Weber], [DEA_Pernot] et [DEA_Marquis]) préparant un DEA Automatique et Traitement Numérique du Signal sur le thème du diagnostic des systèmes complexes.

Ces travaux de recherche appliquée m'ont conduit à développer des méthodes d'isolation de défauts réduisant les fausses alarmes, robustes aux erreurs de modélisation et permettant également de rendre plus efficiente la prise de décision en présence de défauts. La méthode développée repose sur l'intégration de données qualitatives et quantitatives ([CI_13], [CI_9], [CI_7] et [CIS_2]) à partir du calcul de la distance de hamming entre le vecteur de cohérence modifié, issu de l'évaluation des résidus et le vecteur de signature de défauts provenant de la base de connaissance. Les systèmes de diagnostic à base de modèles s'appuyant généralement sur des méthodes où le modèle utilisé est de type unique et figé (modèle analytique, numérique, symbolique, logique), j'entreprends par ailleurs des travaux de recherche, durant

l'encadrement de la thèse de L.G. Vela Valdès ([TH_Vela-Valdes]), portant sur l'élaboration d'une approche fonctionnelle pour la localisation de défauts en diagnostic suivant différents points de vue. Cette approche repose sur une classification des connaissances issues du système afin de détecter et localiser les défauts vis-à-vis des caractéristiques les plus représentatives de son comportement. L'objectif de ce travail de recherche a consisté en une meilleure structuration de la connaissance, des moyens et des outils dont l'automaticien dispose face à un problème de diagnostic afin d'augmenter le nombre de défauts à localiser. L'approche fonctionnelle considérée est utilisée afin de localiser les défauts possédant des signatures identiques. Les caractéristiques les plus représentatives de l'espace de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique sont définies à l'aide d'un modèle ontologique. La fonction, au sein du modèle ontologique, permet d'interpréter autrement la connaissance contenue dans les résidus et les signatures. Cette interprétation repose sur la définition et la spécification d'un cadre générique basé sur une analyse structurelle, comportementale et fonctionnelle des étapes de génération de résidus, d'évaluation de résidus et de décision. Cette approche contribue ainsi à accroître l'efficacité et à "garantir" la qualité du diagnostic selon le niveau de granularité choisi ([CI_14] et [CIS_4]).

Cette période de "formation" aux différentes méthodes de diagnostic a été très enrichissante. Malgré des résultats prometteurs, tant au niveau des travaux de recherche théorique que méthodologique et appliquée (il est à noter qu'il existe actuellement un projet de recherche IMALAIA - *Intégration de Méthodes ALliant l'Automatique et l'Intelligence Artificielle* - dans le cadre de l'action S3 - *Sûreté, Surveillance, Supervision* - menée par le CNRS), j'ai pris la décision de ne pas poursuivre et d'approfondir ces travaux de recherche consacrés au développement de méthodes robustes d'isolation de défauts dans le cadre du diagnostic de défauts au sein de systèmes complexes. Les conséquences de ce choix se mesurent directement par l'absence de valorisation de travaux de recherche en termes de communications en revues nationales ou internationales mais aussi durant cette période par l'existence d'un déséquilibre entre revues et congrès : ce bilan négatif, en terme quantitatif, ne serait en aucun cas nuire à un bilan personnel positif, effectivement je découvre actuellement que les connaissances et l'expérience acquise lors de ces activités de recherche vont être mises à profit dans nos futurs travaux de recherche, développés dans la troisième partie, "*Perspectives de recherche*".

Mes activités de recherche se poursuivent en traitant la problématique du diagnostic de défauts mais uniquement à base de modèles analytiques en concentrant mes travaux sur la génération des résidus ayant comme objectif de détecter, mais aussi de localiser les défauts de type additif (essentiellement capteurs et/ou actionneurs) sans négliger d'estimer leur amplitude. L'expérience acquise ayant mis en exergue que le diagnostic de défauts est nécessaire mais n'est pas suffisant pour garantir la sûreté de fonctionnement de l'installation et la sécurité des opérateurs (l'opérateur, seul boucle de retour active, opérant sur le système en défaut n'étant pas le levier optimal pour agir sur le système en présence de défauts), je m'intéresse plus particulièrement à la synthèse et à la mise en oeuvre de méthodes de diagnostic à base de modèles pour l'accommodation aux défauts dans le cadre général du contrôle "intelligent". Parmi les chercheurs travaillant dans le domaine du contrôle intelligent, dénommé en anglais *Fault Tolerant Control*, nous pouvons citer le Professeur Staroswiecki de l'Université de Lille 1, le Professeur Patton de l'Université de Hull (Grande Bretagne), le Professeur Jiang de

l'Université de Western Ontario (London, Canada), le Professeur Polycarpou de l'Université de Cincinnati (Etats-Unis), le Professeur Blanke de l'Université d'Aalborg (Danemark), le Professeur Wu de l'Université de Binghamton (Etats-Unis), le Professeur Lunze de l'Université de Hambourg (Allemagne). Les méthodes développées dans les ouvrages et revues scientifiques supposent, pour la plupart, que le modèle du système défaillant soit disponible a priori, hypothèse réductrice, compte tenu du nombre de défauts pouvant affecter le système. D'autres approches consistent à identifier en ligne les paramètres du système défaillant afin de modifier ces paramètres, voire même, la structure de la loi de commande. Malgré les études menées dans le domaine de l'estimation paramétrique à des fins de diagnostic ([Isermann, 1984] et [Bachir et al., 2002]), les problèmes liés à l'identification en ligne des paramètres d'un système, de surcroît en boucle fermée, sont nombreux (absence de signaux d'excitation, présence de bruits, rapidité de convergence des algorithmes d'identification). L'originalité de mes travaux de recherche consiste à traiter la problématique de diagnostic et d'accommodation à base de modèles dans sa globalité sans avoir à connaître l'instant d'occurrence, le type et l'amplitude du défaut. Concernant la méthode d'accommodation, en m'inspirant des travaux de [Noura et al., 1996], je me concentre essentiellement sur la synthèse d'une loi de commande capable de réduire, voire d'annihiler l'effet des défauts du système, sur le principe du rejet de perturbations, et de ce fait, de conduire le système vers les performances nominales initiales afin de maintenir la stabilité du système.

Dans une première étape, je me suis particulièrement intéressé à développer et à mettre en oeuvre des méthodes de détection et d'isolation de défauts actionneurs (une vanne rouillée, un moteur grippé, un convertisseur courant/pression déficient), méthodes inspirées des travaux sur les observateurs à entrées inconnues. Ces méthodes, établies à partir d'un banc d'observateurs d'ordre complet ou réduit sur la base de modèles linéaires à temps invariant, permettent de déterminer l'actionneur en défaut ou défaillant, caractérisé sous forme d'incertitudes structurées, ainsi que par l'instant d'apparition afin de réaliser un contrôle intelligent, fondé sur le principe du rejet de perturbations. Ces perturbations sont considérées comme des défauts dont l'amplitude est estimée à partir d'une représentation d'état du système défaillant. Je me suis attaché à tester et à valider ces méthodes sur un processus pilote réel autour d'un point de fonctionnement : le système des trois cuves ([RI_3]). Soucieux de m'affranchir des problèmes de fausses alarmes et de non détection des défauts liés à la présence d'un étage de diagnostic, je propose une méthode d'accommodation de défauts actionneurs et composants en exploitant l'erreur d'estimation d'état à des fins également d'évaluation de l'amplitude du défaut ([CI_20]). Dans une seconde étape, je m'applique à considérer uniquement l'accommodation aux défauts selon le principe de rejets de perturbations, et j'étends la méthode de compensation aux défauts de type capteur en estimant de manière précise l'amplitude du défaut, soit à partir d'un banc d'observateurs généralisés insensibles aux défauts ([CI_18] et [CI_26]) soit à partir de l'erreur d'estimation d'un unique observateur ([CI_25]), l'estimation de l'état du système restant insensible aux défauts. Dans le cadre de mes activités de recherche, j'ai traité également le diagnostic et l'accommodation de défauts, dans un contexte stochastique, en synthétisant des filtres de Kalman conjugués ([CI_32]) où un défaut, présent au sein d'un capteur, constitue une nouvelle représentation du système. En présence de biais, de dérive, voire même en cas de perte totale d'information sur

un capteur, les méthodes développées ne supposent aucune hypothèse sur le modèle du système après l'apparition du défaut. Attentif à traiter le problème du diagnostic pour l'accommodation dans son intégralité, je développe et synthétise un module unique de détection, de localisation et d'estimation de défauts capteurs et/ou actionneurs. En s'inspirant du fait qu'un défaut capteur peut être considéré comme un pseudo-défaut actionneur, une unique représentation d'état en présence de défauts, modélisés sous forme d'incertitudes structurées, est utilisée afin de construire un observateur d'ordre complet avec l'état de ce dernier asymptotiquement stable et complètement découplé des défauts. Ces stratégies de diagnostic et de compensation sont testées et validées sur des systèmes pilotes réels ([RI_5]) et donnent de bons résultats autour d'un point de fonctionnement, en termes de localisation et de compensation de défauts. Ce module unique de détection, localisation et estimation du défaut basé sur les observateurs à entrées inconnues convient mieux qu'une cellule de détection et isolation différente de celle établissant l'estimation du défaut sans aucun contrôle du gain de l'observateur ([RI_2]). La problématique du diagnostic à base de modèles linéaires à temps invariant, permettant de détecter, mais aussi de localiser les défauts de type capteur et/ou actionneur, sans négliger l'estimation de leur amplitude à des fins d'accommodation, retient mon attention d'où mon intérêt pour de nombreuses techniques de diagnostic telles que l'estimation d'état de systèmes à entrées inconnues, la conception d'observateurs robustes vis-à-vis d'incertitudes structurées, ainsi que la génération de résidus robustes basée sur la redondance temporelle à partir de l'espace de parité. Cela me conduit également à développer une méthode de compensation de défauts, dédiée uniquement aux actionneurs, sans oublier bien entendu, celle effectuée sur les travaux réalisés dans le cadre de défauts de capteurs, en substituant l'information du capteur physique par celle issue d'un capteur logiciel ou informationnel.

Mes activités de recherche m'ont amené à considérer essentiellement le diagnostic de systèmes linéaires ou linéarisés autour de point de fonctionnement. L'arrivée de Jean Christophe PONSART, en 1996, au sein du groupe thématique "Surveillance et Détection de Défauts" avec ses compétences dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires par retour d'état linéarisant, me permet, dans le cadre d'un travail commun, d'étendre le diagnostic de défauts aux systèmes non linéaires ([CI_27]). L'accommodation de défauts additifs découplés, sous l'hypothèse de considérer un modèle non linéaire exact du procédé ([CI_31] et [CI_24]) est également examinée et développée. La méthode d'accommodation de défauts actionneurs et composants, développée en réinjectant l'erreur d'estimation dans la loi de commande, présentée dans la publication [CI_20], est étendue au cas des systèmes non linéaires ([CI_30]). Cependant, il n'est effectivement pas envisageable, quel que soit le système, d'établir un modèle non linéaire valide sur la totalité de la plage de fonctionnement d'un système, ou même d'obtenir une modélisation non linéaire parfaite. Par conséquent, sous l'hypothèse que le comportement dynamique du processus à surveiller peut être modélisé par différents modèles linéaires autour de différents points de fonctionnement, je traite désormais la problématique du diagnostic de défauts et la sélection robuste du modèle actif le plus représentatif du système non linéaire sous forme d'une combinaison convexe de modèles LTI. De plus, m'attachant toujours à vouloir combler le fossé entre le développement théorique des méthodes de diagnostic et d'accommodation et leur mise en oeuvre pratique sur des installations réelles, une analyse sur le thème, effectuée à partir d'une recherche

bibliographique, m'indique clairement qu'un grand nombre de stratégies de commande appliquées au milieu industriel sont définies à l'aide de commandes du type "gain scheduling" et/ou multicontrôleurs sous forme de lois de commande conjuguées ou également passage brusque d'un contrôleur à l'autre ([Murray-Smith et Johansen, 1997], [Leith et Leithead, 2000] et [Stiwell et Rugh, 1999]). Cette étude bibliographique a permis de mettre en exergue que les méthodes traitant de la problématique du diagnostic et de l'accommodation dédiées à des systèmes non linéaires décrits suivant une approche multimodèle, ont été très rarement considérées. Le développement et la synthèse de techniques de détection et de localisation de défauts présents au sein des systèmes multivariables représentés sous forme convexe, constituent un axe de recherche innovant, qui s'inscrit directement dans les préoccupations actuelles de la communauté scientifique en terme de diagnostic, permettant aussi de considérer l'accommodation pour ce type de systèmes. Au sein du groupe thématique "Surveillance et Détection de Défauts", j'ai contribué à montrer que l'utilisation conjointe de filtres de Kalman fonctionnant en parallèle et d'un sélecteur heuristique capable de déterminer à tout instant le mode de fonctionnement dans lequel se trouve le système, permet d'augmenter la sensibilité aux défauts de capteurs tout en diminuant les erreurs de modélisation afin de sélectionner le modèle le mieux adapté ([CI_22] et [CI_19]). Les travaux de recherche entrepris récemment, initiés lors de l'encadrement d'un étudiant préparant un DEA [DEA_Léger], démontrent que nous ne devons en aucun cas considérer un seul et unique observateur, filtre ou résidu, comme prescrit par [Gertler, 1998] et [Chen et Patton, 1999], pour résoudre le problème de la détection, isolation et estimation de défauts au sein de systèmes non linéaires décrits par l'interpolation de modèles linéaires invariants dans le temps ([CI_29]). Dans le cadre du travail de thèse de Manuel Adam MEDINA [TH_Medina], nous considérons un banc de filtres d'isolation découplant les défauts, générant une information sensible aux défauts et également aux erreurs de modélisation, et nous développons, ainsi, une méthode capable de détecter, d'isoler et d'estimer les défauts ([CN_2]) ainsi que le point de fonctionnement du système non linéaire décrit par des modèles linéaires multiples ([CI_44] et [CI_40]). Nous nous attachons à étudier la robustesse de notre technique en terme de détection de défauts par rapport aux erreurs de modélisation, sous l'hypothèse que la dynamique du système non linéaire se représente à partir de modèles linéaires interpolés soumis à des incertitudes structurées. Sous ces hypothèses, contrairement à [Chen et Patton, 1999], la génération du coefficient d'interpolation est conçue de manière à être insensible aux défauts. Les résultats issus de ces travaux, datant de début 2003, seront détaillés dans le mémoire de thèse de Manuel Adam MEDINA [TH_Medina].

Les connaissances acquises dans le domaine du diagnostic à base de modèles permettant de détecter, de localiser les défauts et d'estimer leur amplitude, m'ont conduit à m'intéresser aux techniques d'estimation des entrées inconnues modélisées sous forme d'incertitudes structurées au sein des procédés biologiques, dans le cadre d'une collaboration initiée par Christophe AUBRUN, entre le CRAN et le Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE) de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) situé à Narbonne. Comme le décrivent [Bastin et Dochain, 1990], les réactions intervenant dans les procédés biologiques sont en général représentées par des modèles complexes, obtenus à partir d'équations de bilan, qui décrivent les évolutions de population d'organismes vivants. Des variations accidentelles des composants actifs, en entrée du réacteur, dues à des défauts d'instrumentation ou des perturbations ont pour effet de provoquer, dans certains cas, la disparition de certaines

populations de bactéries rendant impossible toute réaction. Le manque de moyens de mesure en ligne des différentes variables représente le principal obstacle au développement et à l'implantation d'algorithmes de commande et de diagnostic sur les bioréacteurs. Une solution, pour pallier à ce problème, consiste à développer des capteurs informationnels, capables d'estimer en ligne les paramètres fondamentaux inconnus ou d'entrées non mesurables, à partir de la connaissance du modèle dynamique du bioprocédé. C'est, dans ce contexte, que j'initie J.P. Metzger [**CNAM_Metzger**] à la recherche technologique, dans le cadre de son stage d'Ingénieur CNAM, en traitant le problème de suivi en ligne des concentrations en matière organique (vinasse) qui entrent dans un procédé de dépollution fonctionnant en boucle ouverte. Les travaux ont porté sur la synthèse et la mise en oeuvre d'algorithmes spécifiques, issus du domaine de l'automatique, tels les observateurs à entrées inconnues, dédiés à l'estimation en ligne de grandeurs non mesurables assimilées à ces entrées sur la base d'un modèle dynamique du bioprocédé autour d'un point de fonctionnement dans un contexte déterministe ([**CN_1**]). Sous l'hypothèse que les entrées non mesurables soient affines en l'état, je synthétise un observateur non linéaire à entrées inconnues, validé à partir d'une plate-forme de simulation et les données réelles du système biologique, permettant ainsi de développer des capteurs informationnels capables d'estimer les concentrations en matière organique sur toute la plage de fonctionnement admissible ([**RI_6**]). Ces capteurs logiciels sont, également, synthétisés dans un contexte stochastique autour d'un point de fonctionnement à l'aide de filtre de Kalman, découplant de manière optimale les entrées inconnues structurées ([**RI_4**]). Plus récemment, dans le cadre de l'étude des systèmes non linéaires modélisés sous forme d'une combinaison convexe, j'étends le banc de filtres d'isolation développé afin de détecter, d'isoler et d'évaluer l'amplitude des défauts, à l'estimation des entrées inconnues et permettant ainsi de connaître le point de fonctionnement du système non linéaire ([**CI_35**]).

2.3 - Encadrement de chercheurs

Titulaire d'une prime d'encadrement doctoral et de recherche depuis septembre 2000 et autorisé à co-diriger des recherches à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 depuis février 2002, sous la conduite du Professeur Dominique SAUTER, j'assure l'encadrement des travaux de recherche de personnes préparant un DEA, un mémoire d'ingénieur CNAM et un doctorat de l'université et, plus récemment, un Master of Sciences du CENIDET (Mexique). Les sujets de recherche de ces étudiants s'intègrent au sein de mes activités de recherche développées depuis ma nomination.

2.3.1 - Thèses en cours d'encadrement

[TH_Rodrigues]

Mickaël RODRIGUES (*Soutenance prévue en Novembre 2005*)

première année de thèse (allocataire de recherche MJENR, moniteur au CIES)

Son sujet de recherche porte sur le “*Diagnostic et accommodation de défauts au sein de systèmes multivariés représentés sous forme convexe.*”

Directeur de thèse : Dominique SAUTER (20%) - Co-directeur de thèse: **D. Theilliol** (80%)

[TH_Medina]

Manuel Adam MEDINA (*Soutenance prévue en Février 2004*)

quatrième année de thèse (Enseignant mexicain effectuant son doctorat dans le cadre de la formation continue - Boursier CONACYT DL)

Son sujet de recherche porte sur le “*Diagnostic de défauts au sein des systèmes non linéaires représentés par une combinaison convexe de modèles LTI.*”

Directeur de thèse : Dominique SAUTER (20%) - Co-directeur de thèse: **D. Theilliol** (80%)

8 communications communes ([CI_44], [CI_43], [CI_42], [CI_40], [CI_39], [CI_36], [CI_29] et [CN_4])

2.3.2 - Thèses encadrées - soutenues

[TH_Pezzin]

Nathalie PEZZIN (*Abandon de la doctorante dans sa dernière année de thèse en Avril 2000 suite à son congé de maternité*)

Son sujet de recherche s'intitulait “*Diagnostic et sûreté de fonctionnement de la tour de refroidissement de tôle sur le centre de production de la ligne galvanisée à SOLLAC-FLORANGE.*”

Directeur de thèse : Dominique SAUTER (40%) - Co-directeur de thèse: **D. Theilliol** (60%)

4 communications communes ([CI_28], [CI_23], [CI_18] et [CI_17])

2 rapports de fin de contrat ([RC_3] et [RC_1])

[TH_Vela-Valdes]

Luis Gerardo VELA VALDES

Thèse de doctorat spécialité Automatique de l'UHP, mention TH, 6 juillet 1998, intitulée:

Etude et élaboration d'une approche fonctionnelle pour la localisation de défauts en diagnostic - Application à la simulation d'un moteur à courant continu.

Jury de thèse : Président : M. Gabriel (61ème section), Rapporteurs : D. Noyes (61ème section), J. Merckle (61ème section) Examineurs : F. Rousselot (27ème section), D. Sauter (61ème section), D. Theilliol.

Directeur de thèse : Dominique SAUTER (20%) - Co-directeur de thèse: **D. Theilliol** (80%)

6 communications communes ([CI_40], [CI_14], [CI_13], [CI_9], [CIS_4] et [CIS_2])

Actuellement, Professeur au CENIDET à l'Université de Cuernavaca (Mexique)

2.3.3 - DEA - Master of Sciences - Ingénieur CNAM

[DEA_Rodrigues]

Mickaël RODRIGUES : année universitaire 2001 - 2002

DEA Spécialité Contrôle, Signaux et Communication - UHP

Sujet: *Synthèse de filtres d'isolation de défauts de systèmes non linéaires représentés par*

des modèles linéaires interpolés.

Encadrement 100% - 4 communications communes ([CI_44], [CI_42], [CI_39] et [CI_36])

Situation actuelle : première année de thèse au CRAN.

[MS_Gonzales-Contreras]

Brian Manuel GONZALEZ-CONTRERAS : année universitaire 2000 - 2002

Master of Sciences du CENIDET, Université de Cuernavaca (Mexique)

Sujet: *Diagnostic de défauts à l'aide de Bond Graph : Application à un moteur à courant continu.*

Encadrement 20% - Luis Gerardo VELA VALDES (80%)

Situation actuelle : Enseignant à l'Université of Tlaxcala (Mexique)

[DEA_Léger]

Stéphane Léger : année universitaire 2000 - 2001

DEA Spécialité Contrôle, Signaux et Communication - UHP

Sujet: *Diagnostic de défauts de systèmes non linéaires par des modèles linéaires multiples.*

Encadrement 100% - 1 publication commune ([CI_29])

Situation actuelle : première année de thèse au CRAN sous l'encadrement de F. Hamelin

[CNAM_Metzger]

Jean Philippe MEZTGER : année universitaire 1998 - 1999

Mémoire d'Ingénieur CNAM - UHP

Sujet: *Synthèse d'observateurs en présence d'entrées inconnues : Application à un procédé biologique de dépollution.*

Encadrement 100% - 1 publication commune ([CN_1])

Situation actuelle : Ingénieur Technique - Société AUTOMATICA (Lure 70)

[DEA_Marquis]

Maxence MARQUIS : année universitaire 1996 -1997

DEA Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal - UHP

Sujet: *Mise en œuvre d'une stratégie de diagnostic appliquée à un système trois cuves.*

Encadrement 100%

[DEA_Pernot]

Olivier PERNOT : année universitaire 1995 -1996

DEA Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal - UHP

Sujet: *Etude et réalisation d'un outil logiciel générique d'aide à la décision.*

Encadrement 100%

[DEA_Weber]

Philippe WEBER : année universitaire 1994 -1995

DEA Spécialité Automatique et Traitement Numérique du Signal - UHP

Sujet: *Conception et application d'un outil de diagnostic de défauts de capteurs.*

Encadrement 100% - 1 publication commune ([CI_7])

Situation actuelle : Maître de Conférences (UHP Nancy 1) - Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

2.4 - Réalisations informatiques, coopérations industrielles, valorisation

Mes activités d'enseignant-chercheur me conduisent à initier et à participer à des missions de recherche technologique en relation avec le milieu industriel régional et national. J'ai également entrepris récemment de mettre à profit mon expérience acquise en développant quelques outils de diagnostic. Les paragraphes suivants sont consacrés au développement de l'ensemble de ces réalisations.

Développement de modules au sein d'une boîte à outils logiciels pour le diagnostic de défauts de systèmes industriels de 1995 à 1997. Principales Références : [RC_2], [CI_21], [CI_15], [CI_9], et [CNS_1].

En tant que co-responsable scientifique et technique du projet européen EUREKA MAINE DIALOGS EU 96 (DIAGnostics With Logistics support for systems Supervision de 1994 à 1997 - budget total de 4,93 M euros), de 1995 à 1997, sous l'hypothèse d'une décomposition hiérarchique d'un système industriel complexe, ma tâche a consisté, dans une première étape, à développer et à valider une technique de décision, nommée *Dedicated Decision Support Cell*, réduisant les fausses alarmes et limitant les non détections au sein de chaque sous-système. Puis, dans une seconde étape, ma tâche a été de concevoir une méthode générique de prise de décision, nommée *Generic Decision Support Cell*, au niveau global tenant compte de la décomposition structurelle du système complet en s'affranchissant de la problématique de la propagation des défauts. Responsable de la coordination et de la répartition des tâches de travail au sein des membres du CRAN, j'avais la charge aussi de l'organisation des réunions de travail bi-mensuelles. Cette mission représente un travail permanent en s'intéressant à définir, développer et valider des algorithmes adaptés, à rédiger des documents et des manuels techniques, mais aussi à préciser et concevoir des interfaces graphiques adéquates, utiles lors de la phase de configuration. Dans une dernière étape, ma mission a consisté à valider le produit sur la station d'épuration du district urbain de l'agglomération Nancéienne de Maxéville (54). Dans ce cadre, j'ai participé activement au développement et à la mise en place du produit logiciel DIALOGS sur l'installation de séchage des boues de la station. J'ai assuré la "responsabilité" technique du produit DIALOGS, l'implémentation des différentes méthodes, essentiellement analytiques, étant réalisée par Denis GIRAUD encadré par Christophe AUBRUN et Dominique SAUTER dans le cadre de sa thèse intitulée "*Diagnostic des systèmes industriels complexes par agrégation de méthodes : Application à une station d'épuration*" soutenue le 7 janvier 1998. Notons que le produit DIALOGS n'a pas été commercialisé.

Diagnostic et sûreté de fonctionnement de la tour de refroidissement de tôle sur le centre de production de la ligne galvanisée à SOLLAC-FLORANGE (57). Principales Références : [RI_7], [RC_1], [RC_3], [CI_28], [CI_23] et [CI_17]. Durée du contrat : 1 année - Montant : 23 Keuros.

De Janvier 1997 à Janvier 1998, je participe activement, en tant que co-responsable scientifique, avec deux autres collègues du CRAN, à une action de recherche relative au diagnostic de la qualité de tôle galvanisée sur une ligne de refroidissement rapide au sein de la société SOLLAC sur le site de Florange (57). Le contrat de recherche, initié par le Professeur Dominique SAUTER, portait sur la localisation de défauts de capteurs de température (pyromètres). L'information, issue de ces capteurs, étant exploitée au sein d'une boucle de régulation proportionnelle-intégrale, un défaut survenant au niveau de ces derniers dégrade la qualité de la tôle galvanisée. Les contraintes industrielles et les non linéarités inhérentes à l'outil de production nous conduisent à abandonner une démarche classique basée sur la recherche d'un modèle analytique ou heuristique à des fins de diagnostic. Une solution consiste à calculer l'"effort" nominal utilisé par le procédé en l'absence de défauts de capteurs, sachant que dans le cas contraire celui-ci est modifié. Cette technique donne de très bons résultats en termes de temps de détection lors de la présence de biais mais aussi de dérive sur les pyromètres. La généralisation de cette notion d'"effort" permet de considérer la détection de défauts capteurs en boucle fermée à l'aide, non pas d'un modèle analytique ou heuristique, mais à partir d'un modèle énergétique tenant compte des informations du second ordre. Cette méthode conçue et validée à partir de données réelles a été testée en ligne grâce à son implémentation, réalisée lors du stage de fin d'année d'un étudiant préparant le DESS ATTI, permettant ainsi aux deux partenaires du contrat de mieux percevoir les difficultés liées à l'application de la méthode et à assurer ainsi le suivi scientifique et technique de celle-ci. Cette activité de recherche s'inscrit dans le cadre de la thèse de Nathalie PEZZIN-DOBRILLA [TH_Pezzin] à laquelle je participe activement à l'encadrement. Cette thèse n'est pas soutenue, la doctorante prenant la décision d'arrêter en 2000 suite à un congé de maternité. Ce travail de recherche fait l'objet d'une publication dans une revue ([RI_7]), en seconde soumission, dans laquelle le relecteur nous propose de généraliser encore la méthode développée aux équations fondamentales de la physique, travail de recherche que l'on ne peut difficilement traiter sérieusement à court terme.

Evaluation d'un système de régulation dédié aux fours électriques industriels. Principales Références : [RC_4]. Durée du contrat : 1 mois à hauteur de 2 chercheurs confirmés par mois - Montant : 7,5 Keuros.

En janvier 2001, j'initie un contrat de collaboration avec la société Spie-Trindel s'inscrivant dans le cadre du projet d'amélioration des performances de leur système de régulation de fours électriques "EMPERE" (Equipment for the Measurement of Electric Parameters and Regulation of Electrode), produit développé par l'agence d'Uckange (Moselle). L'étude confiée par cette société a pour objectif de procéder à une analyse critique du pilotage existant des fours électriques dans les aciéries (régulation de la position des électrodes), afin d'améliorer et de développer, dans une seconde étape, de nouvelles stratégies de régulation. Malgré la satisfaction du client sur le premier point, à mon plus grand regret, en tant que responsable de cette collaboration, les restrictions de budget Spie-Trindel, n'ont pas permis, à ce jour, de lancer la seconde étape.

Elaboration et mise en oeuvre de méthodes de détection et de localisation de défauts, en

temps réel, présents au sein des boucles de régulation du laminoir L16. Principales Références : [RC_5]. Durée du contrat : 2 mois à hauteur de 1 chercheur confirmé par mois - Montant : 7,5 Keuros.

Récemment, en avril 2002, lors de la visite d'un étudiant effectuant son stage professionnel de formation IUP GEII, je fais la connaissance du responsable Maintenance du laminoir à froid L16 de la société PECHINEY-RHENALU sur le site de production de NeufBrisach (68). Cette rencontre aboutit en septembre 2002 à un contrat de collaboration avec la société PECHINEY-RHENALU s'inscrivant dans le cadre d'un projet de maintenance prédictive au sein de leur site de production. L'étude confiée par cette société a pour objectif de concevoir et de développer des indicateurs de défauts de capteurs dans une première étape. La redondance matérielle existante ainsi que la redondance analytique, issue des modèles de connaissance du laminoir, a permis de faire apparaître, pour le moment, un grand nombre de défauts de capteurs. Nous sommes actuellement dans la phase de tests et mise au point des différents blocs de génération, d'évaluation des résidus ainsi que de prise de décision.

Développement de modules de diagnostic de défauts à temps discret FADIAMODs.

L'arrivée de la version matlab 6.0 et simulink 4.1. sur le marché, intégrant des outils facilitant la gestion des Interfaces Graphiques Utilisateurs et des blocs de programmation sous forme de langage objet, m'a permis d'envisager de mettre à profit l'expérience acquise lors du projet européen EUREKA MAINE DIALOGS afin de promouvoir le diagnostic de défauts, en initiant depuis 2001, le développement d'une boîte à outils, appelée *FADIAMODs* (pour FAult DIAgnosis MODules), constituée de modules de diagnostic. Celle-ci comprend uniquement, un module d'analyse de tendance et un module d'équations de bilan. Elle n'est pas, pour le moment, téléchargeable mais peut être mise à disposition sur simple demande. J'envisage à la rentrée universitaire 2003 le développement du module "génération de résidus par l'espace de parité".

2.5 - Rayonnement scientifique et collaboration

Mes travaux de recherche m'ont permis de participer et de collaborer à des manifestations nationales et à de nombreuses manifestations internationales.

2.5.1 - Séjours de recherche à l'étranger et principales collaborations

En décembre 1998, le CRAN et L'INRA de Narbonne signent une convention de partenariat à caractère technologique et scientifique dans le domaine du diagnostic de pannes dans les procédés biologiques de dépollution (référéncée NM/SF/02/03/99 DAJ 1). Depuis la signature

de cette convention, je prends part aux activités de recherche menées par ces deux laboratoires concrétisées par la rédaction de deux articles parus récemment dans des revues internationales ([RI_6] et [RI_4]), une communication au World Congress IFAC 2002 ([CI_35]), une communication aux Journées Thématiques “*Automatique et Environnement*”, à Nancy, en mars 2000 ([CN_1]), et la participation à l’encadrement de J.P. Metzger ([CNAM_Metzger]) dans le cadre de son mémoire ingénieur CNAM.

Depuis janvier 2000, je travaille en étroite collaboration avec le National Center for Research and Technological Development (CENIDET) en relation avec le chef de département d’Ingénieur en Electronique, le Dr Luis Gerardo VELA VALDES. Cette coopération avec cette école d’ingénieur, située à Cuernavaca au Mexique, a été officialisée à la fin de l’année 2002 par la signature d’une convention, celle-ci ayant pour objectif de faciliter et d’intensifier les échanges scientifiques ([CI_40] et [CI_39]) et techniques ([CI_38] et [CI_37]) entre le CRAN et le CENIDET sous forme d’organisation de séminaires, d’accueil des étudiants post-doc ou en cours de doctorat, permettant à ceux-ci d’effectuer des stages afin de favoriser et d’officialiser ces encadrements. J’ai effectué une visite de quatre jours en décembre 2002 au CENIDET pour finaliser la mise en oeuvre d’un projet de recherche, intitulé IFADIA (Intelligent FAult Diagnosis and Accommodation) portant principalement, comme son titre l’indique, sur le diagnostic et l’accommodation de défauts dédiés aux moteurs électriques. Durant ce séjour, à titre de co-encadrant, j’ai assisté en tant que membre officiel du jury du CENIDET, à la soutenance du mémoire de Master of Sciences présenté par Brian Manuel Gonzales-Contreras ([MS_Gonzales-Contreras]).

Dans le cadre du projet franco-canadien 2001-2002 intitulé “*Design, analysis and applications of Fault Tolerant Control System*”, établi par le Pr Jiang J. de l’Université Western Ontario, London (Canada) et un collègue du CRAN Noura H., j’ai effectué un travail d’études au Canada au mois d’octobre 2002. Durant ce séjour, j’ai eu l’opportunité d’échanger et de travailler, de manière constructive, avec un chercheur réputé le Dr. Zhang Y. ([Zhang et Rong Li, 1998] et [Zhang et Jiang, 2001]) membre de l’équipe du Pr Jiang J., sur les limites et les contributions des multiples modèles conjugués, expression définie en anglais par *IMM* pour *Interacting Multiple Model*, au niveau de l’accommodation aux défauts.

2.5.2 - Participation à des projets européens, à des groupements de recherche et de conseils

Dans le cadre du projet européen DIALOGS, réunissant cinq partenaires industriels et trois partenaires universitaires de quatre pays européens (A.E.A. Technology en Angleterre, MACQ Electronique en Belgique, SIEMENS KWU en Allemagne, FMA en France, Université Libre de Bruxelles, Université Gerhard Mercator de Duisburg, Université Henri Poincaré, Nancy 1, Yorkshire Water en Angleterre) je suis amené à entrer en relations et à maintenir celles-ci avec des membres éminents de la communauté scientifique internationale dans le domaine du diagnostic : le Professeur. P. M. Frank de l’Université de Duisburg et le Professeur M. Kinnaert de l’Université Libre de Bruxelles.

Du 17 au 20 avril 1996 à l'Université de Miskolc en Hongrie, dans le cadre du projet TEMPUS MODIFY, je suis invité à un colloque intitulé "*Qualitative System modelling, Qualitative Fault Diagnosis and Fuzzy Logic and Control*" pour présenter deux exposés sur l'intégration des méthodes de diagnostic ([CIS_3] et [CIS_2]).

Depuis ma nomination, je prends part, également, aux activités du groupe de travail "*Intelligent Control and Diagnosis*" de l'Institut Franco-Allemand pour les Applications de la Recherche (I.A.R.), groupe animé par Mme Birgit Köppen-Seliger et M. Thomas Laengle. L'I.A.R. est une structure qui regroupe les Universités françaises de Grenoble, Nancy, Mulhouse et Strasbourg et les Universités allemandes de Duisburg et Karlsruhe.

Depuis janvier 2003, je participe activement au projet européen "*Intelligent Fault Tolerant Control in Integrated Systems*" (<http://ifatis.uni-duisburg.de/>) réunissant trois partenaires industriels et six partenaires universitaires de six pays européens (T.N.I. en France, Robert Bosch GmbH en Allemagne, Yorkshire Water en Angleterre, Université Libre de Bruxelles, Université de Bologne, Université de Rome, Université de Maribor, Université Gerhard Mercator de Duisburg, Université Henri Poincaré, Nancy 1). Ce projet, d'une durée de trois ans, débuté en janvier 2002 dont la part du budget allouée au CRAN s'élève à 235Keuros, a pour principal objectif de développer des techniques de commande tolérantes aux défauts et de les appliquer à des procédés industriels. Les chercheurs du CRAN sont particulièrement impliqués dans sa réalisation, le Professeur Dominique Sauter fait partie du comité de direction. Parmi les onze tâches spécifiques à ce projet, je suis co-responsable avec J.C. Ponsart de l'une d'entre elles sous la conduite du Pr Lorenzo Marconi de l'Université de Rome. Cette tâche concerne le développement de l'ordonnanceur général de la reconfiguration, pouvant être vu comme une supervision, afin d'effectuer une reconfiguration et/ou une restructuration en changeant les objectifs de chaque sous-système sur la base d'une décomposition fonctionnelle du processus considéré.

Sur le plan national, je participe aux réunions de l'action Sûreté, Surveillance, et Supervision (S3) du GDR MACS (Modélisation, Analyse, Conduite des Systèmes dynamiques).

De 1997 à 2000, je suis membre du Conseil Scientifique de l'Université Henri Poincaré Nancy 1 groupe Sciences, Collège C et je fais partie de la commission de réflexion sur l'élaboration d'une charte des étudiants en thèse dans notre université.

De 1998 à 2000, je suis membre nommé du conseil du Centre de Recherche en Automatique de Nancy, et à ce titre je collabore activement à la rédaction du rapport d'activités 1996-2000 pour le chapitre concernant la thématique " Surveillance et Détection de Défauts ".

2.5.3 - Participation à l'organisation de congrès et à des sessions invitées

Membre du comité d'organisation, je prends part à la réalisation :

- de la 2ème Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle organisée par le CRAN du 7 au 9 juin 1995 à Nancy,

- des journées d'étude sur les "Logiciels pour le traitement de l'Image, du Signal et l'Automatique" qui se tiennent à Nancy le 25 et 26 mars 1997,

- du 41ème Congrès annuel du Club EEA qui se déroule à Nancy du 16-18 mai 2001.

Depuis Février 2002, Président du comité d'organisation national du 11e IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing (<http://www.cran.uhp-nancy.fr/ifac-mm2004>), je m'investis dans l'organisation, et la préparation de ce colloque international dont le budget prévisionnel est de 70Keuros. Le soutien des comités techniques "Control of Biotechnological Systems" présidé par le Pr. D. Dochain et "Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes", présidé par le Pr. M. Kinnaert donne à ce 11^{ème} Symposium une orientation scientifique et technique différentes des précédentes en prenant en compte les problèmes liés à l'Environnement pour les procédés étudiés et en s'intéressant également au diagnostic de défauts et à la sûreté de fonctionnement. Plus de 100 congressistes internationaux, chercheurs et industriels, des 5 continents sont attendus au Palais des congrès de Nancy du 8 au 10 septembre 2004.

En liaison directe avec mes activités de recherche, j'ai été sollicité pour soumettre des communications, et je dois participer à deux sessions invitées au 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS, à Washington, District de Colombie, USA, en juin 2003 :

- par le Pr. Ragot J. (CRAN - France) session intitulée "Hybrid System Diagnosis and Supervision".

- par le Pr. Lunze J. (Université de Hambourg, Allemagne) par l'intermédiaire du Pr Dominique Sauter session intitulée "Fault Tolerant Control."

2.6 - Lecteur de revues ou conférences

Je suis régulièrement rapporteur de publications soumises à des congrès (ECC, CDC, ACC et IFAC) et aussi à des revues internationales (IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, ISA Transactions, Control Engineering Practice), dont voici quelques exemples (depuis 2001) :

- Control Engineering Practice en 2001 et 2002;
- ISA Transactions en 2001 et 2003;
- Conférence Internationale Francophone d'Automatique en 2002;
- 15th World IFAC Congress on Automatic Control en 2002;

- 5th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS en 2003;
- Journées Doctorales d'Automatique en 2003.

2.7 - Membre de jury

- Mémoire d'ingénieur CNAM de Eric SIEBERT soutenance le 28 novembre 2002.
Sujet en partenariat avec la société PREDICT (54000) : *Détection et diagnostic, contribution à une approche prévisionnelle de la maintenance de systèmes industriels.*
Jury : D. Jaume (Professeur CNAM), J.B. Léger (PDG Sté PREDICT), H. Noura (Maître de Conférences, UHP), D. Sauter (Professeur, UHP), **D. Theilliol**.
- Mémoire d'ingénieur CNAM de Christophe GOBERT soutenance le 15 novembre 2001.
Sujet : *Commande avancée et diagnostic d'un système d'entraînement de bande.*
Jury : J.P. Fritz (Resp. Maintenance Ascométal-Hagondange), D. Jaume (Professeur CNAM), J.C. Ponsart (Maître de Conférences, UHP), D. Sauter (Professeur, UHP), **D. Theilliol**.
- Mémoire d'ingénieur CNAM de Jean Philippe MEZTGER soutenance le 16 novembre 1999.
Sujet en partenariat avec le Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE) de l'INRA de Narbonne : Sujet: *Synthèse d'observateurs en présence d'entrées inconnues : Application à un procédé biologique de dépollution.*
Jury : C. Aubrun (Maître de Conférences, UHP), J. Fayolle (PDG Sté Automatica, Lure), D. Jaume (Professeur CNAM), O. Malassé (Maître de Conférences, ENSAM Metz), J.B. Léger (PDG Sté PREDICT), D. Sauter (Professeur, UHP), **D. Theilliol**.
- Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, de Luis Gerardo Vela Valdes soutenance le 6 juillet 1998.
Sujet: *Etude et élaboration d'une approche fonctionnelle pour la localisation de défauts en diagnostic - Application à la simulation d'un moteur à courant continu.*
Jury de thèse : Président : M. Gabriel (61ème section), Rapporteurs : D. Noyes (61ème section), J. Merckle (61ème section) Examineurs : F. Rousselot (27ème section), D. Sauter (61ème section), **D. Theilliol**.

3 - Activités d'enseignement

3.1 - Activités pédagogiques

Depuis Septembre 1994, j'occupe un poste de Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré Nancy 1 à l'Institut Universitaire Professionnalisé - Génie Electrique et Informatique Industrielle (IUP GEII), formation ouverte en septembre 1992 au sein de la Faculté des Sciences et Techniques. Depuis ma nomination, l'enseignement que je dispense est en moyenne de 240 heures, équivalent travaux dirigés, dont 80% auprès des étudiants de la formation IUP GEII, le reste auprès des étudiants préparant un DESS, soit spécialité Automatique, Traitement et Transmission de l'Information depuis 1996 ou soit, spécialité Ingénierie des Systèmes Electroniques Embarqués depuis 2001. La répartition horaire moyenne dans les différentes formes d'enseignement est de l'ordre de 30% pour les cours magistraux (CM), de 30% pour les travaux dirigés (TD) et de l'ordre de 40% pour les travaux pratiques (TP). Les enseignements dispensés regroupent principalement deux thèmes : l'automatique des systèmes discrets et le génie informatique. *Depuis Septembre 1997*, en tant que professeur au sein de la filière Automatisme Industriel, j'interviens également dans la formation continue, en animant les enseignements dédiés à l'Identification-Estimation des systèmes et le Diagnostic de défauts à base d'observateurs, auprès des auditeurs inscrits au Conservatoire National des Arts et Métiers de Lorraine, centre d'enseignement de Metz (CAMOS-CNAM 5, rue Jean-Antoine Chaptal 57070 Metz).

Cet enseignement en formation initiale et continue, dispensé en second et troisième cycle, s'articule autour des matières suivantes :

- *Systèmes échantillonnés (CM, TD, TP)* : Transformation en z, échantillonnage des systèmes continus, stabilité et précision des systèmes échantillonnés, commande de procédé par PID numérique, Synthèse directe d'un correcteur numérique, Commande par modèle interne.

- *Identification de systèmes linéaires discrets (CM, TD, TP)* : Représentation des modèles, Méthode du modèle, Méthodes statistiques d'estimation des paramètres des modèles linéaires, Démarche générale de l'identification, Identification de systèmes non linéaires discrets.

- *Diagnostic des systèmes linéaires par redondance analytique dynamique (CM, TD, TP)* : Observabilité des systèmes linéaires, observateurs d'ordre complet, d'ordre réduit, à entrées inconnues.

- *Analyse numérique (CM, TD, TP)* : Enseignement des différentes méthodes numériques telles que les moindres carrés, l'intégration numérique, l'interpolation, la résolution de systèmes d'équations, la résolution d'équations différentielles, la méthode du gradient et de ses

variantes.

- *Informatique industrielle (CM, TD, TP)* : Caractéristiques logicielles ; langage d'assemblage - Développements logiciels d'une application. Codage. Le langage C : développement pour carte d'entrée sortie.

- *Systèmes asservis linéaires (TD, TP)* : Etude des systèmes du premier et du second ordre, identification de systèmes continus, régulation de débit et de niveau, régulation de température, étalonnage de capteurs et d'actionneurs, Implémentation de régulateurs PID.

- *Temps réel multitâches (TD, TP)* : notions de tâche, d'ordonnanceur ; multitâches-monoprocasseur ; temps partagé ; commutation de tâches ; partage de ressources ; synchronisation de tâches, communication entre tâches ; norme Sceptre ; utilisation d'exécutif temps réel (noyau Real Time Craft).

- *Programmation orientée objet et Application au langage JAVA (TP)* : Introduction à la programmation Objet avec Java, classes, méthodes, encapsulation, héritage, polymorphisme. Fonctionnalités Objet de Java, instanciation, création de nouvelles classes à partir de classes existantes, surcharge de méthodes. Syntaxe du langage Java. Construction d'application et d'applet Java. Traitement des événements, des exceptions. Le modèle multitâche de Java. Interface et package. Développement avec JDK.

Dans le cadre de la récente habilitation de l'IUP GEII, j'ai initié et réalisé l'étude et la mise en place de plates-formes pédagogiques polyvalentes de travaux pratiques, développées en collaboration avec un industriel. Chaque plate-forme est basée autour d'un régulateur industriel programmable AVIS II développé par la société AE2I avec le concours d'étudiants et de stagiaires de l'IUP GEII de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1. Le régulateur AVIS II correspond à un système embarqué programmable. Il est centré sur un processeur Hitachi, dispose de 4 entrées analogiques-numériques / 4 sorties numériques-analogiques, 4 entrées numériques / 4 sorties numériques, une liaison RS485, une liaison RS232, une liaison I2C et une liaison ethernet supportant le protocole UDP. De plus, un environnement de développement gratuit (produit GNU) est disponible. Cela permet de développer des applications particulières qui seront ensuite téléchargées en mémoire locale de l'AVIS II, via la liaison série. Dans le cadre de chaque plate-forme de travaux pratiques, l'AVIS II est intégrée dans une armoire coffret intégrant également toute la partie électrique (transformateur, relais, sécurité, ...) et les connecteurs pour la connectique avec l'extérieur (PC, processus). Chaque plate-forme est interfacée avec différents systèmes tels que des systèmes d'asservissement de position (chariot roulant, bille sur rail articulé), d'asservissement de vitesse (moteur à courant continu), de régulation de température (résistance chauffante), de régulation de débit d'air (ventilateur), de régulation de hauteur d'eau (système dit des trois cuves). De part sa configuration de base, cette plate-forme permet de mettre en œuvre directement des Travaux Pratiques de régulation (utilisation du PID). Cet équipement de contrôle-commande permet aux étudiants de mettre en application les enseignements scientifiques et techniques de différents domaines interconnectés sur différents procédés pilotes (électrique, hydraulique,

mécanique, thermique) selon un cahier des charges précis. Cela doit permettre aux étudiants d'appréhender le travail en équipe et surtout de confronter leurs acquis théoriques avec le milieu industriel. De part sa modularité, ces plates-formes pédagogiques peuvent être utilisées dans le cadre de différents enseignements (travaux dirigés appliqués, travaux pratiques, projets), à différents niveaux (1er, 2e et 3e cycle) et concernent différents domaines d'activité (automatique, informatique industrielle, réseaux locaux industriels). Cette plate-forme permet depuis deux ans, aux étudiants de licence IUP GEII CASI d'être confrontés en fin d'année à la régulation industrielle (PID), à l'acquisition de données, à la programmation micro-informatique industrielle, au développement de la supervision, à l'application réseaux de terrain durant des projets tuteurés de 60 heures. Ce travail, qui a fait l'objet d'une communication dans un congrès dévolu à l'enseignement ([CN_2]), a contribué à la rénovation pédagogique et matérielle des travaux pratiques du secteur de l'automatique et informatique industrielle (cf. <http://www.atela.uhp-nancy.fr/ressources/realisation/avis/index.html>).

A ces enseignements conventionnels viennent s'ajouter d'une part, dans l'objectif de professionnalisation de ces formations, le suivi des stages industriels des étudiants de l'IUP GEII et de DESS ATTI (durée minimum de 5 mois) ainsi que l'évaluation de ces stages lors des jury de soutenance (en moyenne 6 à 7 étudiants par année universitaire) et d'autre part, dans l'objectif d'initiation à la recherche, l'encadrement de micro-thèses (durée totale d'1 mois) dans la continuité de nos actions de recherche appliquée. En dehors des enseignements dispensés en formation continue au sein de la filière Automatismes Industriels du CAMOS-CNAM, je suis membre des jury d'Examen Probatoire, et je participe activement à l'évaluation des mémoires d'ingénieur CNAM.

3.2 - Responsabilités Administratives

Depuis Septembre 2002, j'occupe la fonction de responsable du DESS Automatique, Traitement et Transmission de l'Information (ATTI) cohabilité avec l'Université de Metz dont l'effectif moyen est de 25 étudiants (cf. <http://www.dess-atti.uhp-nancy.fr>). Cette mission consiste à la fois à être le directeur des études, le responsable pédagogique et le responsable des stages. Conformément à l'habilitation, la possibilité est donnée à certains étudiants d'effectuer des projets de recherche et développement en relation ou non avec le milieu industriel. A ce titre, j'organise les rencontres avec les industriels intéressés par ce type de projets et je veille au bon déroulement de ces derniers à travers des bilans mensuels et individuels auprès de chaque étudiant. Dans le cadre d'une convention, établie en Septembre 2000, entre l'Université Henri Poincaré et l'Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur (EMSI) située à Casablanca, j'ai structuré et développé cette antenne du DESS ATTI délocalisée au Maroc. L'externalisation du diplôme permet l'accès à des étudiants issus des Universités et écoles d'ingénieurs Marocaines de suivre les cours dans les locaux de l'EMSI. La première promotion de 10 étudiants devrait être effective en Octobre 2003. Dans le cadre de la mise en place d'un schéma national LMD, l'objectif visé en accord avec mes collègues marocains est de permettre aux étudiants d'obtenir à la fois un Master Professionnel de l'EMSI et également un Master Professionnel de la spécialité de notre université. Il sera aussi possible

de permettre à certains étudiants de suivre le Master Recherche augmentant ainsi le vivier d'étudiants susceptibles de poursuivre en doctorat.

Responsable du DESS ATTI, je suis membre du bureau de direction de l'Atelier d'Electronique et d'Automatique (cf. <http://www.atela.uhp-nancy.fr>), établissement regroupant les ressources et les outils pédagogiques entre les spécialités de l'Electronique, l'Electrotechnique, l'Automatique et l'Informatique Industrielle (EEAI) sur le site de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1. Ce bureau détermine, définit et prévoit les investissements à réaliser et à les adapter aux besoins pédagogiques de chaque domaine d'enseignement. Je suis également membre du bureau de la direction du Département d'Automatique et d'Electronique au sein de l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences et Techniques Mathématiques Informatique Automatique (UFR STMIA) de notre université. Les membres de ce bureau ont actuellement un rôle déterminant, quant à la définition, dans le cadre de la prochaine habilitation (2005-2009), du schéma national de l'enseignement supérieur LMD.

De Janvier 1995 à Septembre 2002, j'ai occupé la fonction de Président de jury et responsable administratif de la licence IUP GEII spécialité Conduite Automatisée des Systèmes Industriels (CASI) dont l'effectif annuel moyen est de 45 étudiants. Au début de l'année 2001, j'ai rédigé en collaboration avec J.C. PONSART (responsable de la maîtrise IUP GEII spécialité CASI) et F. HAMELIN (responsable du DEUG IUP GEII) le nouveau programme pédagogique de cette spécialité dans le cadre de la demande de renouvellement de l'habilitation de l'IUP GEII pour la période 2001/2005. Cette nouvelle habilitation se caractérise par une forte volonté d'ouvrir cette spécialité au domaine des Réseaux Locaux Industriels en collaborant avec nos collègues de l'Institut Universitaire de Technologie GEII de Nancy-Brabois dispensant ces enseignements. A la rentrée 2001, l'IUP GEII comptait quatre spécialités : Conduite Automatisée des Systèmes Industriels, Conception de Systèmes Electroniques, Réseaux Numériques de Communications, et SYStèmes ElecTrotechnique, soit un effectif de trois cents étudiants.

Depuis Novembre 2001, je suis membre élu de l'Unité de Formation et de Recherche des Sciences et Techniques Mathématiques Informatique Automatique (UFR STMIA) de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.

Depuis Avril 1998, je suis tuteur pédagogique d'un Monitorat d'Initiation à l'Enseignement Supérieur à l'IUP GEII, occupé jusqu'en septembre 2000 par Marion GILSON (actuellement Maître de Conférences à l'UHP) et depuis cette date, par Phillippe JACQUES actuellement en dernière année de thèse au CRAN.

Depuis Janvier 1996, je suis membre du Conseil de Perfectionnement de l'IUP GEII. Ce dernier garantit l'adéquation de la formation aux objectifs visés.

4 - Liste des publications et des travaux

Cette partie est consacrée à la présentation quantitative de ma production scientifique en termes de publications dans des revues, de rapports de contrat, d'articles présentés dans des colloques internationaux et nationaux (*Il est possible d'obtenir l'intégralité des publications en accès restreint login : jury mot de passe : theilliol à l'adresse web http://gtident.cran.uhp-nancy.fr/hdr_dt/*). Le tableau suivant présente un bilan quantitatif des publications depuis ma nomination.

Tableau 1: Bilan des publications de 1994 à 2003

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
RI				1			2	1	1	1
RC				1	2			1		1
CI	4	2	3	3	6	4	4	4	8	4
CN							1	1	1	1

avec *RI* : Revues Internationales avec comité de lecture

RC : Rapports de fin de Contrat

CI : Conférences Internationales avec comité de lecture et actes

CN : Conférences Nationales avec comité de lecture et actes

4.1 - Revues Internationales avec comité de lecture

[RI_7]

D. Theilliol, H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin. "Sensor fault diagnosis via energy balancing evaluation: application to metal processing." *Control Engineering Practice*. Article en seconde révision.

[RI_6]

D. Theilliol, J.C. Ponsart, J. Harmand, C. Join, P. Gras. "One-line estimation of unmeasured inputs for anaerobic wastewater treatment processes." *Control Engineering Practice*, vol. 11, pp. 1007-1019, 2003.

[RI_5]

D. Theilliol, H. Noura, J.C. Ponsart. "Fault diagnosis and accommodation of a three-tank-system based on analytical redundancy." *ISA Transactions*, vol. 41, n°3, pp. 365-382, 2002.

[RI_4]

C. Aubrun, **D. Theilliol**, J. Harmand, J.P. Steyer. "Software sensor design for COD estimation in an anaerobic fluidized bed reactor." *Water Science and Technology*, vol. 43, n°7, pp. 115-124, 2001.

[RI_3]

H. Noura, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Actuator fault-tolerant control design: demonstration on a three-tank-system." *International Journal of Systems Science*, vol. 31, n°9, pp. 1143-1155, 2000.

[RI_2]

H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin, **D. Theilliol**. "Fault tolerant control in dynamic systems: application to a winding machine." *IEEE Control System Magazine*, vol. 20, n°1, pp. 33-49, 2000.

[RI_1]

G. Bloch, P. Thomas, **D. Theilliol**. "Accommodation to outliers in identification of non linear SISO systems with neural networks." *Neurocomputing*, vol. 14, pp. 85-99, 1997.

4.2 - Rapports de fin de Contrat

[RC_5]

D. Vorburger, **D. Theilliol**, C. Aubrun. "Elaboration et mise en oeuvre de méthodes de détection et de localisation de défauts, en temps réel, présents au sein des boucles de régulation du laminoir à froid L16." Partenaire : PECHINEY-RHENALU, Neuf-Brisach (68), France, Mars 2003.

[RC_4]

F. Hamelin, D. Sauter, **D. Theilliol**. "Evaluation du système de régulation EMPERE (Equipment for the Measurement of Electric Parameters and Regulation of Electrodes) des fours électriques industriels." Partenaire : SPIE-TRINDEL, Florange (57), France, Mars 2001.

[RC_3]

N. Pezzin, F. Hamelin, H. Noura, **D. Theilliol**. "Diagnostic de la température en sortie du refroidissement rapide." N° Contrat UNI 97/048 - Partenaire : SOLLAC, Florange (57), France, Juin 1998.

[RC_2]

D. Giraud, C. Aubrun, **D. Theilliol**. "Surveillance en ligne de défauts de la station d'épuration de Maxéville." N° Contrat UNI 93/135 - Partenaire : SOGEA, Maxéville (54), France, Mai 1998.

[RC_1]

N. Pezzin, F. Hamelin, H. Noura, **D. Theilliol**. "Identification du refroidissement rapide." N° Contrat UNI 97/048 - Partenaire : SOLLAC, Florange (57), France, Décembre 1997.

4.3 - Conférences Internationales avec comité de lecture et actes

[CI_44]

M.A. Medina, M. Rodrigues, **D. Theilliol**, H. Jamouli "Fault diagnosis in nonlinear systems through an adaptive filter under a convex set representation." Dans *7e European Control Conference*, Cambridge, Angleterre, Septembre 2003.

[CI_43]

M.A. Medina, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Simultaneous fault diagnosis and robust model selection in multiple linear models framework." Dans *5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington, District de Colombie, USA, Juin 2003, pp. 513-518.

[CI_42]

D. Theilliol, M. Rodrigues, D. Sauter. "Adaptive filter design for fdi in nonlinear systems." Dans *5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington, District de Colombie, USA, Juin 2003, pp. 693-698.

[CI_41]

D. Theilliol, D. Sauter, J.C. Ponsart. "A multiple model based approach for fault tolerant control in non linear systems." Dans *5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington, District de Colombie, USA, Juin 2003, pp. 151-156.

[CI_40]

M.A. Medina, **D. Theilliol**, L.G. Vela Valdez and D. Sauter. "Fault diagnosis in nonlinear systems described by interpolated LTI models." Dans *Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, Guadalajara, Mexico, Décembre 2002, CD-Rom.

[CI_39]

D. Theilliol, M. Rodrigues, E. Quintero-M-M, M.A. Medina, D. Sauter. "Adaptive filter design for fault detection and isolation in non linear systems described by interpolated L.T.I. models." Dans *Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, Guadalajara, Mexico, Décembre 2002, CD-Rom.

[CI_38]

G. Guerrero, Y. Tang, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Control descentralizado de robots rigidos giratorios accionados por motores de induccion." Dans *Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, Guadalajara, Mexico, Décembre 2002, CD-Rom.

[CI_37]

J-C. Ponsart, **D. Theilliol**, G.V. Guerrero-Ramirez, C. Aubrun, D. Sauter. "Nonlinear control of a winding process." Dans *Congreso Latinoamericano de Control Automatico*, Guadalajara, Mexico, Décembre 2002, CD-Rom.

[CI_36]

M. Rodrigues, M.A. Medina, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Fault isolation and estimation in nonlinear systems: an adaptive filter solution based on multiple model approach." Dans *17e Workshop de l'Institut franco-allemand pour les Applications de la Recherche*, Grenoble, France, Novembre 2002.

[CI_35]

D. Theilliol, C. Aubrun, J.C. Ponsart, J. Harmand. "On-line estimation of unmeasured inputs for anaerobic process described by interpolated L.T.I. Models." Dans *15e World IFAC Congress*, Barcelone, Espagne, Juillet 2002, CD-Rom.

[CI_34]

H. Noura, F. Hamelin, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Fault-tolerance analysis for major actuator failures : application to a winding machine." Dans *15e World IFAC Congress*, Barcelone, Espagne, Juillet 2002, CD-Rom.

[CI_33]

D. Sauter, F. Hamelin, H. Noura, **D. Theilliol**. "Fault tolerant control in dynamic systems." Dans *15e World IFAC Congress*, Barcelone, Espagne, Juillet 2002, CD-Rom.

[CI_32]

D. Theilliol, J.C. Ponsart, H. Noura, D. Sauter. "Sensor fault-tolerant control method based on multiple model approach." Dans *6e European Control Conference*, Porto, Portugal, Septembre 2001, pp. 1981-1986.

[CI_31]

J.C. Ponsart, C. Join, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Sensor fault diagnosis and accommodation in nonlinear system." Dans *6e European Control Conference*, Porto, Portugal, Septembre 2001, pp. 2346-2351.

[CI_30]

J.C. Ponsart, **D. Theilliol**, H. Noura. "Fault-tolerant control method for actuator and component faults applied to a hydraulic system." Dans *6e European Control Conference*, Porto, Portugal, Septembre 2001, pp. 1044-1049.

[CI_29]

S. Léger, M. Adam-Medina, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Fault diagnosis of non linear systems described by multiple linear models." Dans *16e Workshop de l'Institut franco-allemand pour les Applications de la Recherche*, Illkirch, France, Novembre 2001.

[CI_28]

N Pezzin-Dobrilla,, D. Sauter, **D. Theilliol**, H. Noura. "Sensor fault detection using second order information: application to metal processing." Dans *IFAC Workshop, Future Trends in Automation in Mineral and Metal Processing*, Finlande, Août 2000, pp. 427-432.

[CI_27]

C. Join, J.C. Ponsart, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Actuator and sensor fault diagnosis by decoupling method for nonlinear systems." Dans *2nd NonLinear Control Network Workshop : nonlinear control in the year 2000*, Paris, France, Juin 2000.

[CI_26]

D. Theilliol, J.C. Ponsart, H. Noura. "Sensor fault diagnosis and accommodation based on analytical redundancy: Application to a three tank system." Dans *4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie, Juin 2000, vol. 2, pp. 762-767.

[CI_25]

H. Noura, J.C. Ponsart, **D. Theilliol**. "Sensor fault-tolerant control method applied to a winding machine." Dans *4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie, Juin 2000, vol. 2, pp. 798-803.

[CI_24]

J.C. Ponsart, **D. Theilliol**, H. Noura. "Fault-tolerant control of a nonlinear system. Application to a three-tank-system." Dans *5e European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, Septembre 1999, CD-Rom.

[CI_23]

N. Pezzin, F. Hamelin, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Diagnosis of an incipient sensor fault in galvanising plant." Dans *5e European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, Septembre 1999, CD-Rom.

[CI_22]

L. Gross, H. Noura, **D. Theilliol**. "Fault detection on non linear systems described by multiple linearized models." Dans *5e European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, Septembre 1999, CD-Rom.

[CI_21]

C. Aubrun, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Hierarchical diagnostic procedure for a waste water treatment plant." Dans *1999 American Control Conference*, San Diego, Californie, USA, Juin 1999, pp. 4511-4515.

[CI_20]

D. Theilliol, H. Noura, D. Sauter. "Fault-tolerant control method for actuator and component faults." Dans *37e IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Floride, Etats-Unis, Décembre 1998, pp. 604-608.

[CI_19]

L. Gross, H. Noura, **D. Theilliol**. "Fault detection on non linear systems described by multiple linearized models." Dans *13e Workshop de l'Institut franco-allemand pour les Applications de la Recherche*, Mulhouse, France, Novembre 1998.

[CI_18]

D. Theilliol, H. Noura, D. Sauter, N. Pezzin. "On-line sensor fault diagnosis and accommodation : Application to a three-tank system." Dans *IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, Solaize, France, Juin 1998.

[CI_17]

N. Pezzin, F. Hamelin, H. Noura, **D. Theilliol**. "Non-linear identification of a steel cooling in a galvanizing plant in a view of fault diagnosis." Dans *9e IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, Dusseldorf, Allemagne, Septembre 1998, pp. 169-174.

[CI_16]

D. Sauter, C. Aubrun, **D. Theilliol**. "Adaptive state observer design for fault diagnosis." Dans *IFAC System Structure and Control*, Nantes, France, Juillet 1998, pp. 415-419.

[CI_15]

D. Giraud, D. Sauter, C. Aubrun, **D. Theilliol**. "Intelligent fault diagnosis in complex systems: Application to a waste water treatment plant." Dans *International Workshop on Decision and Control on Waste Bio-processing*, Montpellier-Narbonne, France, Février 1998, pp. 247-248.

[CI_14]

L.G. Vela Valdes, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Using ontological classification to design the architecture of fault detection and isolation." Dans *3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, Août 1997, vol. 1, pp. 456-461.

[CI_13]

D. Theilliol, D. Sauter, L.G. Vela Valdes. "Integration of qualitative and quantitative methods for fault detection and isolation in dynamic systems." Dans *3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, Août 1997, vol. 2, pp. 687-692.

[CI_12]

D. Theilliol, C. Aubrun, D. Giraud, M. Ghetie. "DIALOGS : a fault diagnosis Toolbox for industrial process." Dans *3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, Août 1997, vol. 2, pp. 389-394.

[CI_11]

N. Pezzin, H. Noura, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Modelling of a two tanks mixing plant." Dans *11e Workshop de l'Institut franco-allemand pour les Applications de la Recherche*, Duisburg, Allemagne, Septembre 1996.

[CI_10]

D. Sauter, H. Noura, F. Hamelin, **D. Theilliol**. "Parity space approach for fault diagnosis in descriptor systems." Dans *IMACS-IEEE Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications CESA'96*, Lille, France, Juillet 1996, vol. 1, pp. 380-383.

[CI_9]

D. Giraud, C. Aubrun, **D. Theilliol**, L.G. Vela Valdes. "A fuzzy fault diagnosis method applied to a steam circuit." Dans *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, New-Orléans, Louisiane, Etats-Unis, Septembre 1996, vol. 3, pp. 1944-1950.

[CI_8]

F. Hamelin, D. Sauter, **D. Theilliol**. "Some extensions to the parity space method for fdi using alternated projection subspaces." Dans *34e IEEE Conference on Decision and Control*, New-Orléans, Louisiane, Etats-Unis, Décembre 1995, vol. 3, pp. 2407-2412.

[CI_7]

D. Theilliol, P. Weber, M. Ghetie, H. Noura. "A hierarchical fault diagnosis method using a decision support system applied to a chemical plant." Dans *IEEE International on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, Canada, Octobre 1995, vol. 3, pp. 2205-2210.

[CI_6]

H. Noura, **D. Theilliol**, C. Aubrun. "Control Law Reconfiguration for non linear systems based on multilayer neural and fuzzy model." Dans *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, San Antonio, Texas, Etats-Unis, octobre 1994, vol. 1, pp. 453-458.

[CI_5]

G. Bloch, **D. Theilliol**, P. Thomas. "Robust Identification of non-linear SISO systems with neural networks." Dans *IFAC Symposium on System Identification*, Copenhague, Danemark, Juillet 1994, vol. 3, pp 483-488.

[CI_4]

G. Bloch, **D. Theilliol**, P. Thomas. "Simultaneous detection, location and identification of faults for dynamic systems." Dans *2e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Espoo, Finlande, Juin 1994, vol. 1, pp. 59-63.

[CI_3]

D. Theilliol, G. Bloch, M. Robert, C. Humbert. "Practical determination of the neural network structure for non linear dynamical systems identification." Dans *IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks*, Lille, France, Avril 1994, pp. 325-329.

[CI_2]

M. Robert, J.M. Rivière, **D. Theilliol**, P. Geoffroy. "Smart or intelligent instruments in industry, past, present and future." Dans *8e Workshop de l'Institut franco-allemand pour les Applications de la Recherche*, Duisburg, Allemagne, Novembre 1993.

[CI_1]

D. Theilliol, I. Mairet, M. Robert, C. Aubrun, H. Noura. "Détection et classification de défauts capteurs dans une boucle de régulation via les réseaux de neurones." Dans *Conférence sur l'Automatisation Industrielle*, Montréal, Canada, Juin 1993, vol. 1, pp. 3.27-3.30.

4.4 - Conférences Nationales avec comité de lecture et actes

[CN_4]

D. Theilliol, J.C. Ponsart. "TD/TP d'Automatique à distance : comment conserver une interactivité avec l'enseignant ?." *Accepté au 4e Colloque sur l'Enseignement des Technologies, des Sciences de l'Information et des Systèmes en Electronique, Electrotechnique et Automatique*, Toulouse, France, Novembre 2003.

[CN_3]

M. A. Medina, **D. Theilliol**, D. Sauter. "Diagnostic de défauts des systèmes non linéaires décrits par des modèles linéaires interpolés." Dans *2e Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, Nantes, France, Juillet 2002, pp. 235-240.

[CN_2]

J.C Ponsart, **D. Theilliol**, M. Rosso. "Plate-forme polyvalente de travaux pratiques en Génie Electrique et Informatique Industrielle." Dans *3e Colloque sur l'Enseignement des Technologies, des Sciences de l'Information et des Systèmes en Electronique, Electrotechnique et Automatique*, Clermont-Ferrand, France, Octobre 2001, pp. 293-296.

[CN_1]

D. Theilliol, J.P. Metzger, C. Aubrun, D. Sauter, J. Harmand. "Estimation en ligne de

concentration de matières organiques : application à un procédé biologique anaérobie de dépollution.” Dans *Journées Thématiques "Automatique et Environnement"*, Nancy, France, Mars 2000.

4.5 - Conférences Internationales Sans comité de lecture

[CIS_4]

L.G. Vela Valdes, **D. Theilliol**, D. Sauter. “Fault detection and isolation in closed loop systems using parallel model and functional abstractions.” Dans *Symposium "System Modelling, Fault Diagnosis and Fuzzy Logic" TEMPUS Project JEP07759 Modify*, Vienne, Autriche, Juin 1997, pp. 103-112.

[CIS_3]

C. Aubrun, **D. Theilliol**. “Fuzzy residual evaluation for fault detection and isolation.” Dans *Symposium "Qualitative System Modelling, Qualitative Fault Diagnosis and Fuzzy Logic and Control" TEMPUS Project JEP07759 Modify*, Budapest, Hongrie, Avril 1996.

[CIS_2]

D. Theilliol, L.G. Vela Valdes, D. Sauter. “Integration of qualitative and quantitative methods for fault detection and isolation in dynamic systems.” Dans *Symposium "Qualitative System Modelling, Qualitative Fault Diagnosis and Fuzzy Logic and Control" TEMPUS Project JEP07759 Modify*, Budapest, Hongrie, Avril 1996.

[CIS_1]

H. Noura, **D. Theilliol**, C. Aubrun. “Restructuration of control Laws.” Dans *Workshop on Automation and control Engineering in Higher Education TEMPUS Project JEP07759 Modify*, Vienne, Autriche, Juillet 1995.

4.6 - Conférences Nationales Sans comité de lecture

[CNS_1]

D. Theilliol, M. Ghetie, D. Giraud, D. Sauter. ”DIALOGS : une boîte à outils logiciels pour le diagnostic de défauts de systèmes industriels.” Dans *Journées d'Etude sur les Logiciels pour le traitement de l'Image, du Signal et l'Automatique*, Nancy, France, Mars 1997.

Seconde Partie :

Description des travaux de recherche

1 - Préambule

De nombreux travaux sont consacrés à l'amélioration des performances des installations de plus en plus sophistiquées dans le domaine de la commande des systèmes. Cependant, les applications considérées requièrent des systèmes sûrs et disponibles. Pour assurer la surveillance en ligne des procédés, des algorithmes destinés au diagnostic de défauts ont été développés au cours des vingt dernières années. Le diagnostic de systèmes complexes définis par un ensemble $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_i, i = 1, \dots, n\}$ de sous-systèmes fonctionnels interconnectés dépendants du système étudié, permet de superviser ce dernier, vis-à-vis des défauts, par un autre ensemble $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}_j, j = 1, \dots, r\}$ de sous-systèmes de diagnostic. \mathcal{S} et \mathcal{D} sont affectés par un ensemble de défauts \mathcal{F} . Les ensembles \mathcal{S} et \mathcal{D} sont supposés être reliés par une connection logique et fonctionnelle adaptée à l'application considérée. Chaque sous-système $\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}$ peut être affecté par un certain nombre q_i de défauts, noté $f_l^{\mathcal{S}_i}$ avec $l = 1, \dots, q_i$. Chaque sous-système $\mathcal{D}_j \in \mathcal{D}$ est supposé générer un signal r_j sensible à un ou plusieurs

défauts. L'ensemble \mathcal{F} regroupe $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ défauts affectant \mathcal{S} comme illustré à la figure 1.1.

L'information concernant l'influence des défauts sur \mathcal{S} à partir des signaux r_j générés par \mathcal{D} est contenue dans différentes matrices de signature des défauts et/ou défaillances, également nommées matrices de diagnostic. Etant donné qu'il n'est pas nécessaire, pour localiser un composant défectueux dans un système complexe, de considérer celui-ci dans son ensemble, la décomposition en sous-systèmes, dont diverses méthodes sont proposées par [Titli, 1979], permet de construire une matrice de diagnostic dédiée à un sous-système $\mathcal{S}_i \in \mathcal{S}$. La problématique de la propagation des défauts, inhérente au diagnostic hiérarchisé issu de la décomposition des systèmes complexes $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_i, i = 1, \dots, n\}$, n'est pas abordée dans ce mémoire, le diagnostic de défauts est consacré aux systèmes multivariés \mathcal{S}_i de dimension réduite. La détection et la localisation de défauts sur un système physique nécessitent, soit la mise en oeuvre d'une approche stochastique fondée directement sur l'évolution des signaux d'entrée-sortie, soit la génération d'un résidu ou d'un banc de résidus par l'intermédiaire duquel une hypothèse de défaut ou de bon fonctionnement peut être émise. Ces deux approches, qui ne diffèrent que par les moyens utilisés pour effectuer le diagnostic du système, font l'objet de nombreux travaux de recherche. Dans ce mémoire, seule la seconde approche, le diagnostic de défauts à base de modèles, est étudiée.

Le premier chapitre, intitulé *Méthodes de décision efficiente en terme d'isolation de défauts*, est entièrement consacré à un rapide état de l'art bibliographique dévolu à la tâche de diagnostic de défauts à base de modèles, ainsi qu'aux définitions et aux équivalences des méthodes. Après avoir pris connaissance du contexte, je présente mes travaux scientifiques consacrés à la synthèse de méthodes de décision efficiente en terme d'isolation de défauts par la caractérisation des méthodes internes du diagnostic sous forme de modèle ontologique. Ce dernier modèle ne remet pas en cause la construction de la matrice de diagnostic dépendante de

\mathcal{S} et \mathcal{D} , mais il permet d'accroître le nombre de défauts localisés par une meilleure définition de l'ensemble de défauts \mathcal{F} vis-à-vis de son environnement. Le développement de notre contribution scientifique dans le domaine du diagnostic se poursuit, après avoir mis en exergue l'absence de robustesse au niveau de l'étape de décision. Une méthode de décision par l'intégration de données qualitatives et quantitatives est présentée. A partir des informations supplémentaires extraites de \mathcal{D} , le but est de réduire les fausses alarmes, les non-détections de défauts, et d'être robuste vis-à-vis des erreurs de modélisation. L'illustration des méthodes développées est réalisée à partir de deux systèmes linéaires élémentaires \mathcal{S}_1 avec un ensemble de méthodes \mathcal{D} en présence d'un ensemble de défauts \mathcal{F} . La figure 1.1 synthétise sous forme graphique les travaux de recherche réalisés.

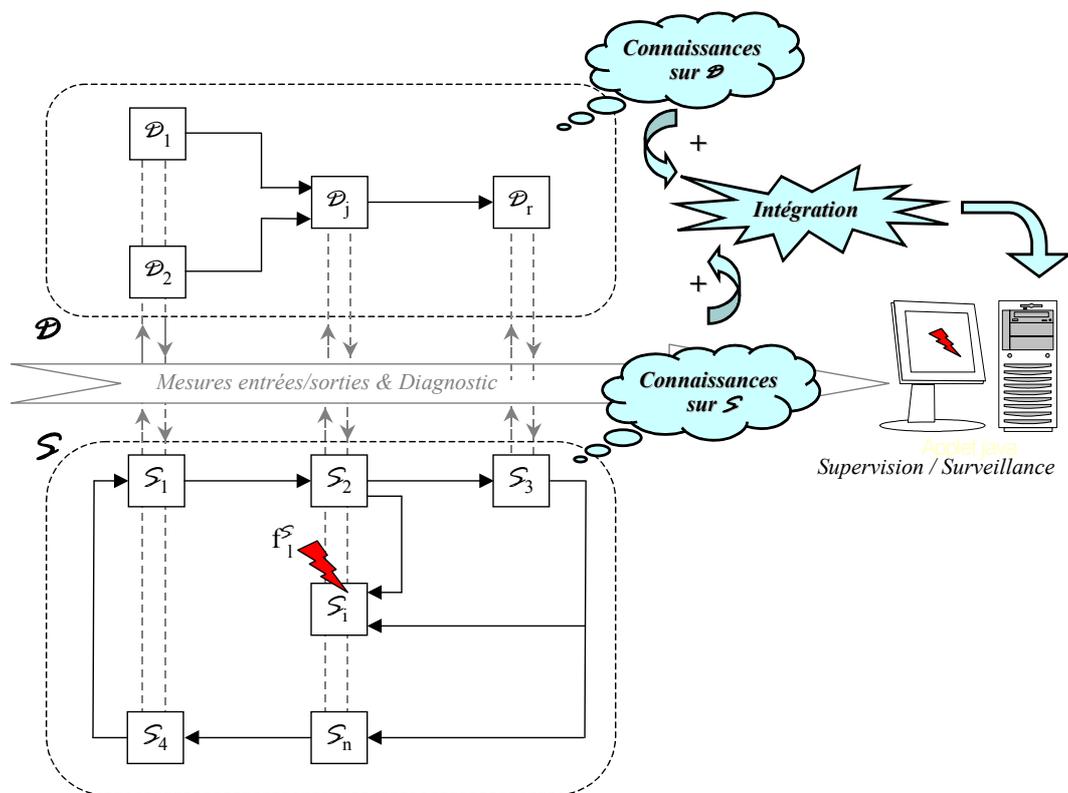


Figure 1.1 : Illustration synthétique des travaux de recherches présentés au premier chapitre.

Les défauts ou défaillances liés aux capteurs, aux actionneurs et aux composants peuvent en fonction de leur amplitude modifier considérablement le comportement dynamique des systèmes exploités, induisant une dégradation des performances désirées et conduisant également à l'instabilité de ces derniers. En l'absence d'une couche logicielle de surveillance, n'intégrant pas la propriété de tolérance aux défauts développés à l'aide d'une boucle de décision pour pallier aux défaillances, l'opérateur de conduite constitue l'unique levier non optimal pour atteindre les objectifs de production fixés. Dans le but de réduire cette conduite empirique en présence de défauts, le concept des systèmes tolérants aux défauts a été introduit relativement récemment à la surveillance et de nombreuses approches *ad hoc* ont été proposées. Un système tolérant aux défauts est conçu dans le but de réaliser son objectif, même en présence de défauts, afin d'éviter tout comportement catastrophique, ou bien, dans le cas d'impossibilité majeure de redéfinir de nouveaux objectifs pour des performances acceptables,

en conservant la stabilité du système. Un système tolérant aux défauts reste étroitement lié au domaine du contrôle ainsi qu'à celui du diagnostic. Une terminologie a été définie par [Blanke et al., 2000], je propose de m'en inspirer et d'adapter celle-ci, établie sur la base du problème de contrôle standard proposé par [Staroswiecki et Gehin, 2001].

Un système de contrôle est défini généralement par une classe \mathcal{U} de loi de commande, un objectif γ et un ensemble \mathcal{C} de contraintes déclinées à travers une structure s et les paramètres θ du système \mathcal{S} . L'objectif γ peut s'exprimer sous la forme d'un suivi de trajectoire, de comportement dynamique à suivre à travers un modèle de référence ou d'un critère optimal J à remplir. Classiquement, le problème du contrôle consiste à trouver la commande $u \in \mathcal{U}$ permettant d'atteindre γ sous la contrainte \mathcal{C} , soit à résoudre :

$$\langle \gamma, s, \theta, \mathcal{U} \rangle \quad (1.1)$$

La représentation (1.1) est utile pour illustrer les définitions de la terminologie associée aux systèmes tolérants aux défauts et se décline selon une approche passive et active [Patton, 1997]. L'approche passive est utilisée pour qualifier les commandes robustes à un ensemble de défauts prédéfinis. L'idée de base réside dans le fait d'établir un système en boucle fermée robuste à l'encontre des incertitudes et à un ensemble restreint de défauts. Cette approche ne requiert aucune information sur la détection, la localisation et l'estimation des défauts. Le système de commande palliant les défauts est supposé identique en structure s et doit être une solution de :

$$\langle \gamma, s, \Theta, \mathcal{U} \rangle \quad (1.2)$$

où Θ constitue un ensemble de valeurs pouvant être prises par θ .

L'approche passive regroupe des stratégies à la capacité limitée en terme de défauts à traiter mais non en terme d'efficacité vis-à-vis des défauts prédéfinis. Le lecteur intéressé par cette approche se référera par exemple à [Veillette et al., 1992], [Zhao et Jiang, 1998], [Liang et al., 2000] et [Yang et al., 2001].

Contrairement à l'approche passive, un système tolérant basé sur une approche active réagit dès l'occurrence des défauts, en reconfigurant ou en restructurant les actions de commande, de telle sorte que la stabilité et des performances acceptables soient maintenues. L'approche active est définie en utilisant les ressources disponibles au niveau du système pour s'accommoder des défauts. Le système tolérant aux défauts est établi sur une base de connaissances des défauts et requiert obligatoirement la présence d'algorithmes de surveillance destinés à détecter, isoler et estimer les défauts affectant le fonctionnement du procédé en cours de mission. Les systèmes tolérants aux défauts peuvent être considérés sous différents vocables comme des systèmes de commande reconfigurable, restructurable, pouvant se réparer ou également se redéfinir dans l'hypothèse d'une autonomie fiable, comme le précise [Zhang et Jiang, 2003] dans une excellente synthèse bibliographique consacrée à ce domaine de recherche. Dans l'hypothèse d'une conservation des performances à atteindre, la commande compense les effets des défauts, soit par la sélection d'une loi de commande prédéfinie, soit par la synthèse en ligne d'une nouvelle loi de commande. Ce type de mode de compensation constitue l'*accommodation de défauts*, stratégie dans laquelle les défauts modifient le contrôleur nominal. En présence de défauts, le problème, défini en (1.1), devient :

$$\langle \gamma, s_a, \theta_a, U \rangle \tag{1.3}$$

où s_a et θ_a représentent le procédé en défaut.

Sous l'hypothèse que $\langle \gamma, s_a, \theta_a, U \rangle$ a une solution, le diagnostic de défauts doit impérativement générer une unique estimation de s_a et θ_a . Par une sélection appropriée du contrôleur ou une adaptation en ligne de ce dernier en possession de l'estimation des défauts, l'*accommodation* résoud le problème :

$$\langle \gamma, \hat{s}, \hat{\theta}, U \rangle \tag{1.4}$$

Par contre, si $\langle \gamma, s_a, \theta_a, U \rangle$ ne possède pas de solutions, la stratégie dite de *reconfiguration* en propose une. Le système reconfiguré doit résoudre un nouveau problème remplaçant $\langle \gamma, s_a, \theta_a, U \rangle$ par $\langle \gamma, \sigma, \beta, V \rangle$, où certes, l'objectif γ reste le même, mais suivant une structure σ du procédé, des paramètres β et une loi de commande V différents. La partie défaillante est parfaitement définie dès que les défauts ont été détectés et localisés et devient inopérante dans le cadre de la nouvelle commande mise en place. Cette stratégie requiert une certaine redondance au sein du procédé considéré, ce dernier ne se limitant pas à un simple processus. Sa mise en place repose sur l'existence d'une nouvelle structuration des composants du procédé ainsi que d'une organisation des services sous forme de modes opératoires [Gehin et Staroswiecki, 1999].

En l'absence de solutions au problème, défini en (1.4), une stratégie dite de *restructuration*, terme défini dans le cadre projet national intitulé *Supervision et Accommodation de la COMmande* au sein de l'action Sûreté, Surveillance, et Supervision (S3) du GDR MACS [Noura, 2002], peut être envisagée. Cette dernière consiste en la modification de l'objectif nominal γ vers un objectif en mode dégradé γ_o parmi l'ensemble O des objectifs admissibles par le procédé exploité. La restructuration se résume à un problème de prise de décision consistant à trouver l'objectif $\gamma_o \in O$, une commande admissible V associée à partir d'une structure s et des paramètres adéquats θ de telle sorte que $\langle \gamma_o, s, \theta, V \rangle$ admette une solution, les propriétés de stabilité et de contrôlabilité devant être conservées. La *reconfiguration* et la *restructuration* sont des axes de recherche émergents encore peu traités, et feront l'objet de développement dans la partie consacrée aux *Perspectives de recherche*.

Mes activités de recherche s'inscrivent dans le développement et la définition de méthodes de diagnostic \mathcal{D} dédiées à l'*accommodation* de défauts des systèmes tolérants. Cependant, pour des raisons historiques, la plupart des recherches consacrées au diagnostic et aux systèmes tolérants aux défauts ont été conduites séparément. Les techniques de détection et d'isolation de défauts ont été développées exclusivement à des fins de diagnostic ou de suivi de procédé, très rarement comme une partie intégrant les systèmes tolérants actifs. D'autre part, un grand nombre de méthodes de commande tolérante aux défauts admettent l'hypothèse d'une parfaite connaissance sur le type, l'amplitude, l'instant d'apparition de la défaillance. Mon implication dans ces travaux de recherche contribue plus exactement à générer des solutions d'ensemble pour traiter la détection, l'isolation, l'estimation et l'*accommodation* de

défauts à base de modèles analytiques. Les procédés considérés \mathcal{S} sont étudiés au-delà d'une représentation exclusivement linéaire en les paramètres. Le second chapitre, intitulé *Analyse et synthèse de méthodes de détection, isolation, estimation et accommodation de défauts* est entièrement consacré à la description de notre contribution au diagnostic et à l'accommodation de défauts sur la base de loi de commande synthétisée à partir de modèles analytiques, comme illustré à la figure 1.2.

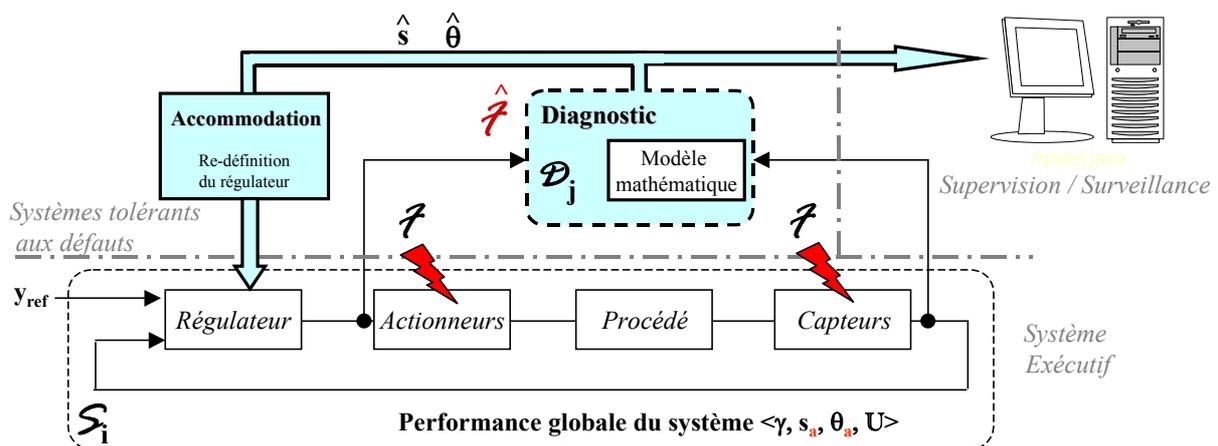


Figure 1.2 : Illustration synthétique des travaux de recherches présentés au second chapitre.

Ainsi, le diagnostic de défauts par le principe de découplage exact est exclusivement réalisé à base de modèles mathématiques, par redondance analytique des systèmes linéaires en présence d'incertitudes structurées, assimilant les défauts à des entrées inconnues. Cette approche est étendue aux systèmes non linéaires exacts ou représentés par une combinaison convexe en présence de défauts. S'intéressant au principe de découplage des entrées inconnues, l'estimation des entrées non mesurables modélisées sous forme d'incertitudes structurées au sein des procédés biologiques est également abordée dans ce chapitre. Associées à chaque mode de commande, je présente une analyse et une synthèse de méthodes d'accommodation de défauts sur le principe de rejets de perturbations. Nous nous sommes attachés pour chaque représentation du système étudié (linéaire, non linéaire, combinaison convexe) pour chaque thème abordé (diagnostic ou commande) à préciser le contexte scientifique. Ces précisions peuvent parfois nuire à la clarté du document, mais à travers ces indications, la démarche scientifique suivie tout au long de ces activités de recherche apparaît plus aisément. L'application de nos travaux de recherche sur un même procédé servant habituellement de benchmark, le système des trois cuves, permet d'illustrer et de valider les méthodes de diagnostic et d'accommodation à base de modèles linéaires et au-delà, méthodes qui contribuent au développement des systèmes tolérants aux défauts.

2 - Méthodes de décision efficiente en terme d'isolation de défauts.

2.1 - Introduction générale au diagnostic à base de modèles.

Compte tenu des enjeux en termes de productivité, de sécurité ou de qualité de production, de nombreuses approches ont été utilisées pour apporter une contribution à la solution de la détection et la localisation d'un mauvais fonctionnement, nommée plus généralement diagnostic. D'après Isermann [Isermann et Ballé, 1997], trois types d'anomalies sont à considérer :

- *erreur* : tout écart entre la valeur mesurée ou calculée, et la valeur réelle ;
- *défaut* : l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction(s) requise(s) avec des performances définies dans les spécifications techniques ;
- *défaillance* : l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant même de conduire à une défaillance. En l'absence de redondance matérielle, concernant le plus grand nombre de processus industriels, les informations issues du système à surveiller sont utilisées pour être comparées à des valeurs de références (valeurs normales). Dans le domaine du diagnostic, certains termes que nous serons amenés à utiliser sont communément employés. Pour les plus courants, une définition succincte est proposée ci-dessous :

- la *déteçtabilité* est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'une défaillance ou d'un défaut sur le procédé ;
- l'*isolabilité* est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut ;
- la *sensibilité* caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude en fonction du rapport de l'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut ;
- la *robustesse* détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations).

Les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes par rapport à la connaissance et au raisonnement : les méthodes *inductives* et *déductives* pour la première et les méthodes *externes* et *internes* pour la seconde. Dans le cadre des méthodes *inductives* et *déductives*, le type de raisonnement utilisé dans la résolution du problème constitue la principale caractéristique de ces méthodes [Ulieru, 1993]. A partir d'une connaissance a priori du défaut, la méthode *déductive* doit déterminer les effets au sein du système. Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut [Höfling et Pfeufer, 1994]. Lorsqu'une combinaison des raisonnements avant et

arrière, appelée raisonnement mixte, est considérée, la connaissance a priori de la cause (défaut) implique la connaissance de certains effets (symptômes). Les méthodes *externes* et *internes* reposent sur la connaissance d'un modèle. Les méthodes *externes* sont fondées sur la connaissance issue de l'expertise humaine, tandis que les méthodes *internes* dépendent de la connaissance issue à partir des modèles mathématiques. Les méthodes *externes* font appel à des procédures d'apprentissage ou de reconnaissance de formes. Les observations issues du système, des entrées et des sorties, sont exploitées selon le principe de causalité [Montmain et Gentil, 2000] ou pour conforter un raisonnement qualitatif [Travé-Massuyès et al., 1997] afin de déterminer les relations de cause à effet selon différents algorithmes de classification [Leonhardt et Ayoubi, 1997] et [Dubois et al., 2003].

Mes principales activités de recherche portent sur les méthodes internes. Les défauts considérés ne concernent que les changements dans le domaine temporel. Les méthodes *internes* se fondent sur des modèles physiques ou mathématiques. Ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement du système considéré sous forme d'un modèle pour reproduire le comportement du système (prédictions). Les écarts, appelés résidus, entre les observations, issues du système, et les prédictions, issues du modèle, génèrent des candidats permettant de trouver les relations de cause (défaut) à effet (symptôme). Un générateur de résidus est synthétisé à partir des données d'entrées $u \in \mathcal{R}^p$ et sorties observées $y \in \mathcal{R}^m$. Le signal résidu possède la structure générale suivante :

$$r(p) = Q_{ry}(p)y(p) + Q_{ru}(p)u(p) \quad (2.1)$$

où Q_{ry} et Q_{ru} sont les matrices de transfert déterminées afin d'assurer de bonnes propriétés de détection et de localisation de défaut. Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon la définition et la synthèse de ces matrices, soit par :

- modèle de simulation [Jones et Burge, 1987], [Vadam et al., 1997], [Leitch et Galanti, 1992]: c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Ce modèle de diagnostic est issu du domaine de l'Intelligence Artificielle, cependant il utilise des concepts de base de la Commande Automatique et de l'Identification tels que le modèle de référence et le modèle parallèle [Leitch, 1993];
- équations de parité : d'après [Patton et Chen, 1991], une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaires peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système. Des équations de parité additionnelles peuvent être obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic, par exemple, en utilisant une redondance temporelle [Gertler, 1997];
- observateurs : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état [Frank, 1990]. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic;
- estimation paramétrique : l'estimation paramétrique est la détermination des valeurs des

paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système. Il s'agit de déterminer les valeurs numériques des coefficients des équations qui décrivent, au niveau de la structure, le modèle du système [Isermann, 1984]. Une condition d'excitation persistante est nécessaire afin d'assurer la convergence des paramètres liés aux constantes de temps du système.

La distinction entre ces méthodes internes de diagnostic est moins nette qu'il n'y paraît au premier abord. D'une part, les informations utilisées reposent toujours sur la connaissance des quatre grandeurs suivantes : les entrées, les sorties, la structure et le comportement temporel. D'autre part, il existe une équivalence entre l'espace de parité, les observateurs et l'estimation des paramètres :

- espace de parité - observateurs [Gertler, 1991], [Magni et Mouyon, 1994], plus récemment dans un contexte stochastique entre l'espace de parité et les filtres de Kalman [Gustafsson, 2002];
- espace de parité - estimation de paramètres [Delmaire et al., 1994], [Gertler, 1997], [Gertler et DiPierro, 1997];
- observateurs - estimation de paramètres [Alcorta Garcia et Frank, 1996a], [Magni, 1995].

Afin de résoudre le problème de la détection et de la localisation d'un mauvais fonctionnement, la tâche de diagnostic de défauts comporte trois actions :

- la détection de défauts indiquant l'occurrence d'un problème anormal au sein d'un système ;
- l'isolation de défauts précisant le type et/ou l'élément en défaut ;
- l'identification de défauts déterminant l'amplitude de la panne ou de la défaillance.

Quelle que soit la méthode utilisée, afin d'exploiter au maximum l'information contenue dans les mesures prélevées sur le processus, cette tâche se décompose selon les trois étapes suivantes :

- la génération de résidus : elle consiste à associer à la paire valeurs de référence-observations des faits, appelés résidus, qui permettent d'évaluer une différence par rapport aux conditions normales de fonctionnement;
- l'évaluation des résidus : les résidus sont comparés avec des limites définies préalablement, et de cette comparaison résulte des symptômes générant un vecteur de cohérence. Le problème de l'évaluation consiste à définir le seuil afin de détecter la présence de changements. Effectivement, en régime de fonctionnement normal, les résidus sont générés de manière à être statistiquement nuls et s'écartent «notablement» de zéro en présence de défauts ;

- la décision : alors qu'un seul résidu suffit pour connaître l'existence d'un défaut au sein du système, en revanche, plusieurs résidus sont nécessaires afin de trouver la cause du défaut. La décision constitue la dernière étape de la tâche de diagnostic. Elle consiste en la comparaison du vecteur de cohérence avec l'ensemble des signatures de référence, de bon et de mauvais fonctionnement rassemblées dans un tableau de signatures, appelé également matrice de diagnostic. La tâche de décision permet de différencier les défauts, c'est-à-dire de localiser la cause de l'anomalie dans le système.

Les résidus r peuvent être générés suivant deux grandes approches selon le processus concerné et les moyens mis à disposition :

- par la *redondance matérielle* : les observations et la référence sont issues de plusieurs capteurs mesurant la même variable [Chitaro et al., 1993]. L'avantage de la redondance matérielle réside dans la fiabilité et la simplicité de mise en oeuvre de la méthode de diagnostic. En revanche, le coût et l'encombrement, ainsi qu'un champ d'application limité aux défauts de capteurs, constituent les principaux inconvénients;

- par la *redondance analytique* : les observations et les valeurs de référence sont issues de plusieurs capteurs mesurant des variables différentes. Cette redondance nécessite d'avoir à disposition un modèle mathématique précis du système [Frank, 1990]. La redondance analytique permet, d'une part, le diagnostic d'un grand nombre de défauts et d'autre part, de remplacer la redondance matérielle par une redondance informationnelle. Récemment, [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001] développent et étendent les techniques de détection et d'isolation de défauts par redondance analytique au cas des systèmes non linéaires.

La valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes [Isermann, 1984]. Cette étape de quantification est appelée évaluation de résidus. L'évaluation consiste à définir le seuil J_{th} à partir duquel le défaut est déclaré être présent. L'étape d'évaluation a pour objectif de décider s'il y a ou non un défaut dans le système. Un symptôme, noté $s(r)$, correspond à un résidu évalué ou quantifié. A titre d'exemple, un simple test à seuil basé sur la norme H_2 , fréquemment utilisé, est représenté par :

$$\text{si } \|r\|_2 > J_{th} \Rightarrow s(r) = 1 \text{ signifiant qu'un défaut est détecté} \quad (2.2)$$

$$\text{sinon } s(r) = 0 \quad (2.3)$$

Les défauts peuvent provenir d'un capteur, d'un actionneur ou du système. Un seul résidu suffit pour connaître l'existence d'un défaut dans le système. En revanche, plusieurs résidus sont nécessaires afin de trouver la cause du défaut selon deux types d'approches habituellement distinctes [Gertler, 1991]. La première approche considère des *résidus directionnels* définis de telle sorte qu'ils prennent une direction particulière dans l'espace des résidus lors de l'occurrence d'un défaut. La seconde approche traite des *résidus structurés* conçus de manière à être sensible à certains défauts et insensible à d'autres conformément à une structure de diagnostic dédié. Nos travaux de recherche se sont essentiellement appliqués à considérer uniquement les *résidus structurés* car ne nécessitant pas un générateur de résidus spécifiques au contraire des *résidus directionnels* généralement associés aux filtres de détection. Ainsi, une signature de référence, constituée d'éléments binaires, est définie pour chaque défaut affectant les éléments du vecteur de symptômes issu de l'évaluation d'un

vecteur de résidus. Dans le cas d'un fonctionnement normal, la signature de référence est le vecteur nul. Les signatures de référence, de bon et de mauvais fonctionnement, sont rassemblées dans un tableau de signatures ou matrice de diagnostic. Cette matrice est obtenue pendant l'étape d'apprentissage, en utilisant la connaissance heuristique et la connaissance analytique du comportement du système. A titre d'exemple, considérons la table de signatures suivante, établie à partir de trois symptômes s_1 , s_2 et s_3 en présence de deux défauts f_A et f_B avec les décisions associées aux défauts ϕ_A et ϕ_B :

	$\phi_{\bar{A}\bar{B}}$	ϕ_A	ϕ_B
s_1	0	0	1
s_2	0	1	0
s_3	0	1	1

Tableau 2.1 : Exemple de matrice de diagnostic

Cette matrice de diagnostic est constituée de trois signatures de référence : une signature de référence de bon fonctionnement $S_{\phi_{\bar{A}\bar{B}}}$ dont toutes les composantes sont nulles, une signature de référence associée au défaut f_A avec $S_{\phi_A} = \bar{s}_1 \wedge s_2 \wedge s_3$ et une autre signature de référence associée au défaut f_B se caractérisant par l'insensibilité du symptôme s_2 à l'occurrence de f_B soit $S_{\phi_B} = \bar{s}_1 \wedge s_2 \wedge \bar{s}_3$.

La décision constitue la dernière étape de la tâche de diagnostic. En supposant la matrice de diagnostic M_ϕ constituée de $M_\phi(i,j)$ éléments où l'entier i représente l'élément suspecté d'être en défaut ($i = \{1, \dots, q\}$) et j le numéro du symptôme concerné ($j = \{1, \dots, J\}$), il s'agit de comparer le vecteur de cohérence, noté S , constitué des symptômes générés par l'évaluation des résidus ($S(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_J(t)]^T$), avec chaque signature de référence S_{ϕ_i} de la matrice de diagnostic M_ϕ . L'étape de décision va nous permettre de différencier les défauts, c'est-à-dire de trouver la cause de l'anomalie dans le système par un simple test logique sur la base du descripteur binaire de l'état du processus. A tout instant $\forall t$, la décision est définie par l'évaluation de l'indicateur binaire suivant :

$$\forall i, \mathfrak{I}_{\phi_i}(t) = \overline{S_{\phi_i} \oplus S(t)} \quad (2.4)$$

La figure ci-dessous représente sous forme d'un schéma de blocs fonctionnels, la tâche de diagnostic munie des informations associées. Les chercheurs, désirant étudier le diagnostic de défauts à base de modèles linéaires, peuvent se procurer un récent ouvrage écrit par mes collègues du CRAN ([Maquin et Ragot, 2000]) où un exemple pratique issu du milieu industriel compose le dernier chapitre du livre.

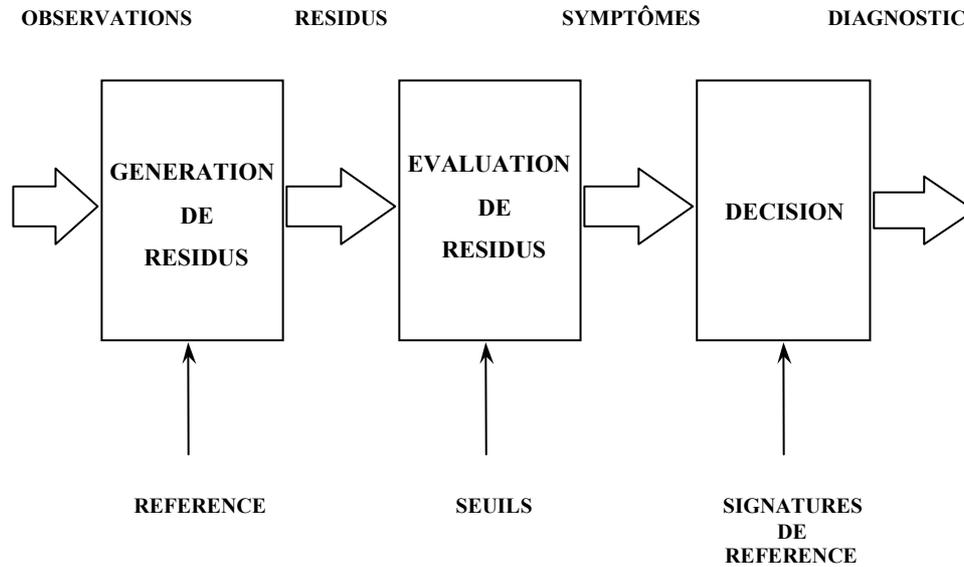


Figure 2.1 : La tâche de diagnostic.

Cette rapide synthèse, consacrée au diagnostic à base de modèles, nous sensibilise quant au nombre de méthodes où chacune d'entre elle possède des caractéristiques et des avantages particuliers pour la détection et l'isolation de défauts malgré certaines équivalences. Un cadre générique, déterminant pour classifier et organiser les méthodes de diagnostic de défauts, est développé dans le paragraphe suivant. Ce cadre générique, dénommé modèle ontologique, permet, en présence de signatures identiques, d'accroître le nombre de défauts localisés grâce à un choix particulier d'une connaissance interprétative : la fonction. Cette approche originale, issue du domaine de l'Intelligence Artificielle, consiste à chercher les caractéristiques les plus représentatives des méthodes de diagnostic pour interpréter le ou les défauts afin de permettre une *localisation optimale*. Un exemple académique est présenté pour valider et illustrer notre activité de recherche difficilement comparable à d'autres travaux.

2.2 - Le modèle ontologique du diagnostic : un cadre générique pour une décision efficiente.

2.2.1 - Introduction

Les concepts issus de l'Intelligence Artificielle constituent la source d'inspiration des travaux entrepris dans le cadre de la thèse de Luis Gerardo Vela Valdes [TH_Vela-Valdes]. Notre objectif consiste en la spécification d'un modèle ontologique du diagnostic, cadre générique et formel, permettant ainsi d'interpréter la connaissance contenue dans les résidus et les signatures de défauts de manière adéquate.

Comme précisé par [Chitaro et al., 1993], la capacité de l'être humain à raisonner sur les systèmes physiques dépend essentiellement du type de connaissance utilisée, ainsi que de l'organisation et de la classification de cette dernière. La connaissance du modèle joue un rôle capital dans les méthodes internes du diagnostic. La classification de cette connaissance permet de mieux comprendre le modèle. D'après [Chitaro et al., 1993] et [Jansweijer et al., 1993], la connaissance peut être divisée en deux classes :

- la connaissance fondamentale composée de la structure et du comportement du modèle. La structure définit les éléments du système et leurs connexions. Le comportement est décrit par les équations caractérisant les variables et les paramètres.

- la connaissance interprétative constituée de la fonction et de la téléologie. La fonction s'applique à un objectif particulier tandis que la téléologie s'applique à un objectif général. Par exemple, une pompe et un moteur peuvent avoir la même téléologie ou objectif général telle la transformation de puissance. Cependant, la pompe et le moteur ont des objectifs particuliers différents, l'un, une transformation de la puissance électrique en hydraulique, l'autre, une transformation de la puissance électrique en mécanique.

A la classification de la connaissance énoncée précédemment, l'ontologie, ayant pour objectif l'organisation de la connaissance, permet d'unifier le schéma dans lequel les classes de connaissance peuvent être définies, énumérées et représentées en terme générique. Ainsi conformément à la définition de [Ramoni et al., 1992], chaque classe est définie par deux éléments : les entités et les relations qui permettent de décrire, de façon générique, les connaissances fondamentales et interprétatives. Dans la structure, les entités sont définies par les composants et les relations par les connexions. Dans le comportement, les paramètres et les variables définissent les entités alors que les équations spécifient les relations. La connaissance fondamentale se décrit à l'aide de concept générique c'est-à-dire entité et relation. Les entités sont définies par des objectifs et les relations par des conditions. Par conséquent, au sein de la fonction, les entités et les relations sont décrites par l'objectif particulier et les conditions, alors que, au sein de la téléologie, les entités sont définies par l'objectif général et les relations sont spécifiées par les conditions. La figure suivante illustre le schéma du modèle ontologique de la connaissance :

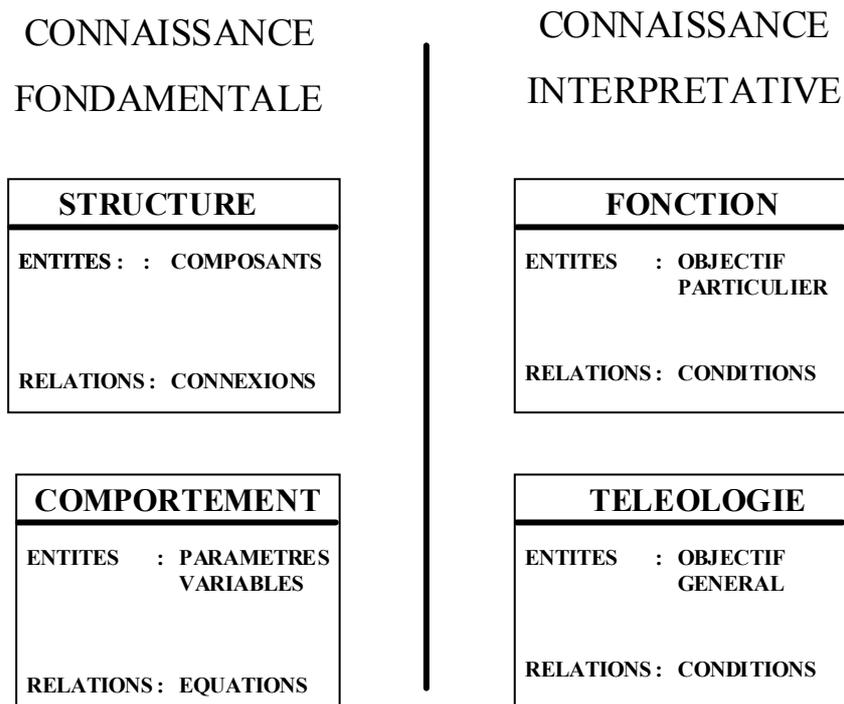


Figure 2.2 : Ontologie de la connaissance.

Dans la plupart des exemples, présentés dans la littérature, la tâche de diagnostic considère, soit des défauts additifs et multiplicatifs, soit des défauts associés aux capteurs, actionneurs et composants. Cependant, il est possible d'interpréter et de classifier autrement les défauts. Dans le cadre du travail de thèse de L.G. Vela Valdes [TH_Vela-Valdes], nous avons proposé une définition du modèle ontologique, outil de représentation et de classification générique des connaissances du diagnostic basé sur les modèles internes, méthodes considérées dans le cadre de mes activités de recherche comme permettant d'accroître les performances de la localisation de défauts.

2.2.2 - Définition et conception du modèle ontologique du diagnostic

Pour augmenter le nombre de défauts à localiser, il faut s'attacher, au sein du modèle ontologique à la fonction, interprétation subjective de la structure et du comportement. Le choix du terme le plus adapté pour définir l'objectif particulier (entités) et les conditions (relations) n'est pas une mission évidente. Par exemple, le changement de la valeur nominale d'une résistance électrique peut être interprété comme un défaut multiplicatif [Höfling et Pfeufer, 1994], électrique [CI_14], ou thermique [Da Cunha et al., 1997]. Les entités de la fonction sont définies par l'objectif particulier, interprétation subjective des défauts. Notre travail de recherche a consisté à utiliser la notion de fonction pour la détection et la localisation de défauts. Le modèle ontologique a constitué un cadre générique et formel permettant d'utiliser la notion de fonction avec les différentes méthodes internes du diagnostic. Nous avons proposé le modèle ontologique suivant :

DETECTION ET LOCALISATION DE DEFAUTS

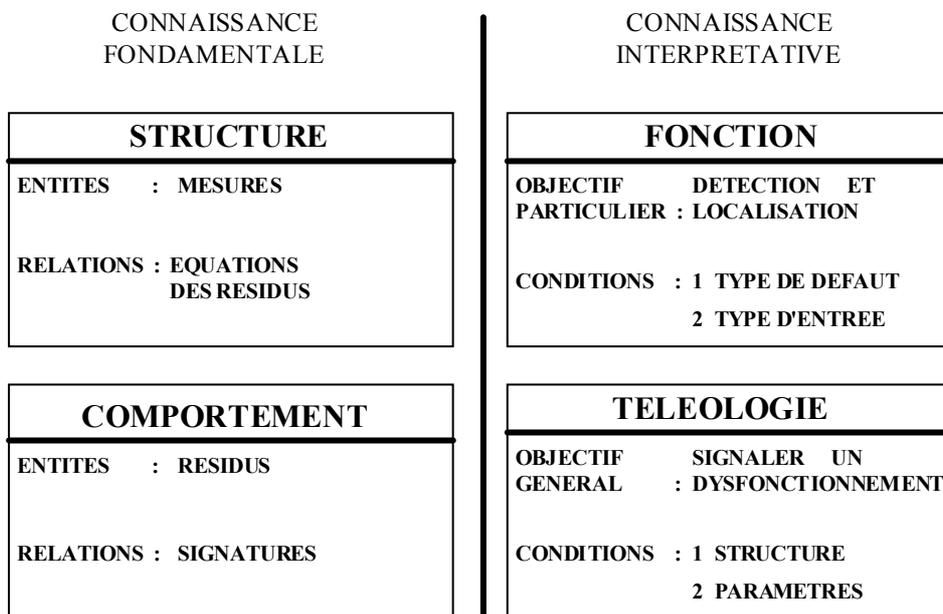


Figure 2.3 : Modèle ontologique de la détection et la localisation de défauts.

Ce modèle ontologique proposé est valable pour les méthodes internes. Notons que les résidus issus du modèle parallèle et de l'espace de parité proviennent des équations de parité. En effet, les équations de parité dans le modèle parallèle sont obtenues à partir d'une représentation d'entrée-sortie, tandis que dans l'espace de parité les équations sont obtenues à partir d'une représentation d'état. Les caractéristiques des équations de parité sont valables aussi bien pour le modèle parallèle que pour l'espace de parité.

Les conditions sont aussi importantes que les objectifs pour définir la fonction et la téléologie. Afin de trouver ces conditions, il faut étudier les caractéristiques des méthodes internes de diagnostic. D'après Isermann [[Isermann, 1997] les principales caractéristiques des équations de parité, des observateurs et de l'estimation paramétrique sont les suivantes :

pour les *équations de parité* :

- la structure et les paramètres du modèle doivent être connus ;
- elles sont bien adaptées pour les défauts additifs ;
- un temps de réponse court par rapport aux défauts soudains ;
- l'utilisation en ligne est possible même pour les processus rapides ;
- pour les défauts additifs, il est nécessaire que les signaux d'entrée soient excités. Cependant, il est impossible de détecter tous les défauts paramétriques ;
- pour la détection des défauts liés aux constantes de temps, l'amplitude du défaut doit être grande. Si l'amplitude est petite, seuls les défauts additifs ou les défauts liés aux gains peuvent être détectés.

pour les *observateurs* :

- la structure et les paramètres du modèle doivent être connus ;
- ils sont bien adaptés pour les défauts additifs ;
- dans la plupart des cas, il est nécessaire d'utiliser plusieurs signaux de sortie ;
- un temps de réponse court par rapport aux défauts soudains ;
- la détection des défauts paramétriques dépend de la sélection des variables d'état et du type du banc des observateurs ;
- pour les processus rapides, l'utilisation en ligne dépend du nombre d'observateurs ;
- l'excitation des signaux d'entrée n'est pas nécessaire pour les défauts additifs. Cependant il est impossible de détecter tous les défauts paramétriques ;
- dans la plupart des cas, seuls les défauts de grande amplitude peuvent être détectés.

pour l'estimation paramétrique :

- la structure du modèle doit être connue ;
- elle doit être bien adaptée pour les défauts multiplicatifs et les défauts additifs sur les signaux d'entrée et de sortie ;
- quelques défauts paramétriques sont seulement détectables ;
- il est possible de détecter les défauts soudains ou progressifs même s'ils sont de petite amplitude ;
- il est possible de détecter et d'isoler les défauts liés aux coefficients physiques ;
- l'utilisation en ligne est possible si le processus n'est pas très rapide ;
- l'excitation persistante est nécessaire.

Au sein de la structure du modèle de diagnostic, les mesures des variables constituent les éléments de base et les équations des résidus établissent le lien entre les variables et les paramètres. Les mesures sont le terme le plus adapté pour exprimer le concept d'entités, tandis que le concept de relations peut s'exprimer à travers les équations des résidus. Dans le comportement du modèle du diagnostic, les entités et les relations sont décrites par les résidus et les signatures. Ces définitions sont les plus appropriées pour exprimer le comportement du modèle du diagnostic car les résidus et les signatures permettent de connaître le bon et le mauvais fonctionnement du système.

Dans le cadre de la généralisation du modèle ontologique du diagnostic, nous avons défini pour chaque étape d'évaluation et de décision un cadre générique et formel permettant ainsi une meilleure structuration des connaissances ([TH_Vela-Valdes]). La fonction, connaissance interprétative au sein du modèle ontologique, constitue une notion essentielle permettant d'interpréter autrement la connaissance contenue dans les résidus et les signatures, augmentant ainsi les performances de la décision en terme de nombre de défauts localisés.

2.2.3 - Diagnostic de défauts d'un moteur à courant continu

L'illustration de nos travaux de recherche à la simulation d'un moteur à courant continu en boucle ouverte, soumis à des défauts capteurs, actionneurs et composants, montre les

avantages de cette approche générique en présence de signatures identiques permettant d'accroître le nombre de défauts isolés. La fonction est utilisée notamment dans le but d'obtenir des informations additionnelles passant par l'exploitation des signatures de défauts issus de l'espace de parité.

Soit un moteur à courant continu [Höfling et Pfeufer, 1994] représenté sous la forme classique suivante :

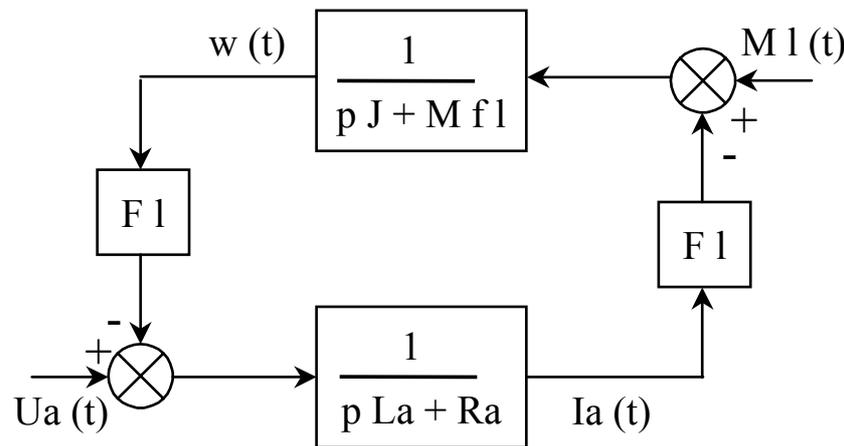


Figure 2.4 : Schéma bloc du moteur à courant continu.

où $R_a = 1,64\Omega$ représente la résistance de l'inducteur, $L_a = 0,00676\Omega s$ l'inductance de l'inducteur, $F_l = 0,345Vs$ le flux magnétique, $J = 0,9335e-3kgm$ la constante d'inertie, $Mf_l = 1,72e-3Nms$ le coefficient de frottements visqueux.

Le moteur considéré possède les caractéristiques nominales suivantes : Puissance 1,2 kW - Vitesse 3000tr/min - Courant 10 A - Tension 110 V. Le système est muni de quatre capteurs afin de mesurer la valeur des entrées U_a tension de l'inducteur (V) et M_l couple de charge (Nm) ainsi que la valeur des sorties I_a courant de l'inducteur (A) et w vitesse angulaire de l'axe du moteur (rad/s). Les mesures de courant et de vitesse sont entachées d'un bruit blanc gaussien $N(0,1e-6)$. Nous avons simulé le fonctionnement du moteur à l'aide du logiciel SIMULINK version 1.3.C autour d'un unique point de fonctionnement défini à partir des valeurs des entrées $U_a = 110V$ et $M_l = 1,4575Nm$ soit des valeurs de sorties équivalentes à $I_a = 5,6796A$ et $w = 291,8418rads^{-1}$.

Les défauts, considérés comme non intermittents, se caractérisent par des variations brutales des valeurs nominales au niveau des capteurs et des composants de l'ordre de $\mp 10\%$. Comme proposé par [Höfling et Pfeufer, 1994], la génération des résidus est établie à partir des équations de parité, où chacune est découplée d'un signal d'entrée ou de sortie :

$$r_1(t) = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a(t) + F_l w(t) - U_a(t) \quad (2.5)$$

$$r_2(t) = J \frac{dw}{dt} + Mflw(t) - FI I_a(t) + MI(t) \tag{2.6}$$

$$r_3(t) = JL_a \frac{d^2 I_a}{dt^2} + (L_a Mfl + JR_a) \frac{dI_a}{dt} + (FI^2 + R_a Mfl) I_a(t) + J \frac{dU_a}{dt} - Mfl U_a(t) - FIMI(t) \tag{2.7}$$

$$r_4(t) = JL_a \frac{d^2 w}{dt^2} + (L_a Mfl + JR_a) \frac{dw}{dt} + (FI^2 + R_a Mfl) w(t) - FI U_a(t) + L_a \frac{d}{dt} MI + R_a MI(t) \tag{2.8}$$

En considérant uniquement la présence de défauts sous forme additive ou multiplicative, la matrice de diagnostic associée se définit selon le tableau suivant :

0 : pas de changement dans la valeur moyenne du résidu

M : changement dans la valeur moyenne du résidu

	DEFAUTS CAPTEURS				DEFAUTS PARAMETRES				
	d C Ml + 10 %	d C Ua + 10 %	d C w - 10 %	d C Ia - 10 %	d Ra + 10 %	d La - 10 %	d Fl + 10 %	d J - 10 %	d Mfl + 10 %
r1	0	M	M	M	M	0	M	0	0
r2	M	0	M	M	0	0	M	0	M
r3	M	M	0	M	M	0	M	0	M
r4	M	M	M	0	M	0	M	0	M

SIGNATURES IDENTIQUES

Tableau 2.2 : Matrice de diagnostic sans la notion de fonction

Par contre, si la fonction au sein du modèle ontologique associé à l'utilisation des équations de parité est définie par rapport aux variables du moteur de cette manière :

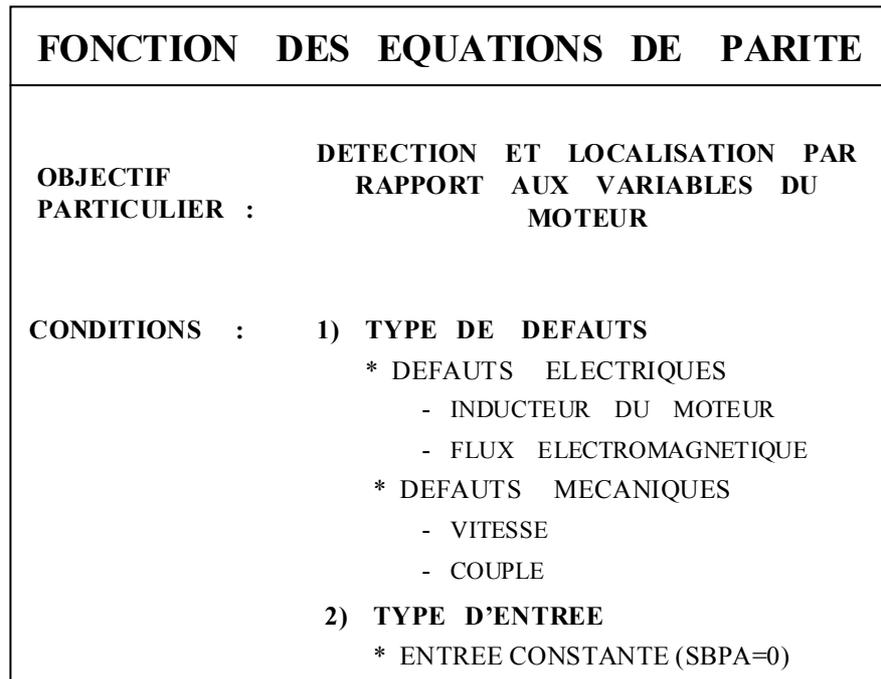


Figure 2.5 : Modèle ontologique de la fonction des équations de parité.

Dans ce contexte, la matrice de diagnostic devient :

0 : pas de changement dans la valeur du résidu

M : changement dans la valeur moyenne du résidu

	DEFAUTS ELECTRIQUES					DEFAUTS MECANIQUES			
	FLUX	DEFAUTS ARMATURE				VITESSE	DEFAUTS COUPLE		
	d E 1	d E 2	d E 3	d E 4	d E 5	d M 1	d M 2	d M 3	d M 4
r1	M	0	M	M	M	M	0	0	0
r2	M	0	M	0	0	M	0	M	M
r3	M	0	M	M	M	0	0	M	M
r4	M	0	0	M	M	M	0	M	M
	d FI + 10 %	d La - 10 %	d C Ia - 10 %	d Ra + 10 %	d C Ua + 10 %	d C w - 10 %	d J - 10 %	d Mfl + 10 %	d C MI + 10 %

Tableau 2.3 : Matrice de diagnostic avec la notion de fonction

L'avantage de considérer les défauts dans ce domaine d'abstraction est évident : il augmente le nombre de défauts isolés. De plus, l'utilisation en parallèle d'un schéma de diagnostic basé

sur l'estimation paramétrique, permet d'isoler tous les défauts, selon le schéma présenté à la figure 2.6. L'ensemble des résultats sont présents dans les travaux de thèse de Luis Gerardo Vela Valdes [TH_Vela-Valdes]. Il semble évident qu'en l'absence de ce cadre générique et surtout en l'absence d'une fonction appropriée, il est tout à fait possible d'obtenir ces mêmes résultats, cependant grâce à l'approche proposée, l'objectif de détection et de localisation de défauts peut être atteint de manière systématique avec beaucoup plus d'assurance qu'une démarche heuristique.

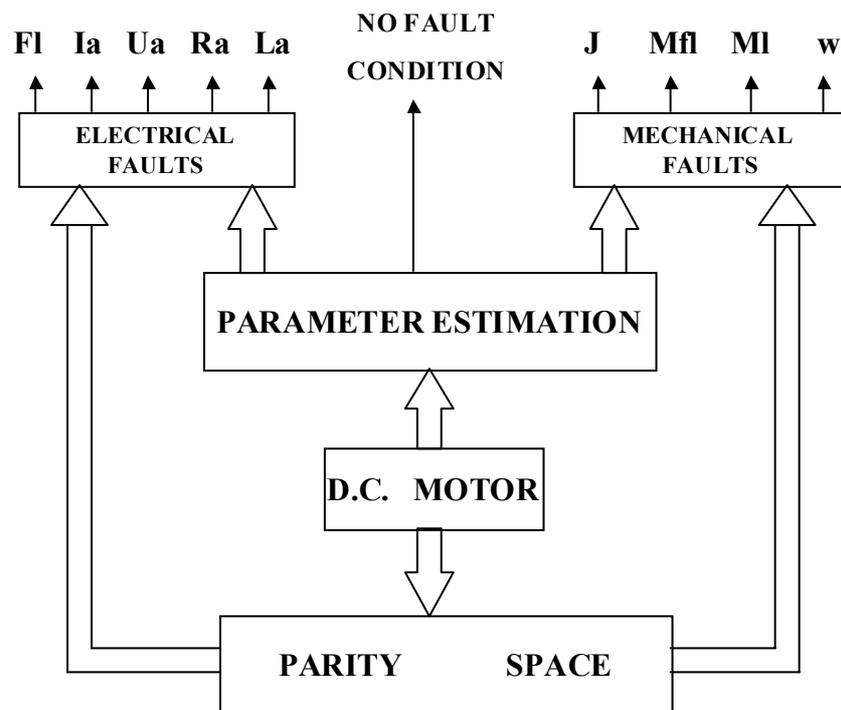


Figure 2.6 : Schéma d'isolation de défauts mutualisant les méthodes.

2.2.4 - Conclusion

Les approches les plus classiques présentes dans la littérature ne prennent pas en compte, de façon explicite, la fonction dans la localisation de défauts. Ces approches interprètent le problème du diagnostic par rapport aux défauts du type capteur, actionneur ou composant. Ainsi, en présence de signatures identiques, les défauts ne peuvent pas être localisés. En revanche, notre stratégie considère que la localisation est possible à condition d'interpréter autrement les défauts. Un défaut peut être examiné de différentes façons, chaque interprétation représente une fonction. Le choix de la fonction nous a conduit à concevoir et développer un cadre générique pour déterminer les caractéristiques les plus représentatives du défaut sous forme d'un modèle ontologique. La localisation dépend de la fonction choisie pour l'interprétation des défauts.

Dans le cadre des méthodes de décision, nous n'avons, en aucune manière, exploré les conditions de robustesse intrinsèque à l'exploitation de signaux, de modèles mathématiques, et de méthodes d'évaluation. Toujours soucieux d'accroître et de fiabiliser le diagnostic de

défauts, nous avons contribué à la robustesse de la décision par l'agrégation de différentes connaissances. La méthode développée est présentée dans la suite de ce chapitre.

2.3 - Méthode de décision robuste par intégration de connaissances quantitatives et qualitatives

2.3.1 - Introduction

L'étape de décision consiste à traduire les symptômes en information concernant les défauts ou la défaillance présente. Même sous l'hypothèse de l'occurrence d'un unique défaut, il peut être impossible d'indiquer le défaut présent. Cette impossibilité est liée à l'insuffisance de découplage des résidus, à la présence d'incertitudes sur le modèle analytique utilisé ou à un rapport signal sur bruit trop faible. Dans de telle situation, il est utile de fournir plusieurs explications concernant le comportement dynamique du système c'est-à-dire d'émettre différentes hypothèses de diagnostic selon la gravité du ou des défauts [Nyberg, 2000].

Le comportement dynamique d'un système linéaire \mathcal{S}_i en présence de perturbations soumis à des défauts représentés sous forme additive peut être décrit sous la forme :

$$y(p) = \tilde{H}_{yu}(p)u(p) + \tilde{H}_{yf}(p)f(p) + \tilde{H}_{yd}(p)d(p) \quad (2.9)$$

$\tilde{H}_{y\lambda}$ représente la fonction de transfert réelle du système entre les sorties $y \in \mathfrak{R}^m$ et la variable λ définissant les entrées $u \in \mathfrak{R}^p$, les défauts $f \in \mathfrak{R}^q$ et également les perturbations (bruits de mesures inclus) $d \in \mathfrak{R}^1$. Les erreurs de modélisation sont notées $\Delta H_{y\lambda} = \tilde{H}_{y\lambda} - H_{y\lambda}$ où la fonction H représente le modèle établi à partir de valeurs nominales de paramètres. Dans le cadre de la détection et de l'isolation de défauts à l'aide de modèle mathématique, nous rappelons que le générateur de résidus se représente sous la forme suivante :

$$r(p) = Q_{ry}(p)y(p) + Q_{ru}(p)u(p) \quad (2.10)$$

où Q_{ry} et Q_{ru} sont les matrices de transfert déterminées afin d'assurer de bonnes propriétés de détection et de localisation du signal résidu de telle sorte qu'en l'absence de défauts $f = 0$ et de perturbations $d = 0$, et d'erreurs de modélisation, le résidu $r \in \mathfrak{R}^J$ soit nul soit :

$$Q_{ry}(p)H_{yu}(p) + Q_{ru}(p) = 0 \quad (2.11)$$

Dans ces conditions, la substitution de l'équation (2.9) de y dans l'équation (2.10) conduit au générateur de résidus suivant :

$$r(p) = r_f(p) + r_d(p) \quad (2.12)$$

où

$$r_f(p) = Q_{ry}(p)H_{yf}(p)f(p) \quad (2.13)$$

et

$$r_d(p) = Q_{ry}(p)[\Delta H_{yu}(p)u(p) + \Delta H_{yf}(p)f(p) + H_{yd}(p)d(p) + \Delta H_{yd}(p)d(p)] \quad (2.14)$$

Quel que soit le générateur de résidus considéré dans un contexte, linéaire ou non linéaire, l'idée de base est de décomposer le résidu en deux termes. r_f correspond à l'influence des défauts sur r et l'autre terme r_d représente tout ce qui n'est pas modélisé par r_f .

La synthèse des matrices Q_{ry} et Q_{ru} est menée de manière pertinente afin de maximiser la sensibilité de r aux défauts f et minimiser sa sensibilité à d pour une détection et isolation de défauts de plus faible amplitude. L'article de [Frank, 1987] est parmi les premiers à mettre en relief la mauvaise influence des incertitudes ou des variations paramétriques d'un système incertain. [Frank, 1990] établit un résumé des différentes méthodes de générations de résidus robustes aux défauts en séparant leurs effets de ceux des erreurs de modèle. Contrairement aux livres de [Tzafestas et al., 1987], [Patton et al., 1989] et [Patton et al., 2000], composés uniquement d'une collection d'articles à caractère théorique et pratique, les récents ouvrages de [Gertler, 1998], traitant précisément des relations dynamiques de parité ainsi que l'estimation paramétrique, de [Chen et Patton, 1999] portant sur l'ensemble de toutes les approches à base d'observateurs ainsi que celui de [Mangoubi, 1998] consacré aux filtres stochastiques sont le reflet de l'ensemble des méthodes de diagnostic de défauts à base de modèles, développées jusqu'à ce jour et en particulier, ils se sont intéressés à la problématique de la robustesse vis-à-vis des incertitudes de modèles en présence de perturbations. Les incertitudes de modélisation issues des approximations sous forme linéaire ou des erreurs dans l'estimation des paramètres du modèle sont abordées et considérées selon différentes approches. L'objectif consiste en la synthèse de générateur de résidus et/ou de méthodes d'évaluation des résidus robustes par rapport aux erreurs de modélisation et aux perturbations tout en restant sensibles aux défauts à détecter et à localiser. Trois catégories permettent de distinguer les différentes approches dévolues à :

- la *génération robuste des résidus* : les observateurs robustes introduits par [Frank, 1990] ou les relations de parité robustes développées par [Chow et Willsky, 1984] et [Lou et al., 1986] constituent les premières solutions. Il est possible de faire la différence entre les méthodes quant à la modélisation des perturbations, soit sous forme d'incertitudes structurées en présence d'un découplage exact entre défauts et incertitudes ([Chen et Patton, 1999]) ou bien dans le cas contraire, en utilisant une procédure d'optimisation ([Sauter et Hamelin, 1999]), soit sous forme d'incertitudes non structurées ([Mangoubi et Edelmayer, 2000]) et également sous forme de fonction de transfert à paramètres bornés ou par intervalle ([Hamelin et Sauter, 2000] et [Puig et al., 2002]).

- l'*évaluation robuste des résidus* : [Emami-Naeini et al., 1988] ont été parmi les premiers

à formuler le problème de choix d'un seuil de détection optimal pour l'analyse et la synthèse de l'évaluation de résidus en présence de déviation sur le modèle. Le chercheur *R. Clark* dans le livre de [Patton et al., 1989] suggère d'utiliser une évaluation adaptative des résidus à partir des entrées du système.

- la *génération et l'évaluation robuste de résidus* : [Ding et Frank, 1991] et [Qiu et Gertler, 1993] sont les premiers à montrer que le choix de la fonction d'évaluation des résidus est directement lié aux choix des indices de performances sur lesquels sont basés la génération des résidus.

L'existence de bruit de mesures, dont le spectre de puissance est connu, nécessite également une adaptation des méthodes. En présence de bruit, le résidu ne peut pas être considéré comme nul il requiert une synthèse différente comme proposé par [Nikoukhah, 1994]. Une évaluation des résidus basée sur un simple test à seuil devient complètement obsolète en présence d'un bruit important, de plus, l'effet du défaut peut être noyé dans le bruit. [Willsky et Jones, 1976] et [Barmish, 1994] ont développé sous ces hypothèses des algorithmes de détection sur la base de changement des propriétés statistiques des résidus.

La robustesse des méthodes de diagnostic à base de modèles vis-à-vis des incertitudes de modèles et de l'effet des bruits constitue un vaste domaine de recherche axé uniquement sur la génération et/ou l'évaluation des résidus. Nos activités de recherche ont porté sur la robustesse de la procédure de décision par l'intégration de connaissances quantitatives et qualitatives sur le comportement dynamique des résidus.

2.3.2 - Synthèse de la méthode de décision robuste

Comme introduit précédemment, l'ensemble des signatures de défaillance pouvant affecter un processus forme une matrice de diagnostic et n'est pas exclusivement issu de méthodes de diagnostic à base de modèles. Quelle que soit la méthode de génération ou d'évaluation des résidus, un défaut d'amplitude réduite peut déclencher certains tests d'évaluation prévus et d'autres pas, conduisant lors de la dernière étape du diagnostic à une mauvaise décision ou une non isolation de défauts. Par exemple, sur la base de la matrice de diagnostic ci-dessous, en présence du défaut f_A si le symptôme s_2 est moins sensible à f_B que s_1 et s_3 , un défaut f_B de faible amplitude peut générer un vecteur de cohérence similaire à un défaut f_A .

	$\phi_{\bar{A}\bar{B}}$	ϕ_A	ϕ_B
s_1	0	1	1
s_2	0	0	1
s_3	0	1	1

Tableau 2.4 : Exemple de matrice de diagnostic

Ainsi pour que tous les défauts puissent être localisés, toutes les signatures de défauts théoriques doivent être distinctes dans ce cas, comme défini par **[Gertler, 1991]** qui introduit le concept de structure de localisation, la matrice de signatures correspond à des défauts fortement isolables, si tel n'est pas le cas faiblement isolables. Dans le cadre de nos travaux, nous ne nous sommes pas attachés à régler le problème de l'isolabilité permettant ainsi de garantir une localisation forte des défauts, ni à définir ou à développer des méthodes d'analyse structurelle favorisant les conceptions de telle matrice de signatures comme proposée par **[Cassar et al., 1994]** sur un système de taille réduite. Notons toutefois que dans un contexte pratique **[Cassar et al., 1994]** définit, pour la tâche de décision, des outils d'évaluation de performances globales de détection et d'isolation, comme le calcul d'indices de séparation entre les signatures de pannes et la signature de bon fonctionnement, fournissant un critère sur le risque de fausse alarme ou de non détection. Le calcul de distances entre signatures de pannes possible met également en évidence les signatures de défauts discernables. En supposant l'obtention d'une matrice de diagnostic fortement isolable, la tâche de décision pourrait être traitée de manière idéale si l'évaluation portant sur l'amplitude des résidus était parfaite. Dans un environnement bruité, avec des techniques élémentaires d'analyse des résidus associées à des erreurs de modélisation, l'évaluation résultante des résidus n'est pas toujours exacte. La localisation doit alors s'effectuer à l'aide d'un calcul de distances entre la signature expérimentale S (le vecteur de cohérence) et les signatures théoriques S_{ϕ_n} . Le défaut le plus vraisemblable est celui correspondant à la signature théorique dont la distance à la signature expérimentale est la plus faible. En présence de β défauts lors de l'analyse des résidus, il faut une distance de Hamming entre les signatures théoriques au moins égale à $2\beta + 1$ pour assurer une localisation correcte du défaut. Parmi les distances les plus usuelles, l'indicateur de pannes associé au $i^{\text{ème}}$ défaut établi à partir de la distance de Hamming $\zeta(S(t), S_{\phi_i})$ se définit sous la forme $\forall t$ et $\forall i$:

$$\mathfrak{S}_i^H(t) = 1 - \frac{1}{J} \zeta(S(t), S_{\phi_i}) \quad (2.15)$$

$$\zeta(S(t), S_{\phi_i}) = \sum_{j=1}^J |s_j(t) - M_{\phi}(i,j)| \quad (2.16)$$

où $M_{\phi}(i,j)$ constitue un élément de la matrice de diagnostic M_{ϕ} avec i le numéro de l'élément suspecté en défaut ($i = \{1, \dots, q\}$) et j le numéro du symptôme concerné ($j = \{1, \dots, J\}$).

Dans le cadre de nos travaux (**[DEA_Weber]**), nous proposons de rendre la tâche de décision robuste aux erreurs d'évaluation des résidus en considérant, exclusivement dans le calcul de la distance de Hamming, les éléments associés $M_{\phi}(i,j)$ égaux à «1» prenant en compte les éléments les plus significatifs dans une signature de pannes. De récents travaux, évaluant les résidus à partir de méthodes d'analyse utilisant la logique floue, ont également démontré de manière précise et mis en évidence l'avantage d'une telle technique **[Weber et al., 1999]**. Cette adaptation permet de considérer des scénarios de pannes multiples sans pour autant prévoir toutes les combinaisons de signatures associées. L'indicateur de défauts résultant se décrit $\forall t$ selon :

$$\forall (i \neq 0) \quad \mathfrak{S}_i^{H_m}(t) = 1 - \frac{1}{W(i)} \sum_{j=1}^J \{ |s_j(t) - M_{\phi}(i,j)| \times M_{\phi}(i,j) \} \quad (2.17)$$

et

$$i = 0 \quad \mathfrak{S}_n^{H_m}(t) = 1 - \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J s_j(t) \quad (2.18)$$

où $W(i)$ représente le nombre d'éléments $M_{\phi}(i,j) \neq 0$.

Toutefois, la tâche de décision reste assez élémentaire ; elle est réalisée sur la simple base d'un codage binaire des résidus ([CI_13] et [CI_7]). Dans l'objectif d'améliorer les résultats fournis par l'indicateur de Hamming, des informations supplémentaires peuvent être exploitées [Iserman, 1994] quant à la valeur des résidus utilisés ainsi qu'à la qualité des modèles employés pour leur génération. Concernant l'évaluation des résidus, deux grandeurs, extraites de l'évaluation des résidus sont prises en compte, la sensibilité du résidu par rapport au seuil et la persistance dans le temps du défaut.

Dans l'hypothèse de l'exploitation de techniques élémentaires d'analyse des résidus, par exemple un simple test à seuil, illustré à la figure suivante, le symptôme résultant s_j en la présence d'un défaut A ou B reste indifféremment équivalent à 1.

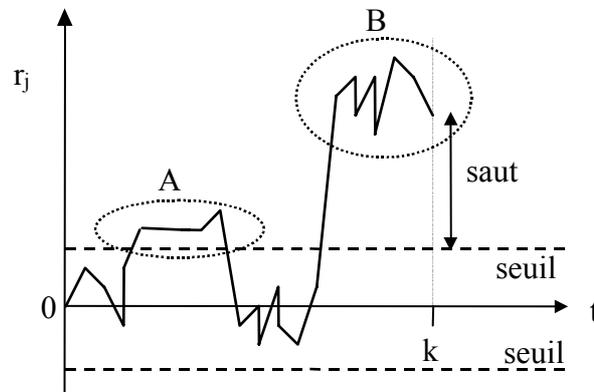


Figure 2.7 : Evolution dynamique d'un résidu

Il est essentiel d'associer à l'information binaire l'amplitude avec laquelle le seuil a été dépassé. Pour atteindre cet objectif, nous considérons un indicateur nommé étendu du dépassement calculé comme :

$$m_j(t) = 1 - \frac{r_j(t) - \text{Seuil}}{r_j(t)} \quad (2.19)$$

La valeur du résidu pour le défaut B détecté étant plus importante que pour le défaut A, la décision de considérer le défaut B comme plus probable que le défaut A paraît justifiée. Cette

valeur est donnée par l'étendue m_j relative au résidu r_j . Dans le cas où le résidu est inférieur au seuil de détection, la valeur de m_j est forcée à 0. De ce fait, à partir de l'étendue relative du résidu, il est possible de tenir compte de la sensibilité du résidu vis-à-vis du défaut. Seuls les déclenchements normaux ou excessifs sont étudiés et non les déclenchements partiels.

La tâche de décision est purement statique. Effectivement chaque échantillon est traité séparément, aucune notion de mémoire dynamique est incluse. Nous avons proposé d'extraire de l'évaluateur des résidus, un indicateur du défaut dans le temps, nommé *persistance* et noté p_j , permettant de réduire les fausses alarmes, les non-détections n'étant pas remises en cause : plus un résidu persiste à dépasser son seuil de détection, plus il a de chance de traduire une défaillance. C'est le cas du défaut D de la figure suivante en comparaison du défaut furtif C.

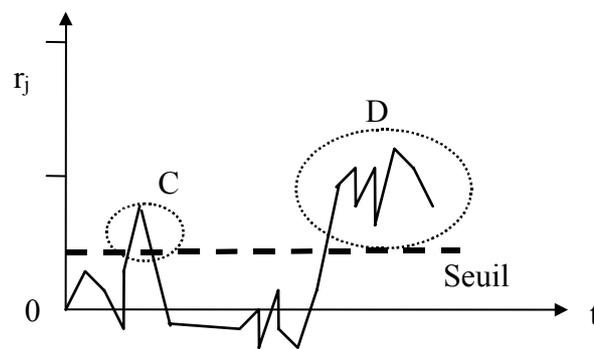


Figure 2.8 : Evolution dynamique d'un résidu

L'indicateur de persistance dans le temps est calculé en comptant le nombre d'occurrences du dépassement du seuil dans une fenêtre glissante de longueur ω , soit :

$$p_j(t) = \frac{1}{\omega} \times \sum_{\tau = t - (\omega - 1)}^t s_j(\tau) \quad (2.20)$$

La taille de la fenêtre glissante influe sur l'importance accordée à ce symptôme. Pour une fenêtre de longueur $\omega = 1$, la persistance est ignorée. Plus la taille de la fenêtre augmente et moins les dépassements brefs sont pris en compte au profit des dépassements de longue durée, cependant l'utilisation d'un tel filtre moyenneur peut bien entendu amener un retard, non pas à la détection, mais, dans notre cas, à la décision.

Sous l'hypothèse de l'utilisation de modèles, la qualité de ces modèles utilisés pour générer les résidus est primordiale afin d'assurer un diagnostic efficace de l'ensemble du système. Les incertitudes associées aux modèles proviennent essentiellement des approximations effectuées sur leurs paramètres au moment de leur estimation autour d'un point de fonctionnement. Les modèles choisis et les campagnes de mesures utilisées ont leur importance pour évaluer leur précision. De plus, les caractéristiques d'un système évoluent en fonction de son vieillissement du fait de l'usure de ses sous-systèmes. Les paramètres des modèles identifiés s'éloignent de ceux du processus avec le temps. Un indicateur de confiance c_j est ainsi déterminé afin de

tenir compte de l'écart entre les modèles et le système. Cette évaluation est effectuée par l'expertise humaine ayant modélisé le système tout en surveillant régulièrement l'installation. Son évaluation peut varier de 0 pour un écart inacceptable à 1 pour une similitude supposée parfaite. Cette valeur peut être modifiée au jour le jour par l'expert humain afin de prendre en compte tout changement significatif du système. En l'absence de défauts, le résidu associé à un faible indicateur de confiance c_j , aura probablement tendance à tendre vers une valeur différente de zéro générant ainsi une fausse alarme. Afin d'améliorer la robustesse de la tâche de décision, il paraît nécessaire de prendre en considération ces informations à travers une quantification du vecteur de cohérence S , même en l'absence de défauts, comme [Combastel et al., 2003] montre l'absolue nécessité de prendre en compte les erreurs de modélisation en les propageant de manière rigoureuse au sein de l'étape de décision, pour accroître la robustesse de la localisation du diagnostic. L'objectif consiste par conséquent à définir un coefficient de qualité, noté α_j , associé à chaque symptôme binaire s_j à partir de connaissances quantitative sur l'évaluation des résidus et de connaissance quantitative sur la génération des résidus.

L'intégration de ces informations dans une stratégie de diagnostic est facilitée par l'approche symbolique [Dubois et al., 2003] développée à partir des concepts de base de la théorie des sous-ensembles flous. Afin d'unifier toutes ces informations, nous nous sommes inspirés des travaux de Mamdani réalisés dans le domaine du contrôle, et présentés en langue française de manière synthétique et formelle dans le récent ouvrage de [Foulloy et al., 2003]. Parmi les représentation des différentes structures internes de Mamdani, nous avons envisagé uniquement contraint par le choix d'inférence linguistico-linguistique à partir d'une base de règles que des interfaces de fuzzification linguistique des variables d'entrées à l'exception de c_j , et de défuzzification linguistique. Seuls les paramètres numériques m_j et p_j sont fuzzifiés dans le domaine linguistique. Tous les paramètres sont représentés par le triplet $(\lambda, X_\lambda, T_\lambda)$ où $\lambda = [m \ p \ c]^T = [\lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T$ avec X_λ l'univers des valeurs prises par λ (univers vide pour c) et $T_\lambda = \{\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_\kappa\}$ l'ensemble de κ sous-ensembles flous de X_λ utilisés pour caractériser λ [Bouchon-Meunier et Marsala, 2003]. La spécificité de nos travaux réside dans la définition, à partir des trois paramètres d'entrée, d'un jeu de L règles d'inférence sous la forme suivante pour la $i^{\text{ème}}$ règle :

$$\text{si } \lambda_1 \text{ est } \Xi_1^i \text{ et } \lambda_2 \text{ est } \Xi_2^i \text{ et } \lambda_3 \text{ est } \Xi_3^i \text{ alors } \alpha \text{ est } \mathcal{B}_i \text{ avec } \Xi_1^i \in T_\lambda$$

où chaque règle utilisée est très pessimiste, ne retenant que le minimum des sous-ensembles pour chaque combinaison et de ce fait ne nécessite aucune expertise particulière dans sa conception. Ces règles génériques ont pu être mises en place étant donné que l'ensemble des κ sous-ensembles flous sont identiques pour la sémantique X_λ soit $\mathcal{B}_i = \min(\Xi_1^i, \Xi_2^i, \Xi_3^i)$ avec $\mathcal{B}_i \in T_\lambda$.

En utilisant les opérateurs originels de Mamdani, c'est-à-dire la norme triangulaire *min* comme conjonction floue et implication des règles et la conorme triangulaire *max* comme disjonction floue, l'agrégation des règles génère une relation floue R caractérisant le lien entre l'ensemble λ des entrées et la sortie α donnée par :

$$\mu_R(\lambda, \alpha) = \max_{i=1,L} \min(\min_{\ell=1,3} \mu_{D(\lambda_i)}(\Xi_\ell^i), \mu_{D(\mathcal{B}_i)}(\alpha)) \quad (2.21)$$

où conformément à [Foulloy et al., 2003], $\mu_{D(z)}(\zeta)$ représente l'application D (D pour *Descriptor Set*) qui fait correspondre à tout nombre z un sous-ensemble flou ζ de \mathcal{M} .

Dans une dernière étape, une méthode du moment ou du barycentre est utilisée pour défuzzifier les termes linguistiques fournis par l'algorithme classique *min max*. Cette méthode est sensible à la forme des fonctions d'appartenance et prend en compte toutes les informations. L'interprétation de la confiance sur la qualité du symptôme exprime alors la confiance accordée à l'état de la grandeur concernée s_j . L'indice de confiance α_j se définit suivant le tableau :

$\alpha_j = 0$	s_j est une fausse alarme
$0 < \alpha_j < 1$	la qualité du symptôme est réduite
$\alpha_j = 1$	s_j représente directement l'état du résidu en défaut

Tableau 2.5 : Exemple de matrice de diagnostic

Le symptôme binaire s_j est ainsi corrigé par l'indice de confiance α_j conduisant au simple calcul multiplicatif d'un symptôme unifié $u_j = s_j \times \alpha_j$. Le vecteur de cohérence devient :

$$u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_j(t)]^T \quad (2.22)$$

Il suffit de remplacer au sein de l'indicateur de défauts eq (2.17) les symptômes binaires par les symptômes unifiés pour définir un indicateur de défauts robuste, soit $\forall t$:

$$\forall (i \neq 0) \ \mathfrak{S}_i^u(t) = 1 - \frac{1}{W(i)} \sum_{j=1}^J \{ |u_j(t) - M_\phi(i,j)| \times M_\phi(i,j) \} \quad (2.23)$$

et

$$i = 0 \ \mathfrak{S}_i^u(t) = 1 - \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j(t) \quad (2.24)$$

où $W(i)$ représente le nombre d'éléments $M_\phi(i,j) \neq 0$.

Nous avons développé en programmation objet et testé en temps réel le travail présenté précédemment. Du fait de contrainte de temps réel, les fonctions d'appartenance retenues ont été de forme triangulaire et trapézoïdale limitant le nombre de classes linguistiques afin de

réduire la complexité de calculs importants. Nous avons limité le nombre de fonctions d'appartenance à 6. De même, un degré d'ambiguïté entre les différentes classes linguistiques est fixé afin d'avoir deux fonctions d'appartenance superposées. Dans le cadre de nos travaux de recherche, la détermination des sous-ensembles flous a été réalisée de manière heuristique. La méthode développée a été exploitée en ligne sur le site de traitements des eaux usées de l'agglomération de Nancy ([RC_2] et [CI_21]). Sur la base de résidus structurés, cette technique permet d'intégrer des résidus issus de nombreuses méthodes définissant un diagnostic basé sur le calcul d'une distance entre les caractéristiques des défaillances connues et l'état des sous-systèmes élémentaires pris en compte. Cette approche a apporté une solution au problème de localisation tout en augmentant le niveau de confiance quant aux résultats obtenus. L'opérateur reste de ce fait maître d'oeuvre, restant un acteur privilégié dans la prise de décision [CI_9], en lui soumettant différentes possibilités de défauts ou de pannes.

Il faut noter cependant, que l'optimisation du nombre de fonctions d'appartenance ainsi que leur définition sont restées heuristiques et n'ont été établies que par expérience. Le potentiel inhérent à cette méthode de décision robuste trouvera son point culminant si et seulement si la synthèse des fonctions d'appartenance est accomplie de manière rigoureuse comme par exemple pour la classification des données d'entrée-sortie à des fins de diagnostic à l'aide d'algorithmes classiques à la recherche d'amas de points (ou cluster en anglais) [Bezdek, 1991].

2.3.3 - Application au diagnostic de défauts capteurs

Pour montrer les performances du travail développé, nous considérons l'exemple utilisé dans [CI_13] : soit un système hydraulique, constitué de 5 réservoirs, complètement observable, linéarisé autour de différents points de fonctionnement en supposant uniquement l'occurrence de défauts capteurs de type biais. Dans un contexte stochastique, sur la base de filtres de Kalman, la génération des résidus est établie à partir d'une structure dédiée de type DOS (Dedicated Observer Scheme) afin de construire une matrice de diagnostic équivalente à la matrice identité ([Frank et Wünnenberg, 1989]). Cette structure DOS est conçue à partir de l'estimation du vecteur d'état en réinjectant uniquement une seule sortie mesurée. Pour des raisons de simplicité nous avons envisagé un simple test à seuil pour chaque résidu. L'ensemble des fonctions d'appartenance est défini par :

$$T_{\lambda} = \{ \text{Zero}(Z), \text{VerySmall}(VS), \text{Small}(S), \text{Average}(A), \text{Large}(L), \text{VeryLarge}(VL) \}$$

La figure suivante illustre les fonctions d'appartenance déterminées pour chacune des informations quantitatives.

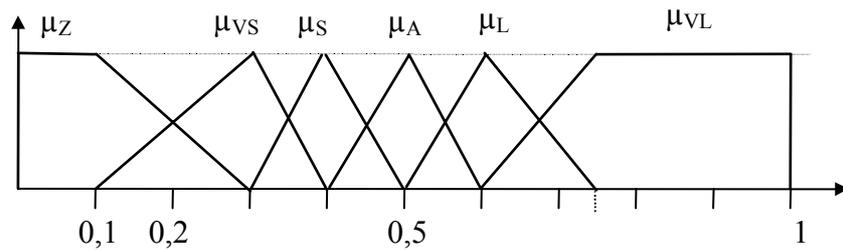


Figure 2.9 : Fonctions d'appartenance pour m_j .

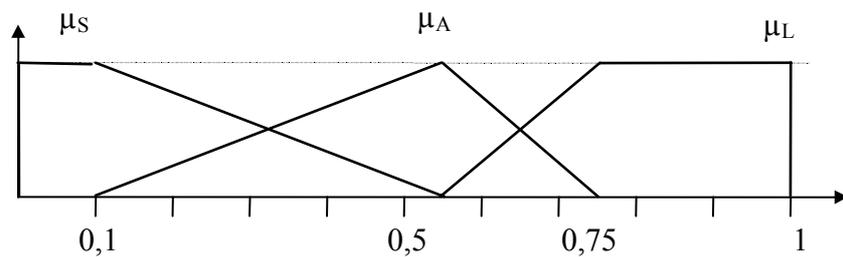


Figure 2.10 : Fonctions d'appartenance pour p_j .

Un biais de 4% sur le capteur y_1 (respectivement y_3 et y_4) est supposé apparaître à l'instant 200 (respectivement 400 et 600). Le degré de confiance associé est supposé très bon, le système étant exploité autour des points de fonctionnement utilisés lors de la linéarisation du modèle. Dans cet exemple, quatre techniques sont présentées dans les figures suivantes générant chacune un indicateur \mathfrak{I} élémentaire, défini en (2.4), un indicateur \mathfrak{I}^H basé sur une distance de Hamming classique, défini en (2.15), un indicateur \mathfrak{I}^{H_m} basé sur une distance de Hamming modifiée, défini en (2.17) et un indicateur \mathfrak{I}^u calculé à partir de la distance de Hamming modifiée intégrant des connaissances sur la génération et l'évaluation des résidus, défini en (2.23). L'indicateur de bon fonctionnement correspond à une valeur de n équivalente à zéro, l'indicateur de défauts i est associé au capteur i .

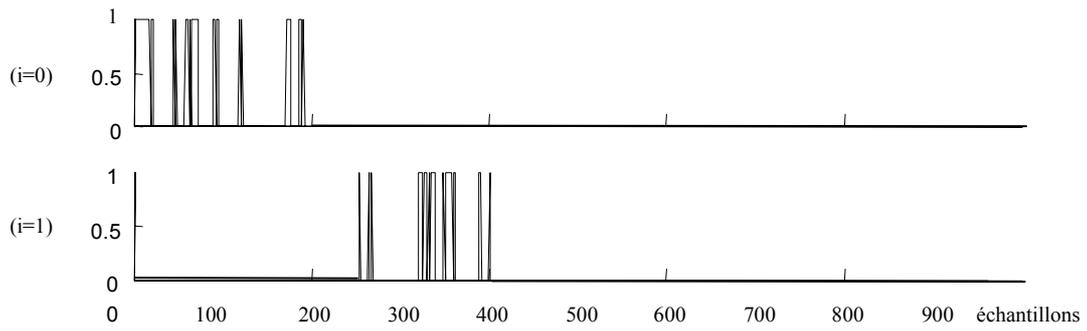


Figure 2.11 : Indicateur \mathfrak{I} (les autres sont tous nuls).

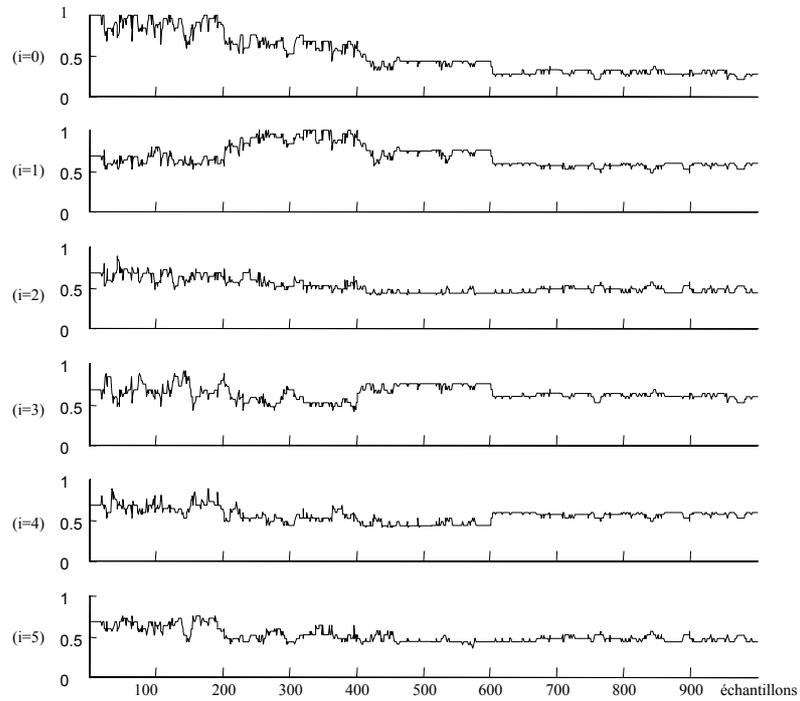


Figure 2.12 : Indicateur \mathfrak{I}^H .

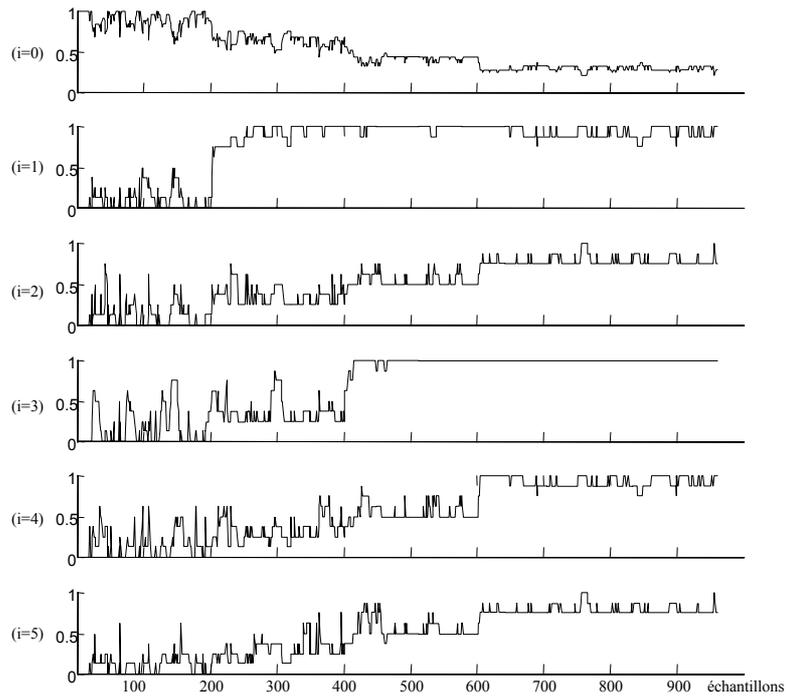


Figure 2.13 : Indicateur \mathfrak{S}^{H_m} .

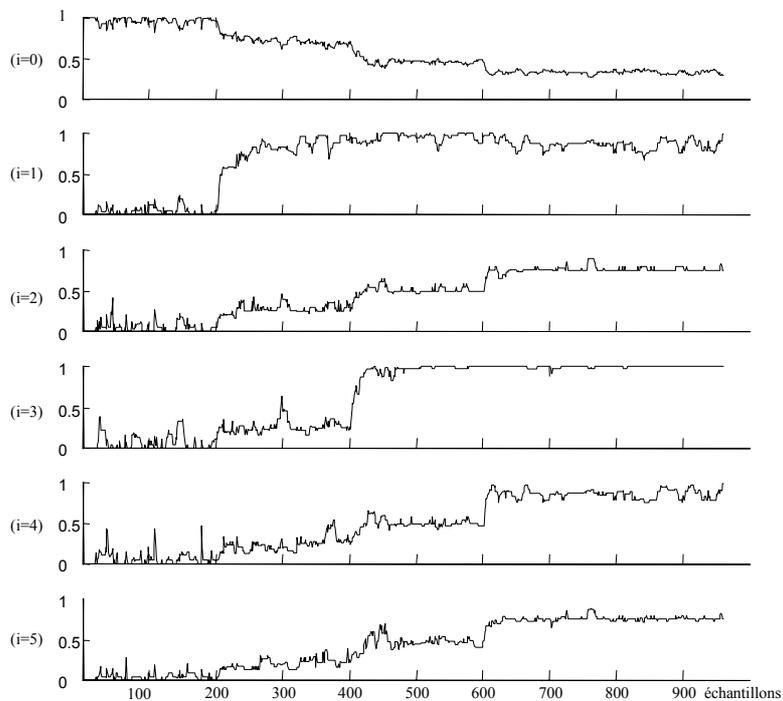


Figure 2.14 : Indicateur \mathfrak{S}^u .

En l'absence de défauts, à cause de la présence de bruits sur les mesures, le vecteur de

cohérence S prend des valeurs binaires souvent différentes des signatures attendues produisant ainsi des non-détections de défauts comme présenté à la figure 2.11. A partir de l'échantillon 200 en présence d'un défaut sur y_1 , la même remarque peut être faite. Certes l'indicateur $n=1$ prend une valeur équivalente à un, par contre dès l'occurrence d'un autre défaut, la logique de décision élémentaire \mathfrak{S}_n est réduite à néant, le vecteur de cohérence n'étant jamais identique à une signature de pannes établie pour la présence d'un unique défaut évitant le développement de toutes les combinaisons de signatures possibles. L'exploitation de l'indicateur de Hamming \mathfrak{S}^H , illustré à la figure 2.12, ne permet pas d'établir directement une décision, surtout en présence de plusieurs défauts, par contre l'indicateur de Hamming modifié \mathfrak{S}^{H_m} , illustré à la figure 2.13, permet une meilleure détermination des éléments défailtants. L'intégration de connaissances qualitatives et quantitatives sur la génération et l'évaluation de résidus accroît la robustesse de la décision. L'indicateur \mathfrak{S}^u , illustré à la figure 2.14, rend possible la détection et l'isolation de multiples défauts présents simultanément avec un taux de fausses alarmes réduit se comportant comme un filtre passe-bas de l'indicateur \mathfrak{S}^{H_m} . Concernant cet indicateur, la prise de décision reste toutefois très difficile à prendre quand trois capteurs sur cinq sont affectés par des défauts. La méthode proposée trouve ces limites dans l'existence même de la redondance analytique c'est-à-dire dans la définition de la matrice de diagnostic.

L'influence de l'indice de confiance n'est pas présentée dans ce mémoire mais en présence d'un modèle de faible qualité, la robustesse de l'indicateur unifié par rapport à l'indicateur de Hamming simple est très nette. Il est encore possible pour l'opérateur de suspecter le capteur en défaut à l'opposé d'une méthode qui ne tient pas compte de cet indice de confiance quant à la qualification du générateur de résidus.

2.3.4 - Conclusion

L'agrégation de connaissances qualitatives et quantitatives contribue à la robustesse de la localisation de défauts fournissant à l'opérateur en charge de réaliser la surveillance, des informations provenant de l'environnement du système \mathcal{S} et des performances de \mathcal{D} . Cette approche participe également à l'élaboration d'une solution au problème de la localisation en présence de défauts multiples tout en donnant un niveau de fiabilité quant aux résultats obtenus. A l'inverse des travaux existants qui considèrent la robustesse au niveau de la génération et de l'évaluation de résidus par l'intermédiaire de modèles qualitatifs ([Zhuang et al., 1998] et [Combastel et al., 2003]), l'originalité de la méthode repose sur le fait que nous nous sommes attachés à traiter la robustesse uniquement au niveau de la décision. Cette propriété peut apparaître comme réductrice, l'évaluation des résidus et l'isolation des défauts pouvant être résolues ensemble ([Koscielny, 1999]), mais la méthode de décision robuste permet de s'intégrer aisément et complètement au sein d'une stratégie de diagnostic à base de modèles heuristiques, ou sur d'autres principes. Cet objectif de recherche, conduisant au développement d'un outil modulaire associé à la méthode, a permis sa mise en oeuvre pratique sur une installation industrielle $\mathcal{S} = \{\mathcal{S}_i, i = 1, \dots, n\}$ ([CI_9] et [CI_12]) mettant en jeu un nombre diversifié de méthodes de génération et d'évaluation des résidus $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}_j, j = 1, \dots, r\}$ pour un vaste ensemble de défauts \mathcal{F} .

2.4 - Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre deux approches différentes pour résoudre le problème de la robustesse de la décision. La première approche se fonde sur un modèle ontologique de diagnostic permettant d'accroître le nombre de défauts isolés en présence de signatures identiques. La seconde approche fiabilise l'information de localisation d'un défaut par une agrégation de connaissances sur le système et les outils de diagnostic. Peu nombreux sont les travaux consacrés à la robustesse de la décision, ce qui en font leur originalité.

Concernant l'agrégation, la détermination des fonctions d'appartenance qualifiant les connaissances qualitatives constitue un élément déterminant par rapport à la sensibilité de la méthode développée vis-à-vis des défauts. Cette détermination se fonde essentiellement sur une évaluation pratique et heuristique. Du point de vue de la recherche fondamentale, différents travaux intégrant des connaissances probabilistes issues du domaine de la sûreté de fonctionnement ont été récemment énoncés permettant ainsi de s'affranchir de la définition des fonctions d'appartenance qui restent malgré tout le problème de la détermination des probabilités, par exemple, celui d'avoir des fausses alarmes avec un test en particulier par rapport à l'amplitude d'un défaut.

La connaissance acquise à travers ces travaux de recherche méthodologiques et appliqués, présentés dans ce chapitre, sera mise à profit à des fins de prospectives exposées dans la partie intitulée *Perspectives de recherche*.

3 - Analyse et synthèse de méthodes de détection, isolation, estimation et accommodation de défauts.

3.1 - Introduction

Mes activités de recherche consacrées au thème du diagnostic de défauts, entrées non mesurables vis-à-vis du procédé étudié, m'ont conduit à étudier et à participer à l'élaboration des approches actives des systèmes tolérants aux défauts. Au sein de cet axe de recherche récent, vaste et extrêmement diversifié, mes travaux concernent exclusivement l'accommodation de défauts. Soucieux de traiter la problématique des systèmes tolérants aux défauts, dévolue à un large nombre de procédés, je considéré uniquement les processus définis à partir de modèles mathématiques analytiques et donc les techniques de commande adaptées. Les approches à base de méthodes heuristiques synthétisées par les réseaux de neurones ainsi que par la logique floue n'ont pas été abordées. La pertinence des résultats pour de telles stratégies d'accommodation ainsi que les performances présentées par les chercheurs ne seraient en aucun cas liées à ce choix. Le lecteur, désireux de prendre connaissance des méthodes heuristiques d'accommodation de défauts, pourra parcourir les articles suivants [Garcia et al., 1991], [CI_6], [Polycarpou et Vemuri, 1995], [Ballé et al., 1998], [Lopez-Toribio et Patton, 1999], [Polycarpou, 2001] et plus récemment celui de [Jarrah et Rousan, 2001],

Concernant les approches actives à base de modèles analytiques, les premières méthodes actives d'accommodation ont été développées et appliquées dès le début des années quatre-vingt. Elles se consacrent plus particulièrement au domaine de l'aéronautique. La définition et l'existence des méthodes dépendent essentiellement des techniques de commandes sextants telles que la commande linéaire quadratique [Looze et al., 1985], la commande par placement de structure propre [Jiang et Zhao, 1998], la commande adaptative [Ahmed-zaid et al., 1991], [Tao et al., 2001], la commande par modèle de référence [Gao et Antsaklis, 1992] et [Zhou et Ren, 2001], la commande prédictive [Maciejowski, 1999], la méthode de la pseudo-inverse [Gao et Antsaklis, 1991], le principe de multiple modèles [Maybeck, 1999] et [Zhang et Jiang, 2001], la linéarisation entrée/sortie [Kabore et Wang, 2001], la commande par mode glissant [Shtessel et al., 2002]. Afin de construire un système tolérant aux défauts suivant une approche active fonctionnant de manière optimale, certaines études sont menées, permettant d'intégrer le diagnostic et l'accommodation lors de la phase de conception de la synthèse de la loi de commande du procédé. Par exemple, l'obtention de données mesurables supplémentaires peut permettre d'accroître l'efficacité du diagnostic en terme d'isolation alors qu'un nombre réduit de données peut être tout à fait suffisant pour atteindre l'objectif de commande. Ainsi les blocs de contrôle et de diagnostic sont définis ensemble [Jacobson et Nett, 1991], [Zhou et Frank, 1998] et [Grimble, 1998].

La plupart des approches présentées dans la littérature supposent connu le modèle du système défaillant. Le régulateur est ainsi modifié ou bien un régulateur adapté est sélectionné afin de préserver les performances nominales, tout en conservant les propriétés de stabilité du système. Mes travaux de recherche s'inscrivent dans une forte volonté de développer et définir des techniques de diagnostic dédiées aux systèmes tolérants aux défauts de capteurs et d'actionneurs et plus spécifiquement en contribuant à la détection, l'isolation, l'estimation et

l'accommodation de défauts à base de modèles analytiques, au-delà d'une représentation du procédé linéaire en les paramètres. Le diagnostic à base de modèles analytiques peut être réalisé par une méthode à base d'observateurs ou de filtres, de l'espace de parité ou par l'estimation paramétrique comme rappelé au second chapitre §2.1. L'espace de parité restant dévolu à la détection et l'isolation de défauts, et l'amplitude du défaut ne pouvant pas être estimée directement, cette méthode ne saurait être considérée pour traiter ce problème. Parmi les méthodes restantes en lisse, chacune d'entre elles a ses avantages et ses inconvénients ([Jiang et Zhao, 1997]). Malgré le franc succès des méthodes d'estimation paramétrique en ligne pour le développement de techniques d'accommodation choisies pour la commande des avions [Buffington et al., 1999], je m'intéresse exclusivement aux techniques de diagnostic de défauts à base d'observateurs ou de filtres, méthodes appropriées pour les défauts additifs. Celles-ci ne requièrent pas d'excitation persistante comparativement à l'estimation paramétrique, mais un autre problème inhérent à l'identification en ligne intervient par le fait que le système en défaut est en boucle fermée. Actuellement l'identification en boucle fermée constitue encore un problème ouvert [Van den Hof, 1998].

Notre objectif de recherche a pour but de développer et de synthétiser un module unique de détection, d'isolation et d'estimation de défauts de capteurs ou d'actionneurs, module acquis à l'accommodation d'un système linéaire ou non linéaire décrit à l'aide d'un modèle analytique. De plus, m'appliquant à estimer les entrées non mesurables présentes au sein des systèmes pour résoudre la problématique de l'accommodation de défauts, j'ai contribué au monitoring des bioprocédés. L'estimation des entrées non mesurables permet de pallier à l'insuffisance en ligne en surveillant les valeurs de paramètres d'entrées à signification biologique, et de ce fait, d'évaluer les concentrations des effluents non mesurables en ligne.

3.2 - Représentation des systèmes en présence de défauts à base de modèles analytiques

Nos travaux de recherche concerne l'étude des systèmes \mathcal{S} au comportement dynamique décrit sous forme d'un modèle analytique $\mathcal{M}_{\mathcal{S}}$ soit linéaire à paramètres invariant dans le temps, noté \mathcal{M}_{LTI} , soit non linéaire exact plus précisément affine en la commande, noté \mathcal{M}_{NL} , ou soit sous forme d'un ensemble convexe de modèles LTI, noté $\mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}}$. Considérons la représentation d'état permettant de refléter le comportement dynamique d'un système non linéaire \mathcal{S} général en fonctionnement normal :

$$\mathcal{M}_{NLG} = \begin{cases} \dot{x}(t) = g(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.1)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ correspond au vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ représente l'entrée de commande et où la sortie observée est matérialisée par $y(t) \in \mathbb{R}^m$. Les fonctions g et h traduisent le comportement dynamique du système et conduisent à la définition de différents modèles mathématiques. Afin de simplifier la présentation des méthodes de découplage et ne pas surcharger

l'écriture, la présence de l'entrée dans l'équation de sortie ne sera jamais envisagée. Cette restriction ne remet pas en cause la généralisation des méthodes présentées par la suite.

Dans le cadre de notre étude, nous considérons uniquement un modèle non linéaire \mathcal{M}_{NL} affine en la commande se déclinant sous la forme suivante :

$$\mathcal{M}_{NL} = \begin{cases} \dot{x}(t) = g_0(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.2)$$

De manière générale, sous l'hypothèse que $\{g_0, g, h\}$ soient des fonctions présentant des non linéarités lisses (*smooth* en anglais), la description physique des systèmes établie à partir du système d'équations (3.1) peut se traduire autour d'un point de fonctionnement (dans l'objectif d'une étude en boucle fermée), défini par (x_0, u_0) , sous la forme :

$$\mathcal{M}_{LTI} = \begin{cases} \dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 u(t) + \Delta x_0 \\ y(t) = C_0 x(t) + \Delta y_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

où les différentes matrices résultent du développement en série de Taylor limité à l'ordre un de l'équation (3.1) autour du point (x_0, u_0) , en supposant les ordres supérieurs négligeables, soit :

$$A_0 = \frac{\partial g}{\partial x}(x_0, u_0), \quad B_0 = \frac{\partial g}{\partial u}(x_0, u_0) \quad \text{et} \quad C_0 = \frac{\partial h}{\partial x}(x_0, u_0) \quad (3.4)$$

avec

$$\Delta x_0 = g(x_0, u_0) - A_0 x_0 - B_0 u_0 \quad \text{et} \quad \Delta y_0 = h(x_0, u_0) - C_0 x_0 \quad . \quad (3.5)$$

En présence d'un système parfaitement linéaire, l'équation (3.3) reste tout à fait valable avec $\Delta x_0 = \Delta y_0 = 0$.

Dans le cas où le point de fonctionnement appartient à l'ensemble Γ des points d'équilibre défini par :

$$\Gamma = \{(x, u) \in \mathfrak{R}^{n+p} \mid g(x, u) = 0, h(x) = 0\} \quad , \quad (3.6)$$

les équations (3.5) se simplifient et s'écrivent :

$$\Delta x_0 = -A_0 x_0 - B_0 u_0 \quad \text{et} \quad \Delta y_0 = -C_0 x_0 \quad . \quad (3.7)$$

Le système non linéaire (3.1) autour d'un point d'équilibre est décrit par la représentation d'état classique d'un système Linéaire à paramètres Invariant dans le Temps (LTI) qui n'est

nécessairement issu exclusivement d'une linéarisation mais peut être également, par exemple, le résultat d'une étude d'identification :

$$\mathcal{m}_{LTI} = \begin{cases} \dot{x}_\delta(t) = A_o x_\delta(t) + B_o u_\delta(t) \\ y_\delta(t) = C_o x_\delta(t) \end{cases} \quad (3.8)$$

avec $x_\delta(t) = x(t) - x_o$.

L'approche multiple modèle constitue une autre manière de représenter la dynamique d'un système non linéaire sur toute sa plage de fonctionnement. Le comportement dynamique du système non linéaire est défini à partir de la conjugaison de modèles linéaires, établis autour de différents points de fonctionnement, pondérés par des fonctions de pondération. Le livre de **[Murray-Smith et Johansen, 1997]** constitue l'un des premiers ouvrages à publier dans le domaine de la modélisation et du contrôle de systèmes non linéaires traités non pas comme des modèles entrées-sorties, comme considérés par certains chercheurs (**[Narendra et Balakrishnan, 1997]**, **[Narendra et Xiang, 2000]**), mais sous forme de représentation d'état. Récemment **[Murray-Smith et al., 1999]**, **[Leith et Leithead, 1999]** et **[Shorten et al., 1999]** ont contribué à ce type de représentation mettant en avant l'importance de tenir compte de la vitesse d'évolution temporelle d'un modèle à l'autre en présence de non linéarité forte. Dans le cadre de cette approche, le système linéaire (3.3), résultant de la modélisation d'un processus non linéaire (3.1) autour du $i^{\text{ème}}$ point de fonctionnement, se définit par un jeu de matrices :

$$\mathcal{m}_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i & \Delta x_i \\ C_i & & \Delta y_i \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

où $i = [1, 2, \dots, \aleph]$, \aleph étant le nombre total de points de fonctionnement.

A chaque instant, le système non linéaire est défini par la séquence de matrice variant suivante :

$$\mathcal{m}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(t) \mathcal{m}_i \mid \varphi_i(t) \geq 0, \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(t) = 1 \end{array} \right\} \quad (3.10)$$

où la variable φ correspond à la variable de coordination, également appelée fonction de validation, considérée inconnue.

Ainsi le comportement dynamique du système non linéaire peut être défini à partir d'un jeu de modèles LTI, noté $\mathcal{m}_{\Sigma_{LTI}} = \left\{ \left[\mathcal{m}_1 \ \mathcal{m}_2 \ \dots \ \mathcal{m}_\aleph \right] \right\}$ sur l'ensemble convexe :

$$\Lambda = \left\{ \varphi \in \mathfrak{R}^{\aleph} \mid \varphi_i(t) \geq 0, \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(t) = 1 \right\} \quad (3.11)$$

Pour une représentation commune, afin de présenter nos travaux de manière synthétique, nous rappelons que nous considérons uniquement les défauts survenant sur les organes de mesure installés sur le procédé (capteurs) et sur l'ensemble des problèmes liés aux organes de régulation (actionneurs). En présence de défauts de capteurs ou d'actionneurs, la variable affectée Ξ s'écrit sous la forme :

$$\Xi_{\lambda}^f = \beta_{\lambda} \Xi_{\lambda} + \Xi_{\lambda 0} \quad (3.12)$$

où Ξ_{λ} (respectivement Ξ_{λ}^f) représente la $\lambda^{\text{ème}}$ sortie nominale ou le $\lambda^{\text{ème}}$ actionneur de commande nominale (respectivement le $\lambda^{\text{ème}}$ capteur ou le $\lambda^{\text{ème}}$ actionneur en défaut). $\Xi_{\lambda 0}$ correspond à un constante et β_{λ} correspond au coefficient de dégradation du $\lambda^{\text{ème}}$ capteur ou du $\lambda^{\text{ème}}$ actionneur.

Le tableau suivant résume de manière sémantique la représentation (3.12).

Coefficient de dégradation	Constante = 0	Constante $\neq 0$
= 1	nominal	biais
$\in]0, 1[$	perte d'efficacité	perte d'efficacité
= 0	hors d'usage	blocage

Tableau 3.1: Différents types de défauts/défaillances.

Les défauts, définis par (3.12), se présentent sous forme additive. Suivant le modèle analytique $\mathcal{M}_{\mathcal{S}}$ considéré, on a :

$$- \mathcal{M}_{\text{NL}} = \begin{cases} \dot{x}(t) = g_0(x(t)) + g(x(t))u(t) + F_x(x(t))f_a(t) \\ y(t) = h(x(t)) + F_y f_c(t) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$- \mathcal{M}_{\text{LTI}} = \begin{cases} \dot{x}_{\delta}(t) = A_o x_{\delta}(t) + B_o u_{\delta}(t) + F_x f_a(t) \\ y_{\delta}(t) = C_o x_{\delta}(t) + F_y f_c(t) \end{cases} \quad (3.14)$$

$$- \mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}} = \left\{ \left[\mathcal{m}_1 \quad \mathcal{m}_2 \quad \dots \quad \mathcal{m}_s \right] \right\} \text{ avec } \mathcal{m}_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i & \Delta x_i & F_x^i \\ C_i & & \Delta y_i & F_y \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

où f_a et f_c sont les vecteurs des défauts d'actionneurs et de capteurs, $F_x(x(t))$ et $F_y = I_m$ les matrices qui les pondèrent. Notons que la généralisation des défauts de capteur à une matrice fixe de direction $F_y = I_m$ peut être considérée pour le modèle non linéaire \mathcal{M}_{NL} affine en la commande à la seule condition particulière que le défaut de capteur est linéairement indépendant de $h(x(t))$ dans l'équation de sortie. Par conséquent, cette restriction limite le cadre de notre étude des défauts de capteur, mais ne remet pas du tout en cause l'objectif visant à généraliser la stratégie d'accommodation et d'accommodation de défauts au-delà des processus représentés par des modèles linéaires.

Quel que soit le modèle analytique $\mathcal{M}_{\mathcal{S}}$, les défauts capteurs et actionneurs peuvent être considérés comme des incertitudes structurées assimilant les défauts à des entrées inconnues. Conformément aux travaux de [Park et al., 1994], un défaut capteur peut être interprété mathématiquement comme un défaut actionneur. L'équation d'état du modèle général $\mathcal{M}_{\mathcal{S}}$ peut être augmentée en considérant la définition suivante de la dynamique du défaut :

$$\tilde{f}_c(t) = \dot{f}_c(t) - \Phi f_c(t) \quad (3.16)$$

où $\Phi \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ est une matrice diagonale.

Ainsi en considérant un unique vecteur de défauts $f \in \mathfrak{R}^{m+p}$, le modèle analytique $\mathcal{M}_{\mathcal{S}}$ en présence de défauts devient :

$$- \mathcal{M}_{NL} = \begin{cases} \dot{x}(t) = g_0(x(t)) + g(x(t))u(t) + F(x(t))f(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.17)$$

$$- \mathcal{M}_{LTI} = \begin{cases} \dot{x}_\delta(t) = A_o x_\delta(t) + B_o u_\delta(t) + Ff(t) \\ y_\delta(t) = C_o x_\delta(t) \end{cases} \quad (3.18)$$

$$- \mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}} = \left\{ \left[\mathcal{m}_1 \quad \mathcal{m}_2 \quad \dots \quad \mathcal{m}_s \right] \right\} \text{ avec } \mathcal{m}_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i & \Delta x_i & F_x^i \\ C_i & & \Delta y_i & \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

où $f \in \mathfrak{R}^{p+m}$ est le vecteur des défauts d'actionneurs et de capteurs, $F(x(t))$ représente la matrice des défauts.

Dans l'hypothèse d'une description physique d'un système sous forme d'un modèle

analytique de représentations différentes (3.17), (3.18) ou (3.19), l'objectif du diagnostic à des fins d'accommodation consiste à détecter, isoler et estimer les défauts. Contrairement aux objectifs d'une loi de commande, où l'effet des défauts est minimisé vis-à-vis des signaux de sorties à contrôler, le diagnostic a pour finalité la mise en évidence d'un ou plusieurs défauts. L'une des approches de diagnostic de défauts obtenant les meilleurs résultats repose sur le principe de découplage des perturbations, pour lequel le résidu est conçu de manière à être insensible aux perturbations inconnues, et sensible malgré tout aux défauts. Même en l'absence d'hypothèse sur la présence de perturbations, certains défauts peuvent être considérés comme des perturbations dans le but de réaliser une isolation des défauts. Ainsi sur la base d'un découplage parfait des défauts, les résidus sont générés en rendant totalement insensible, par une manipulation mathématique adéquate, une partie de l'état (sous-espace d'état) à une entrée préalablement déterminée. Les techniques développées pour atteindre ce découplage n'ayant pas été conçues à des seules fins de diagnostic, certains paramètres de synthèse peuvent être utilisés pour leur conférer des propriétés qui s'avèrent être excessivement utiles, par exemple en terme d'estimation d'amplitude du défaut. L'isolation de défauts sera réalisée à partir de la synthèse d'un banc de générateurs de résidus.

Nous n'avons pas considéré dans nos travaux le problème de la robustesse. Pour trouver une solution à ce problème, les erreurs de modélisation sont représentées de manière approximative comme des perturbations inconnues, qui possèdent une distribution matricielle estimée permettant ainsi d'étendre le domaine d'applications des approches de détection et d'isolation de défauts robustes, approches basées sur le principe de découplage des perturbations. Des solutions robustes optimales sont réalisables pour le diagnostic de systèmes incertains en faisant appel à des procédures d'optimisation permettant de minimiser la sensibilité du résidu aux incertitudes de modèle.

3.3 - Détection, isolation et estimation des défauts par découplage exact

3.3.1 - Introduction

Nous proposons d'illustrer les résultats de synthèse de module de détection, isolation et estimation de défauts pour les trois représentations sous l'hypothèse de l'occurrence d'un défaut unique en considérant \mathcal{M}_{LTI} sous forme discrète et déterministe, \mathcal{M}_{NL} sous forme continue et déterministe, $\mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}}$ sous forme discrète stochastique.

3.3.2 - Système linéaire \mathcal{M}_{LTI} : découplage de défauts par la synthèse d'observateurs à entrées inconnues

Le découplage exact des défauts peut être réalisé en utilisant, soit les observateurs à entrées inconnues, soit les filtres de détection dévolus au domaine du diagnostic (*dont une édition spéciale leurs est entièrement consacrée [Edelmayer, 2002]*), soit l'affectation de structure propre, soit les équations de parité structurées en considérant la redondance temporelle. Cependant les limites des filtres de détection, en terme de robustesse comme précisé par [Chen et al., 1996], ainsi que la difficulté d'accéder à l'estimation des défauts à partir des équations

de parité et également la complexité de la synthèse par le placement de structure propre malgré un recueil de méthodes présentes dans le livre récent de **[Liu et Patton, 1998]**, me conduisent à considérer uniquement les observateurs à entrées inconnues. Je me permets d'informer le lecteur qu'une synthèse bibliographique des différentes méthodes est accessible dans le second chapitre de l'HDR de Frédéric Hamelin **[Hamelin, 2002]**.

Historiquement, les observateurs à entrées inconnues ont été développés pour le domaine de la commande afin que l'erreur d'estimation converge vers zéro en présence de perturbations (entrées inconnues) modélisées sous forme d'incertitudes structurées. Après les premiers travaux de **[Wang et al., 1975]**, qui considère l'estimation des entrées non accessibles du système, en synthétisant un observateur de Luenberger **[Luenberger, 1966]**, un grand nombre d'approches ont été proposées pour concevoir des observateurs à entrées inconnues, par exemple, la méthode géométrique de **[Bhattacharyya, 1978]**, la technique de décomposition en valeurs singulières de **[Fairman et al., 1984]**. Plus récemment, la conception d'observateurs à entrées inconnues d'ordre réduit a été réalisée en utilisant une approche algébrique (**[Guan et Saif, 1991]** et **[Hou et Muller, 1992]**) en intégrant une éventuelle estimation de cette même perturbation. En considérant les défauts comme des perturbations, les observateurs à entrées inconnues d'ordre réduit ou complet ont inspiré un grand nombre de chercheurs du domaine du diagnostic depuis ces vingt dernières années. Une synthèse bibliographique récente, ainsi que la mise en oeuvre des techniques à base d'entrées inconnues, sont présentées dans le troisième chapitre du livre de **[Chen et Patton, 1999]**.

L'objectif, dans le cadre des observateurs à entrées inconnues d'ordre réduit, est de rechercher un sous-espace d'état insensible à une entrée préalablement définie assurant ainsi une estimation parfaite de l'état associé à ce sous-espace. Dans le cadre des méthodes analytiques, **[Fairman et al., 1984]** et **[Hou et Muller, 1992]** réalisent le découplage d'une partie de l'état de l'effet des entrées inconnues en utilisant deux décompositions en valeurs singulières successives permettant ainsi d'estimer une partie de l'état indépendamment de l'entrée inconnue au sein d'un observateur d'ordre réduit. Cette approche a inspiré **[Gaddouna et al., 1994]** pour le diagnostic de défauts actionneurs exclusivement. Cependant **[Yang et Wilde, 1988]** montrent qu'un observateur d'ordre réduit peut réduire la vitesse de convergence de l'estimation de l'état, de ce fait nous considérons les observateurs d'ordre complet dont l'analyse et la synthèse sont présentées dans **[Chen et Patton, 1999]**.

Supposons \mathcal{M}_{LTI} , défini dans un contexte déterministe en présence de défauts, représenté sous la forme discrète suivante :

$$\mathcal{M}_{LTI} = \begin{cases} x_{\delta}(k+1) = A_o x_{\delta}(k) + B_o u_{\delta}(k) + Ff(k) \\ y_{\delta}(k) = C_o x_{\delta}(k) \end{cases} \quad (3.20)$$

D'après **[Chen et Patton, 1999]**, l'observateur d'ordre complet correspondant est défini par :

$$\begin{cases} w(k+1) = Pw(k) + TB_o u_\delta(k) + Ky_\delta(k) \\ \hat{x}_\delta(k) = w(k) + Hy_\delta(k) \end{cases} \quad (3.21)$$

où \hat{x}_δ est l'estimation du vecteur d'état et w celui de l'observateur d'ordre complet.

Les autres matrices sont synthétisées pour obtenir un découplage exact des défauts, assurant et garantissant la convergence asymptotique vers zéro de l'erreur d'estimation $e = \hat{x}_\delta - x_\delta$. Les conditions d'existence d'un observateur à entrée inconnue se formulent par :

$$(HC_o - I_n)F = 0 \quad (3.22)$$

$$T = I - HC_o \quad (3.23)$$

$$P = (A_o - HC_o A_o) - K_1 C_o \quad (3.24)$$

$$K_2 = PH \quad (3.25)$$

avec $K = K_1 + K_2$

La synthèse d'un observateur à entrées inconnues équivaut à résoudre l'ensemble des contraintes énumérées précédemment en s'assurant que les valeurs propres de P sont toutes associées à des modes stables.

Le système d'équation défini par (3.21) correspond à l'observateur à entrées inconnues du système (3.20) si les deux conditions nécessaires et suffisantes suivantes sont remplies :

$$\text{rang}(CF) = \text{rang}(F) \quad (3.26)$$

$$(C, TA_o) \text{ est observable} \quad (3.27)$$

Si ces conditions sont remplies, l'observateur à entrées inconnues génère un vecteur de résidu $r = y_\delta - C_o \hat{x}_\delta$ insensible à f .

La localisation d'un défaut s'opère à partir de l'évaluation de résidus issus d'un banc d'observateurs à entrées inconnues insensibles à l'une des composantes de f et sensibles aux autres. [Frank et Wünnenberg, 1989] ont été parmi les premiers à proposer des structures de bancs d'observateurs de Luenberger généralisés (GOS : Generalized Observer Scheme) ou dédiés [Alcorta Garcia et Frank, 1996b] (DOS : Dedicated Observer Scheme). Dans le schéma généralisé, chacun des observateurs est insensible à un seul défaut, par contre dans le cas dédié, chacun de ces observateurs génère un résidu insensible à tous les défauts sauf un. La structure DOS définit une matrice d'incidence équivalente à une matrice identité permettant l'isolation de multiples défauts simultanés, chaque observateur étant insensible à $p+m-1$

défauts. La structure GOS définit une matrice unitaire avec des termes diagonaux nuls conduisant à l'isolation d'un unique défaut. Conformément à [Hou et Muller, 1994] ou [Darouach et al., 1994], une condition nécessaire, selon laquelle le nombre de sorties est supérieur ou égal au nombre d'entrées inconnues, doit être respectée. Dans le cas de nos hypothèses de travail, la localisation de défauts capteurs ou actionneurs nous conduit à mettre en place une structure GOS, l'étape de décision s'opérant à partir d'un simple test logique avec l'élémentaire matrice d'incidence. Les observateurs à entrées inconnues seront synthétisés à partir des $p \times m$ représentations d'état suivantes :

$$\mathcal{M}_{LTI} = \begin{cases} x_{\delta}(k+1) = A_o x_{\delta}(k) + B_o u_{\delta}(k) + F_x^{\perp} f^*(k) + F_d f_d(k) \\ y_{\delta}(k) = C_o x_{\delta}(k) + F_y^{\perp} f^*(k) \end{cases} \quad (3.28)$$

où $f_d(k)$ présente le défaut auquel le résidu doit être insensible et $f^*(k)$ présente le vecteur des défauts affectant le résidu. Les matrices F_x^{\perp} , F_y^{\perp} et F_d sont connues et de dimensions appropriées.

La localisation permet de déterminer, parmi le banc d'observateurs à entrées inconnues, celui qui est insensible au défaut. L'observateur sélectionné, n'étant pas corrompu par les défauts, ce dernier estime de manière fiable l'état en supposant le modèle correct. La substitution de l'estimation de l'état dans (3.20) conduit à :

$$F_d f_d(k) = \hat{x}_{\delta}(k+1) - A_o \hat{x}_{\delta}(k) - B_o u_{\delta}(k) \quad (3.29)$$

En présence de défauts actionneurs, la matrice des défauts F_d est de rang plein colonne, l'estimation du défaut est rendue possible par la décomposition en valeurs singulières sous la forme classique :

$$F_d = U \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} V^T \quad (3.30)$$

où R est une matrice diagonale non singulière, U et V sont des matrices orthogonales.

Le remplacement du résultat de (3.30) dans (3.29) conduit, après calcul, à la détermination de l'estimation du défaut actionneur selon l'équation suivante :

$$\hat{f}_d(k) = VR^{-1}[\hat{\bar{x}}_{11}(k+1) - A_{11}\hat{\bar{x}}_1(k) - A_{12}\hat{\bar{x}}_2(k) - B_1 u(k)] \quad (3.31)$$

$$\text{avec } A = U^{-1}A_o U = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, B = U^{-1}B_o = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \text{ et } \hat{x}_{\delta} = U\hat{\bar{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\bar{x}}_1 \\ \hat{\bar{x}}_2 \end{bmatrix}$$

En présence d'un défaut de capteur, la dernière composante du vecteur d'état augmenté \hat{x}_δ , de l'observateur localisé comme insensible au défaut, constitue directement l'estimation du défaut $\hat{f}_c(k)$. Conformément à la notion d'indices de détectabilité introduite par [Liu et Su, 1997], le défaut d'actionneur sera estimé avec un retard d'un échantillon par rapport à l'instant d'occurrence de ce dernier (soit un indice de détectabilité de un). L'indice de détectabilité pour un défaut de capteur se réduit à un indice nul car directement détectable sur les sorties mesurées. Ces travaux théoriques et méthodologiques permettent de considérer le diagnostic sous la forme d'un unique module de détection, de localisation et d'estimation de défauts de capteurs ou d'actionneurs.

Le problème du découplage, présenté précédemment, a également été traité dans le domaine stochastique. Sans émettre aucune hypothèse sur la dynamique de l'entrée inconnue, associée à une matrice de distribution parfaitement définie, comme proposée par [Darouach et al., 1995] et [Keller et Darouach, 1999], le système en présence d'entrées inconnues peut être considéré sous forme d'un système singulier possédant un vecteur d'état composé des entrées inconnues. L'estimation du vecteur d'état augmenté est assurée par la minimisation de la variance-covariance de l'erreur d'estimation du sous système construit après transformation matricielle. L'application pratique de cette technique à un bioprocédé identifié et modélisé par nos soins autour d'un point de fonctionnement permet de développer des capteurs informationnels en garantissant leur fiabilité par la convergence de la trace de la matrice de variance-covariance de l'erreur d'estimation. L'objectif consistant à fournir une information sur les concentrations des effluents non mesurables en ligne en entrée du procédé, a été atteint, et l'intégralité de ces résultats issus d'une recherche méthodologique et appliquée a fait l'objet d'une publication dans une revue du domaine du traitement des eaux usées [RI_4].

3.3.3 - Système non linéaire \mathcal{M}_{NL} : découplage de défauts par le principe de la linéarisation exacte

Parmi les méthodes algébriques, de nombreux travaux ont consisté en la génération de résidus découplés des défauts pour des classes particulières de systèmes non linéaires tels que les systèmes bilinéaires [Kinnaert, 1999] et les systèmes polynômiaux. D'autres chercheurs s'attachent à résoudre le problème pour l'ensemble des systèmes non linéaires tels que [Zhang et al., 1998] dont les travaux aboutissent à une représentation entrée-sortie découplée des entrées inconnues à l'aide d'un algorithme spécifique. J'invite le lecteur à parcourir la récente synthèse bibliographique présentée dans [Kinnaert, 2003] mais également les travaux de recherche exposés dans le mémoire de thèse de Cédric JOIN [Join, 2002] consacré au diagnostic des systèmes non linéaires par découplage exact. Concernant les techniques dédiées au diagnostic des systèmes non linéaires, il faut citer les articles de référence consacrés au découplage exact des défauts par méthodes géométriques de [Hammouri et al., 2001] et [De Persis et Isidori, 2001].

Nos activités de recherche, conduites dans le contexte des méthodes algébriques, ont été directement inspirées des méthodes de découplage développées dans le cadre LTI : l'idée de base consiste en une linéarisation par retour d'état du système non linéaire \mathcal{M}_{NL} afin de générer un résidu dont la dynamique est régie par une représentation linéaire en les paramètres.

Cette approche nous a conduit à développer et à synthétiser une nouvelle méthode de découplage dédiée aux systèmes non linéaires \mathcal{M}_{NL} affine en les entrées inconnues décrite sous la forme suivante :

$$\mathcal{M}_{NL} = \begin{cases} \dot{x}(t) = g(x(t), u(t)) + Ff(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.32)$$

où $F \in \mathfrak{R}^{n \times q}$ correspond à la matrice de direction des entrées inconnues définies par le vecteur $f \in \mathfrak{R}^q$.

Sous certaines hypothèses concernant principalement l'accès à une partie de l'état par une simple transformation linéaire de la sortie, la méthode développée s'appuie sur la détermination par le calcul de décompositions successives par valeur singulière d'un sous espace d'état observable, insensible aux entrées non mesurées f . Le système est décomposable en deux sous-systèmes : une représentation d'état d'ordre réduit au vecteur d'état x_1 dépendant de f , et une seconde, au vecteur d'état x_2 insensible à f . L'estimation de l'entrée inconnue f s'effectue à partir de l'estimation \hat{x}_2 , établie, par exemple, à partir d'un observateur de Luenberger étendu et divers calculs mathématiques au niveau de l'équation d'état associé x_1 . Le développement théorique ainsi que la procédure d'estimation est intégralement présentée dans [RI_6] où cette méthode, consacrée à des systèmes affines en les entrées inconnues avec une matrice de distribution fixe, est illustrée dans le cadre du monitoring des bioprocédés. La formulation de l'équation classique de bilan matière caractérisant les bioprocédés exprimée par [Bastin et Dochain, 1990] a été revisitée, de manière à mettre en évidence les propriétés particulières de cette représentation générale. L'application de la méthode à un système non linéaire, aux relations cinétiques parfaitement connues, génère des résultats d'estimation des entrées non mesurées parfaitement cohérents avec ceux attendus, permettant d'envisager un bon fonctionnement du procédé biologique en termes de rendement et de productivité lorsque ce dernier sera exploité en boucle fermée.

En présence de défauts, le système non linéaire \mathcal{M}_{NL} est décrit selon la représentation suivante :

$$\mathcal{M}_{NL} = \begin{cases} \dot{x}(t) = g_0(x(t)) + g(x(t))u(t) + F(x(t))f(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.33)$$

L'idée de base d'une approche à base d'observateurs découplés consiste à élaborer une transformation d'état de telle sorte que le système résultant de cette manipulation mathématique soit insensible à f . Cet observateur permet de générer un résidu insensible à f . Cette approche, développée et présentée dans [Alcorta Garcia et Frank, 1997] et finalisée dans [Alcorta Garcia et Frank, 1999], constitue une parfaite extension de la théorie consacrée à la synthèse d'observateurs linéaires à entrées inconnues aux systèmes non linéaires, dans l'hypothèse où ces derniers sont affines en les défauts. Un difféomorphisme Φ_f

doit permettre d'écrire (3.33) de cette manière :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1(t) = \tilde{g}_{10}(\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t)) + \tilde{g}_1(\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t))u(t) + F_{\tilde{x}_1}(\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t))f(t) \\ \dot{\tilde{x}}_2(t) = \tilde{g}_{20}(\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t)) + \tilde{g}_2(\tilde{x}_1(t), \tilde{x}_2(t))u(t) \end{cases} \quad (3.34)$$

avec $\tilde{x}(t) = \Phi_f(x(t), u(t))$.

La transformation d'état Φ_f est définie par l'équation :

$$\frac{\partial}{\partial x(t)} \Phi_f(x(t), u(t)) \times F(x(t))f(t) = 0 \quad (3.35)$$

Cette transformation est résolue par le théorème de Frobenius, énoncé sommairement dans [Frank et Ding, 1997] et détaillé dans [Isidori, 1995], aux conditions nécessaires et suffisantes restrictives. Contrairement au cas des modèles linéaires, l'obtention d'une telle transformation n'est pas immédiate et l'équation (3.35) n'est pas toujours satisfaite. Nous avons procédé à un changement de base permettant d'extraire un sous-système insensible aux entrées inconnues à l'aide d'injection de sortie. L'obtention de ce sous-espace s'appuie sur la théorie de la commande des systèmes non linéaires par dérivation successive [Fossard et Normand-Cyrot, 1995]. Notre participation à ses activités de recherche, issue d'un travail commun avec Jean Christophe Ponsart, nous a permis de contribuer de manière innovante au découplage des entrées inconnues au sein des systèmes non linéaires affines en la commande.

Pour simplifier l'analyse et assurer le résultat, un banc d'observateurs sera construit afin de localiser le défaut. Pour chaque observateur, l'objectif consiste à extraire un sous système insensible à une unique composante de f , noté f_j , en dérivant la sortie y pour déceler la contribution du $j^{\text{ème}}$ élément de f . A chaque défaut est associé un indice caractéristique traduisant le nombre de dérivations nécessaires à l'apparition de f_j dans l'écriture de la $j^{\text{ème}}$ sortie. Cet indice, correspondant à l'indice de détectabilité énoncé à la fin du §3.3.2, se définit mathématiquement par :

$$\rho_j = \min \{ \varsigma \in \mathbb{N} | L_F L_g^{(\varsigma-1)} h(x(t)) \neq 0 \} \quad (3.36)$$

où L est l'opérateur de Lie défini par :

$$L_g^0 h(x) = h(x) \quad (3.37)$$

$$L_g^1 h(x) = \frac{\partial}{\partial x} h(x) \times g(x) \quad (3.38)$$

$$L_g^\varsigma h(x) = L_g^1 L_g^{(\varsigma-1)} h(x) = \frac{\partial}{\partial x} (L_g^{(\varsigma-1)} h(x)) \times g(x) \quad (3.39)$$

$$L_F L_g^1 h(x) = \frac{\partial}{\partial x} (L_g^1 h(x)) \times F(x) \quad (3.40)$$

Si l'équation (3.36) est vérifiée, une seule sortie, notée y_j , est affectée par f_j avec un délai inhérent au nombre de dérivations indiquées par la valeur prise par l'indice ρ_j . Cette information permet de construire une représentation d'état dans laquelle il sera possible d'extraire un sous-système insensible à f_j , soit :

$$\tilde{x}(t) = Q(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(t) \\ \tilde{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_j(t) \\ \dot{y}_j(t) \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ y_j^{(\rho_j-1)}(t) \\ \hline \varphi(x(t), u(t)) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

où, d'après [Fossard et Normand-Cyrot, 1995], il est toujours possible de trouver la fonction $\varphi(x(t), u(t))$ vérifiant les deux conditions suivantes :

$$\text{rang} \left(\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} y_j(t) \\ \dot{y}_j(t) \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ y_j^{(\rho_j-1)}(t) \\ \hline \varphi(x(t), u(t)) \end{bmatrix} \right) = \dim(x) \quad (3.42)$$

$$\frac{d}{dt}(\varphi(x(t), u(t))) \text{ indépendant de } f_j(t) \quad (3.43)$$

Le système non linéaire (3.33) s'écrit, dans le nouveau système de coordonnées, défini en (3.41), sous la forme d'un sous-système d'ordre réduit découplé de f_j , soit :

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}}_1 &= \dot{\mathbf{g}}(\tilde{\mathbf{x}}_1(t), \tilde{\mathbf{x}}_2(t), \mathbf{u}(t)) \\ \tilde{\mathbf{y}}(t) &= \tilde{\mathbf{h}}(\tilde{\mathbf{x}}_1(t), \tilde{\mathbf{x}}_2(t)) \end{cases} \quad (3.44)$$

où $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ représente le vecteur de sortie $\mathbf{y}(t)$, la $j^{\text{ème}}$ sortie $y_j(t)$ étant omise. Le vecteur d'état $\tilde{\mathbf{x}}_2(t)$ est considéré comme un vecteur d'entrée pour la représentation (3.44)

Ce sous-système, insensible à f_j , est exploité pour la synthèse d'observateur à partir de méthodes classiques, comme un observateur de Luenberger étendu [Misawa et Hedrick, 1989]. La construction d'un banc d'observateurs où chacun est synthétisé de manière à être insensible à des défauts distincts, engendre des résidus structurés suivant un schéma GOS. En présence d'un défaut de capteurs, l'observateur insensible au défaut génère une estimation du vecteur d'état $\tilde{\mathbf{x}}_1(t)$ et par conséquent une estimation de la sortie corrompue par le défaut. Par contre, aucune estimation d'un défaut d'actionneurs n'est directement disponible depuis la représentation définie à l'équation (3.44).

La méthode de découplage que nous avons développée est de mise en oeuvre difficile, nécessitant l'application d'un grand nombre de difféomorphismes pour le découplage. Les méthodes proposées dans la littérature et développées par nos soins requièrent une parfaite connaissance du comportement dynamique du système. La génération de résidus robuste aux erreurs de modélisation ou aux incertitudes est très rarement abordée, l'étude de modèles incertains constitue un problème complexe à résoudre où la minimisation de critère et/ou l'étude de sensibilité des résidus vis-à-vis des incertitudes ne sont pas des travaux de recherche triviaux. Les limites de découplage directement inspirées des méthodes développées dans le cadre LTI sont rapidement atteintes surtout lorsque des modèles incertains sont à considérer. Une connaissance parfaite du système non linéaire ne constitue pas obligatoirement une hypothèse de travail envisageable. Etant donné que de nombreuses applications industrielles considèrent des méthodes de commande à base de multiples modèles, nous nous sommes orientés à traiter le problème du diagnostic certes, sur toute la plage de fonctionnement du système non linéaire, mais en s'affranchissant d'une connaissance exacte du système pour lui substituer à une connaissance partielle, à l'aide d'une combinaison convexe de modèles simplifiés. C'est ce que nous proposons de découvrir dans le paragraphe suivant.

3.3.4 - Système non linéaire représenté sous forme d'une combinaison convexe $\mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}}$: découplage de défauts par un banc de filtres robustes

En l'absence de connaissances exactes du système non linéaire \mathcal{S} , nous nous sommes récemment intéressés au diagnostic de systèmes représentés sous forme d'une combinaison convexe de modèles LTI, noté $\mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}}$, définis précédemment. De nombreux travaux utilisent le principe selon lequel il faut «diviser afin de régner» pour représenter le comportement dynamique des systèmes non linéaires, telles les approches de diagnostic à base de réseaux de neurones ou de logique floue ([Spreitzer et Ballé, 2000] et [Patton et al., 2001]) autour de différents points de fonctionnement en neuro-flou [Ballé et al., 1997] et [Wolfram et

Isermann, 2001]. Par contre, rares sont les travaux de recherches dédiés à la représentation considérée, malgré les préoccupations actuelles de la communauté scientifique dans le domaine de la synthèse des lois de commande en l'absence de défauts. Des sessions spéciales organisées dans des congrès renommés (par exemple 15th IFAC World Congress 2002 «Switching and multiple models for adaptive control») et des revues de qualité (par exemple l'édition spéciale dans la revue «International Journal of Adaptive Control and Signal Processing» [**Karny et Narendra, 2003**]) constituent des indicateurs quant à l'activité future dans cet axe de recherche.

Sous les mêmes hypothèses de représentation, [**Gertler, 1998**] traite succinctement, à partir de l'espace de parité, le problème du diagnostic de tels systèmes sous forme de la résolution élémentaire de recherche d'un unique vecteur de parité pour l'ensemble des modèles en présence de défauts. En théorie, dans le cadre de l'espace de parité, il est effectivement possible de démontrer qu'une solution optimale peut être établie, permettant ainsi de générer un unique résidu insensible à la fois aux défauts et également aux passages d'un modèle LTI, mais en pratique, il n'y a pas de certitude absolue. Au contraire de Gertler, je considère qu'un banc d'observateurs à entrées inconnues est efficace pour détecter, isoler et estimer des défauts. Ce banc doit permettre également d'atteindre cet objectif de diagnostic et il doit en plus déterminer les fonctions de pondération, supposées non mesurable, permettant dans un contexte boucle fermée à des fins d'accommodation, de préciser le modèle actif.

Supposons le diagnostic de systèmes non linéaires \mathcal{S} au comportement dynamique décrit sous forme d'un modèle analytique, noté $\mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}}$, équivalent à une combinaison de modèles linéaires stochastiques discrets sur l'ensemble convexe :

$$\Lambda = \left\{ \varphi \in \mathfrak{R}^{\aleph} \mid \varphi_i(k) \geq 0, \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) = 1 \right\} \quad (3.45)$$

$\forall i = [1, 2, \dots, \aleph]$, \aleph étant le nombre total de points de fonctionnement, conformément à l'équation (3.19), chaque \mathcal{M}_i en présence de défauts se définit selon la représentation :

$$\mathcal{M}_i = \begin{cases} X(k+1) = A_i X(k) + B_i U(k) + \Delta x_i + \omega_i(k) + F^i f(k) \\ Y(k) = C_i X(k) + \Delta y_i + v_i(k) \end{cases} \quad (3.46)$$

où ω_i (respectivement v_i) représente une séquence indépendante assimilée à du bruit blanc de matrice de variance-covariance Q_i (respectivement R_i).

[**Eide et Maybeck, 1996**] considèrent un système linéaire discret stochastique autour d'un unique point de fonctionnement en présence de \mathfrak{S} défauts, d'amplitude supposée connue, sous forme de \mathfrak{S} multiples modèles. La détection et la localisation des défauts sont réalisées à partir d'un banc de \mathfrak{S} filtres de Kalman. Contrairement à l'approche «découplage exact», l'objectif

est de rendre insensible l'innovation γ vis-à-vis du défaut pour lequel le filtre a été synthétisé. De part les hypothèses stochastiques considérées, le vecteur innovation γ (*résidu*) résultant du filtre, image la plus représentative du comportement dynamique du système à l'instant k , suit une loi de distribution normale centrée, permettant de calculer une densité de probabilité. [Eide et Maybeck, 1996] proposent de réaliser la localisation par le calcul de mode de probabilités suivant le théorème de Bayes à partir des \mathfrak{S} densités de probabilité. Une structure hiérarchique est présentée par l'auteur permettant de considérer un premier banc de \mathfrak{S} filtres de Kalman en considérant des défauts simples, suivi d'une seconde série de filtres de Kalman pour traiter les défauts multiples. L'algorithme développé, nommé *MMAE (Multiple Model Adaptive Estimation)*, a été considéré à des fins d'estimation de vecteur d'état ainsi que dans le domaine du contrôle par [Maybeck, 1999]. Toujours dans une approche multiple modèle, le système linéaire discret stochastique autour d'un unique point de fonctionnement soumis à \mathfrak{S} défauts, peut être considéré comme un système hybride avec un séquençement de mode traduit sous forme de chaînes de Markov en assimilant les défauts à des modes de fonctionnement. [Zhang et Rong Li, 1998] ont été parmi les premiers à prendre en compte une telle hypothèse considérant l'algorithme, nommé *IMM (Interacting Multiple Model)*, développé par [Blom et Bar-Shalom, 1988], pour synthétiser une approche permettant de détecter et de localiser ainsi des probabilités d'occurrence entre les défauts, et d'estimer le vecteur d'état de chaque filtre au moyen des modes de probabilités passées. [Blom et Bar-Shalom, 1988] ont développé cet algorithme pour résoudre le problème de l'estimation d'état au sein des systèmes linéaires aux coefficients basculant brusquement d'un mode à l'autre permettant d'être exploité à des fins de commande de systèmes ([Rong Li et Bar-Shalom, 1993]). Le fait de mettre en oeuvre des modes de défauts a récemment été étendu aux systèmes non linéaires en définissant l'algorithme *IMM* à partir de filtres de Kalman Etendus (*EKF*) [Li et Kadiramanathan, 2001]. Dans le cadre de nos activités, le diagnostic de défauts d'un ensemble de modèles linéaires stochastiques aurait pour résultat d'accroître considérablement le nombre de filtres à synthétiser : sous l'hypothèse de l'occurrence d'un seul défaut, $\mathfrak{S} \times \mathfrak{N}$ filtres devraient être exploités en ligne. La définition de la matrice de probabilités des défauts vis-à-vis des points de fonctionnement ne se révèle pas être une tâche aisée, nous proposons de synthétiser et de développer une méthode plus adaptée.

En supposant \mathfrak{N} filtres de Kalman exploités autour des \mathfrak{N} points de fonctionnement, l'erreur d'estimation $\varepsilon_i(k)$, lorsque le filtre est synthétisé avec le modèle \mathcal{M}_i le système \mathcal{S} évoluant autour du $j^{\text{ème}}$ point de fonctionnement, est équivalente à :

$$\varepsilon_i(k+1) = (A_i - K_i(k)C_i)\varepsilon_i(k) + F^i f(k) - K_i(k)v_i(k) + \omega_i(k) + \xi_i^{\varepsilon}(k) \quad (3.47)$$

et le résidu $r_i(k)$ correspondant à :

$$r_i(k) = C_i\varepsilon_i(k) + v_i(k) + \xi_i^r(k) \quad (3.48)$$

où ξ représente les incertitudes entre le modèle \mathcal{M}_i , utilisé pour synthétiser le filtre de Kalman associé, et le système \mathcal{S} évoluant autour du $j^{\text{ème}}$ point de fonctionnement au niveau de l'équation de l'erreur d'estimation $\xi_i^{\varepsilon}(k)$ et de celle du résidu $\xi_i^r(k)$.

Les équations (3.47) et (3.48) montrent que les résidus sont sensibles aux erreurs de modélisation (variable dans le temps en fonction du point de fonctionnement) simultanément avec les défauts lors de leur occurrence. Pour résoudre ce problème, plutôt que de considérer les défauts comme des entrées inconnues et ainsi s'inspirer des solutions de découplage de défauts semblable à l'approche considérée précédemment étendue au cas stochastique, nous avons étudié les filtres robustes aux incertitudes de modélisation et de perturbations où, après avoir effectué une affectation des valeurs propres, le degré de liberté restant sur le gain du filtre est exploité afin de minimiser l'effet du bruit sur les résidus. Cette étude s'est fondée sur les travaux développés par [Keller, 1999] et par [Darouach et Zasadzinski, 1997]. Signalons également que [Darouach et al., 2003] proposent une généralisation des entrées inconnues sur l'équation de sortie.

Les filtres de détection de défauts constituent une classe particulière d'observateurs de Luenberger d'ordre plein possédant une matrice de gain de contre réaction conçue de telle sorte que l'erreur d'estimation de sortie (le vecteur résidu) prenne une direction unique et particulière associée à chacun des défauts à détecter [Eide et Maybeck, 1996]. Dans un contexte stochastique, le filtre de détection à constituer est vu comme une structure de filtre de Kalman particulier avec une contrainte sur la direction que doivent suivre les résidus.

Sous l'hypothèse qu'un défaut apparaisse à l'instant k_d ($k > k_d$) et que le système non linéaire \mathcal{S} évolue brutalement du point de fonctionnement à l'instant k_e ($k > k_e$), le résidu du $i^{\text{ème}}$ filtre s'exprime sous la forme :

$$\begin{aligned} r_i(k) &= \bar{r}_i(k) + \xi_i^e(k) \\ &+ \rho(k, k_d) \left[f(k_d) \ f(k_d + 1) \ \dots \ f(k-1) \right] \\ &+ \beta(k, k_e) \left[\xi_i^r(k_e) \ \xi_i^r(k_e + 1) \ \dots \ \xi_i^r(k-1) \right] \end{aligned} \quad (3.49)$$

avec

$$\rho(k, k_d) = C_i \begin{bmatrix} \Gamma_i^{k_d+1}(k) F^i \\ \Gamma_i^{k_d+2}(k) F^i \\ \dots \\ F^i \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

et

$$\beta(k, k_e) = C_i \begin{bmatrix} \Gamma_i^{k_e+1}(k) \\ \Gamma_i^{k_e+2}(k) \\ \dots \\ I \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$\text{où } \Gamma_i^\Delta(k) = \prod_{\tau=\Delta}^{k-1} L_i(\tau) \text{ et } L_i(k) = (A_i - K_i(k)C_i), K_i \text{ étant le gain du filtre et } \bar{r}_i(k)$$

correspondant au résidu du $i^{\text{ème}}$ filtre en l'absence de défauts et d'erreurs de représentation : le comportement dynamique du système non linéaire étant assimilé à celui d'un modèle linéaire stochastique.

Dans le cadre du diagnostic de défauts, notre objectif reste contradictoire à celui généralement développé dans les filtres robustes : nous désirons synthétiser un générateur de résidus insensible aux défauts, mais dans notre cas, uniquement sensible aux erreurs de modélisation, c'est-à-dire à la recherche d'une égalité commune à tous les filtres :

$$(A_i - K_i(k)C_i)F^i = 0 \quad (3.52)$$

En supposant une distribution matricielle des erreurs de modélisation différente de celles des défauts et un nombre de défauts inférieur au nombre de sorties mesurées $\forall i, \text{rang}(C_i, F^i) = q < m$, une solution a été proposée par [Keller, 1999]. Le gain du filtre est décomposé en deux parties :

$$K_i = \varpi_i \Xi_i + \bar{K}_i \Sigma_i \quad (3.53)$$

avec $\Xi_i = (C_i F^i)^+$, $\varpi_i = A_i F^i$, $\Sigma_i = \alpha_i (I_m - C_i F^i \Xi_i)$ et $\alpha_i \in \mathcal{R}^{(m-q) \times m}$ est une matrice constante de telle sorte que la matrice Σ_i soit de plein rang ligne.

La condition (3.52) étant remplie, le résidu, défini en (3.49), devient :

$$\begin{aligned} r_i(k) &= \bar{r}_i(k) + \xi_i^e(k) \\ &+ C_i F^i f(k-1) \\ &+ \beta(k, k_e) \begin{bmatrix} \xi_i^r(k_e) & \xi_i^r(k_e+1) & \dots & \xi_i^r(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Sous l'hypothèse que (3.53) soit réalisable, les propriétés matricielles résultantes $\Sigma_i C_i F^i = 0$ et $\Xi_i C_i F^i = I$, permettent de découpler le résidu en les deux vecteurs distincts suivants :

$$\tilde{r}_i(k) = \begin{bmatrix} \gamma_i(k) \\ \Omega_i(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_i r_i(k) \\ \Xi_i r_i(k) \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

où

$$\begin{aligned} \Omega_i(k) &= f(k-1) + \Xi_i(\tilde{r}_i(k) + \xi_i^\varepsilon(k)) \\ &+ \Xi_i \beta(k, k_e) \begin{bmatrix} \xi_i^r(k_e) & \xi_i^r(k_e + 1) & \dots & \xi_i^r(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.56)$$

et

$$\begin{aligned} \gamma_i(k) &= \Sigma_i(\tilde{r}_i(k) + \xi_i^\varepsilon(k)) \\ &+ \Sigma_i \beta(k, k_e) \begin{bmatrix} \xi_i^r(k_e) & \xi_i^r(k_e + 1) & \dots & \xi_i^r(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.57)$$

L'obtention du résidu $r_i(k)$ est déterminé à l'aide d'un filtre de Kalman, minimisant dans le contexte stochastique la trace de la matrice de variance-covariance de l'erreur d'estimation, et régit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \hat{X}(k+1) = A_i \hat{X}(k) + B_i U(k) + \Delta x_i + (\varpi_i \Xi_i + \bar{K}_i \Sigma_i)(Y(k) - C_i \hat{X}(k)) \\ \hat{Y}(k) = C_i \hat{X}(k) + \Delta y_i \end{cases} \quad (3.58)$$

où

$$\bar{K}_i(k) = \bar{A}_i \bar{P}_i(k) \bar{C}_i^T \times (\bar{C}_i \bar{P}_i(k) \bar{C}_i^T + \bar{V}_i)^{-1} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(k+1) &= (\bar{A}_i - \bar{K}_i(k) \bar{C}_i) \times \bar{P}_i(k) \times (\bar{A}_i - \bar{K}_i(k) \bar{C}_i)^T \\ &+ \bar{K}_i(k) \bar{V}_i \bar{K}_i^T(k) + \bar{Q}_i \end{aligned} \quad (3.60)$$

avec $\bar{A}_i = A_i - \varpi_i \Xi_i C_i$, $\bar{C}_i = \Sigma_i C_i$, $\bar{V}_i = \Sigma_i R_i \Sigma_i^T$ et $\bar{Q}_i = Q_i + \varpi_i \Xi_i R_i \Xi_i^T \varpi_i^T$.

Les conditions d'existence et de stabilité du filtre sont étudiées et démontrées par **[Keller, 1999]**.

A partir d'un banc de filtres défini selon (3.58), un vecteur de résidus insensibles aux

défauts est généré afin de déterminer le modèle m_i le plus représentatif parmi \mathcal{S} du comportement dynamique du système non linéaire \mathcal{S} étudié et, plus précisément, de sélectionner dans un contexte boucle fermée, le point de fonctionnement actif. Comme suggéré par [Maybeck, 1999], le résidu $\gamma_i(k)$ découplé des défauts est utilisé pour calculer la fonction de densité de probabilité $\Phi_i(k)$ suivant une loi de distribution gaussienne :

$$\Phi_i(k) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \times \gamma_i(k) \Theta_i^{-1}(k) \gamma_i^T(k)}}{\sqrt{(2\pi)^{m-q} \det(\Theta_i^{-1}(k))}} \quad (3.61)$$

où $\Theta_i \in \mathfrak{R}^{(m-q) \times (m-q)}$ représente la matrice de variance-covariance de $\gamma_i(k)$ équivalente à $\Theta_i(k) = \bar{C}_i \bar{P}_i(k) \bar{C}_i^T + \bar{V}_i$.

Le mode de probabilités \wp_i , associé à chaque modèle m_i peut ainsi être calculé selon le théorème de Bayes :

$$\wp_i(k+1) = \frac{\wp_i(k) \times \Phi_i(k)}{\sum_{h=1}^{\mathcal{S}} \wp_h(k) \times \Phi_h(k)} \quad \text{avec} \quad \sum_{i=1}^{\mathcal{S}} \wp_i(k+1) = 1 \quad (3.62)$$

Le comportement dynamique du système non linéaire \mathcal{S} est défini sur l'ensemble convexe de modèles linéaires établi à partir de l'estimation de la fonction de validation image des modes de probabilités ([Murray-Smith et Johansen, 1997]):

$$\Lambda = \left\{ \wp \in \mathfrak{R}^{\mathcal{S}} \mid \wp_i(k) \geq 0, \sum_{i=1}^{\mathcal{S}} \wp_i(k) = 1 \right\} \quad (3.63)$$

Les défauts capteurs et actionneurs, présents au sein du système non linéaire \mathcal{S} sous forme exclusivement additive, sont, au même titre que le comportement dynamique défini en (3.10), estimés suivant l'équation suivante :

$$\hat{f}(k) = \sum_{i=1}^{\mathcal{S}} \wp_i(k) (\Omega_i(k)) \quad (3.64)$$

où la variable $\Omega_i(k)$, définie en (3.56), constitue une estimation du défaut au sein du $i^{\text{ème}}$ filtre de Kalman.

Nous avons supposé que le comportement dynamique du système non linéaire \mathcal{S} est parfaitement défini à partir d'un ensemble convexe de modèles LTI sans se préoccuper des erreurs de modélisation envisageables même autour d'un point de fonctionnement ou entre les différents points de fonctionnement lors du passage d'un modèle à l'autre. La présence de ces incertitudes, supposées structurées, risque de compromettre le diagnostic de défauts en termes de fausses alarmes et de non détection. Sous l'hypothèse que la matrice de direction des défauts soit indépendante de celle des erreurs de modélisation (*à vérifier par simple calcul de rang*), notre objectif consiste à synthétiser un générateur de résidus permettant à la fois d'être insensible aux défauts et sensible aux incertitudes pour déterminer le modèle actif, et également d'être sensible aux défauts et insensible aux incertitudes pour détecter et isoler les défauts. Le nombre de défauts et d'erreurs de modélisation étant supérieur au nombre de sorties mesurées, la génération de tels résidus a été développée sur la base d'une redondance temporelle par l'espace de parité ([Chow et Willsky, 1984], [Frank, 1990], [CI_8]). La synthèse des résidus est réalisée non pas par un rejet strict des éléments non désirés (*découplage exact*) au niveau du résidu, mais par un compromis optimal entre la sensibilité de certains éléments et l'insensibilité à d'autres, réalisé à partir de la recherche d'un vecteur de parité minimisant ou maximisant un critère en adéquation avec l'objectif de diagnostic à atteindre [Lou et al., 1986]. Les résultats issus de ces travaux, achevés en mars 2003, seront détaillés dans le mémoire de thèse de Manuel Adam MEDINA [TH_Medina].

Dans les travaux de recherche, précédemment exposés, nous n'avons pas étudié la stabilité du système de diagnostic. L'étude, engagée récemment par l'encadrement du doctorant Mickael RODRIGUES [TH_Rodrigues], a pour objet d'étendre les domaines de stabilité relatifs à la stabilisation des modèles locaux à la stabilité globale, en supposant un système non linéaire \mathcal{S} défini par la séquence de \aleph modèles linéaires discrets déterministes \mathcal{m}_i sur un ensemble convexe :

$$\mathcal{m}(k) = \left\{ \begin{array}{l} \aleph \\ \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) \mathcal{m}_i \mid \varphi_i(k) \geq 0, \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) = 1 \end{array} \right\} \quad (3.65)$$

où la variable φ correspond à une variable de coordination connue et où $\forall i$ la matrice d'observation est égale à C .

Sous des conditions particulières, concernant les matrices de direction des défauts, un unique observateur peut être synthétisé à partir de la représentation (3.65) afin de détecter, isoler et estimer les défauts en assurant la stabilité et la convergence de l'erreur d'estimation.

Ainsi $\forall i = [1, 2, \dots, \aleph]$, \aleph étant le nombre total de points de fonctionnement et $\forall j = [1, 2, \dots, \aleph]$, \aleph étant le nombre de défauts avec $\text{rang}[F^i] = \aleph$ si

$\text{rang}[F_1^i \dots F_j^i \dots F_{\aleph}^i] = 1$ alors $\left(\sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) F^i \right) f(k) = Y_f(k)$. Cette hypothèse, signifie que

pour chaque modèle \mathcal{m}_i la matrice de direction de défauts reste la même comme indiqué dans

[CI_42]. En décomposant la matrice de gain de l'observateur $K(k)$ selon (3.53), en une partie, découplant les défauts de l'erreur d'équation, l'autre partie servant à régler la dynamique de l'observateur, on a :

$$K(k) = \varpi(k)\Xi + \bar{K}(k)\Sigma \quad (3.66)$$

$$\text{avec } \Xi = (CY)^+, \varpi(k) = A(k)Y, \Sigma = \alpha(I_m - CY\Xi),$$

un vecteur $\tilde{r}(k)$, constitué de deux composantes, l'une insensible aux défauts et l'autre image de $f(k)$, est déterminé à partir du résidu $r(k)$ issu des équations :

$$\begin{cases} \hat{X}(k+1) = A(\varphi(k))\hat{X}(k) + B(\varphi(k))U(k) + \Delta x(\varphi(k)) + K(k)(Y(k) - C\hat{X}(k)) \\ \hat{Y}(k) = C\hat{X}(k) + \Delta y(\varphi(k)) \end{cases} \quad (3.67)$$

$$\text{où } \Pi(\varphi(k)) = \sum_{i=1}^{\aleph} \Pi_i \varphi_i(k)$$

$$\text{avec } \tilde{r}(k) = \begin{bmatrix} \gamma(k) \\ \Omega(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma r(k) \\ \Xi r(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma \tilde{r}(k) \\ \Xi \tilde{r}(k) + f(k) \end{bmatrix}$$

Dans le cadre de l'approche multiple modèle considérée dans un contexte boucle fermée en supposant le système non linéaire \mathcal{S} défini autour de \aleph points de fonctionnement, le gain $\bar{K}(k)$, seul degré de liberté de l'observateur, est calculé d'après [Stiwell et Rugh, 1999] et [Leith et Leithead, 1999] par interpolation des gains \bar{K}_i :

$$\bar{K}(k) = \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) \bar{K}_i \quad (3.68)$$

où chaque gain \bar{K}_i est déterminé hors ligne par un placement pôle associé à la matrice $(\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C})$ avec $\bar{C} = \Sigma C$ et $\bar{A}_i = A_i(I - Y\Xi C)$.

D'après la définition de stabilité de Lyapunov, le gain \bar{K}_i doit également garantir que la matrice $(\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C})$ soit Hurwitz c'est-à-dire qu'elle vérifie l'inégalité suivante [Barmish, 1994] :

$$(\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C})^T P (\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C}) - P < 0 \text{ avec } P > 0 \quad (3.69)$$

Par le complément de Schur, l'équation (3.69) devient équivalente à l'Inégalité Matricielle Linéaire, nommé communément LMI (Linear Matrix Inequality) :

$$\begin{pmatrix} P & (\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C})^T P \\ P(\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C}) & P \end{pmatrix} > 0 \quad (3.70)$$

Conformément aux études de stabilité de [Daafouz et Bernussou, 2001] dédiées aux systèmes LPV, l'inégalité (3.70) peut être étendue à l'ensemble convexe Λ sous la forme :

$$\begin{pmatrix} P & \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) (\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C})^T P \\ P \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) (\bar{A}_i - \bar{K}_i \bar{C}) & P \end{pmatrix} > 0 \quad (3.71)$$

Les propriétés d'associativité de l'addition ainsi que la définition de \bar{A}_i et \bar{C} conduisent à écrire l'inégalité (3.70) ainsi :

$$\begin{pmatrix} P & \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) (A_i - K_i C)^T P \\ P \sum_{i=1}^{\aleph} \varphi_i(k) (A_i - K_i C) & P \end{pmatrix} > 0 \quad (3.72)$$

ou bien également :

$$\begin{pmatrix} P & (A(\varphi(k)) - K(\varphi(k))C)^T P \\ (A(\varphi(k)) - K(\varphi(k))C)P & P \end{pmatrix} > 0 \quad (3.73)$$

L'équation (3.73) équivaut à étudier la stabilité de l'observateur défini à l'équation (3.66). Par conséquent, l'obtention d'une unique solution $P > 0$ pour les \aleph inégalités matricielles linéaires, établies en (3.70), assure la stabilité et la convergence de l'erreur d'estimation de l'observateur :

$$e(k+1) = (A(\varphi(k)) - K(\varphi(k))C)e(k) \quad (3.74)$$

[Oliviera et al., 1999] proposent une autre solution moins conservative et restrictive en cherchant à déterminer une unique matrice pour le jeu d'inégalités.

Comparativement à la synthèse et à l'analyse de la stabilité de contrôleur flou réalisées également à partir de LMI en réduisant les fonctions d'interpolation à un problème convexe ([Lee et al., 2001] et [Park et al., 1994]), le gain du filtre, à élaborer en présence de défauts, doit assurer la stabilité et le découplage vis-à-vis des éléments défaillants. Ces premiers pas dans l'étude de la stabilité des systèmes en présence de défauts nous paraissent prometteurs et permettent d'envisager de poursuivre dans cette direction sans se limiter à des matrices de signatures particulières.

3.3.5 - Conclusion

Dans la présentation des travaux de recherche, les méthodes de diagnostic de défauts sont exclusivement élaborées à base de modèles mathématiques. Les défauts de capteurs et d'actionneurs, entrées non mesurables présentes au sein d'un système, sont assimilés à des entrées inconnues représentées sous forme matricielle par des incertitudes structurées. Notre démarche scientifique, stratégie de diagnostic consistant à s'intéresser exclusivement au principe de découplage des entrées inconnues, nous a permis de développer nos travaux contribuant à détecter, isoler et estimer les défauts quel que soit le modèle de représentation (linéaire, non linéaire, combinaison convexe) du procédé. Dans cette démarche, nous n'avons pas examiné la robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisation. De ce fait, la synthèse de méthodes de diagnostic consacrées aux systèmes incertains n'est pas traitée dans ce mémoire. Nos travaux de recherche, dédiés aux systèmes représentés par l'interpolation de modèles élémentaires, nous amènent inévitablement à étudier la sensibilité des défauts vis-à-vis des erreurs de modélisation intégrant ainsi dans la synthèse des méthodes de diagnostic la notion de robustesse. Nos activités de recherche ont porté sur le diagnostic dans son ensemble, telle que l'estimation de défauts qui est plus rarement traitée dans la littérature.

L'estimation de l'amplitude du défaut contribue à la génération d'un module de diagnostic en adéquation avec une stratégie d'accommodation de défauts sans hypothèse en termes d'amplitude, de localisation et de temps d'apparition. Associé à chaque mode de commande, nous présentons une analyse et une synthèse de méthodes d'accommodation de défauts par le principe de rejets de perturbations.

3.4 - Accommodation de défauts par rejet de perturbations.

3.4.1 - Introduction

Dans le cadre des systèmes tolérants aux défauts, une stratégie basée sur le principe de compensation afin d'annihiler l'effet des défaillances à l'aide d'une commande additive, à l'instar d'une stratégie modifiant et adaptant le gain du régulateur, est développée et synthétisée. Ce choix est directement lié à la représentation des défauts d'actionneurs et de capteurs présents dans les systèmes non linéaires sous forme additive (cf §3.2). Quel que soit le système non linéaire \mathcal{S} au comportement dynamique décrit sous forme des modèles

analytiques $\mathcal{M}_{\mathcal{S}}$, la méthode considérée repose sur l'équation élémentaire suivante :

$$U = U^N + U^F \quad (3.75)$$

où U^N représente la commande nominale et U^F définit une commande additive dépendante des défauts dans le but de compenser ou de rejeter leur effet.

Alors qu'un unique module de diagnostic peut être considéré pour détecter, isoler et estimer les défauts d'actionneurs et de capteurs, il est indispensable de synthétiser des méthodes d'accommodation différentes selon l'origine du défaut. L'accommodation de défauts de capteurs peut être traitée comme un simple passage brusque d'une information provenant d'un capteur réel à un capteur informationnel, estimation correcte de la donnée corrompue. L'expression «sensor masking» est parfois utilisée pour définir les systèmes tolérants dévolus aux défauts capteurs [Wu et al., 2003]. Plus précisément, l'accommodation en présence de défauts de capteurs reste un problème essentiellement lié au diagnostic en termes de détection, de localisation et d'estimation de l'état du système ou de la sortie rendue insensible aux défauts [Zhou et Frank, 1998], [CI_18], [Marcu et al., 1999], [Bennett et al., 1999], [CI_26], [CI_31] et [Puig et Quevedo, 2001]. Il est certes toujours possible à des fins d'uniformisation de considérer l'équation (3.66) dans le cas des défauts capteurs en n'exploitant pas directement l'estimation de l'état dans son intégralité mais uniquement la partie modifiant l'état comme l'indiquent [Bonivento et al., 2003a] et [CI_25].

3.4.2 - Système linéaire \mathcal{M}_{LTI}

En présence d'un défaut sur le $j^{\text{ème}}$ actionneur, la matrice F_d , affectant le modèle \mathcal{M}_{LTI} défini à l'équation (3.28), est équivalente à la $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice de commande B . Conformément à (3.75), l'accommodation est réalisée en appliquant au système, la loi de commande suivante :

$$u_{\delta}(k) = u_{\delta}^N(k) + u_{\delta}^F(k) \quad (3.76)$$

Dans le cadre d'un modèle \mathcal{M}_{LTI} avec $C \neq I_m$, en présence de défauts d'actionneurs, la composante nominale $u_{\delta}^N(k)$ du vecteur de commande $u_{\delta}(k)$ est calculée à partir des informations issues de l'estimation de l'état de l'observateur insensible au défaut. De plus, l'annihilation de l'effet du défaut à partir de la commande additive $u_{\delta}^F(k)$ s'effectue si et seulement si l'égalité suivante peut être obtenue :

$$B u_{\delta}^F(k) + B_j f_d(k) = 0 \quad (3.77)$$

L'équation précédente est résolue à partir de l'estimation du défaut $\hat{f}_d(k)$ sous l'hypothèse que la matrice B est de rang plein ligne :

$$u_{\delta}^F(k) = -B^{+} B_j \hat{f}_d(k) \quad (3.78)$$

où B^{+} est la pseudoinverse de la matrice B . En présence d'un nombre équivalent d'état et de commande la matrice B est carré, une simple inversion de matrice B^{-1} suffira à calculer (3.78).

Généralement la matrice B n'est pas de rang plein ligne, le nombre d'états est souvent plus important que le nombre de commandes. A l'instar de [RI_2] proposant une décomposition du système en deux sous-systèmes possédant une matrice de commande régulière et carré, selon un choix défini au préalable pour maintenir les performances de certaines sorties au détriment d'autres, nous avons développé une approche basée sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice de commande B :

$$B = \Psi \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} \Omega^T \quad (3.79)$$

où $\Psi \in \mathcal{R}^{n \times n}$ et $\Omega \in \mathcal{R}^{p \times p}$ sont des matrices orthogonales et $\Sigma \in \mathcal{R}^{p \times p}$ une matrice diagonale régulière.

Considérer l'équation (3.79) au sein de l'inégalité (3.77) conduit à une nouvelle écriture de (3.78) :

$$u_{\delta}^F(k) = -\Omega \Sigma^{-1} \mathcal{B}_j \hat{f}_d(k) \quad (3.80)$$

où \mathcal{B}_j est la $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice \mathcal{B} tel que $\Psi^T B = \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} \Omega^T = \begin{bmatrix} \mathcal{B} \\ 0 \end{bmatrix}$ d'après (3.79).

La stabilité du système tolérant aux défauts réalisé à travers l'accommodation par le principe de compensation est étroitement liée à celle définie en l'absence de défauts dépendant directement, par exemple, de la synthèse d'une matrice de gain de commande K_{δ}^N stabilisant la paire $(A - BK^N)$. En résolvant le problème de l'accommodation, non pas par le principe de compensation mais par une adaptation adéquate du gain du contrôleur, la stabilité du régulateur est également garantie tout au long de son exploitation, même en présence de défauts. Par exemple, [Zhang et Jiang, 2002] traitent le problème de l'accommodation de défauts actionneurs en calculant un nouveau gain du contrôleur dans l'objectif de conserver les mêmes propriétés dynamiques en l'absence ou en présence de défauts se traduisant mathématiquement par une conservation des valeurs propres du système en boucle fermée. De même, [Wu et al., 2000] proposent de déterminer en ligne une matrice de gain de retour, minimisant une fonction de coût, pour établir la loi de commande linéaire quadratique d'un système en présence de défauts. Dans ces deux analyses scientifiques, les défauts d'actionneurs sont considérés comme une modification de la matrice de commande B . La garantie de la stabilité du régulateur repose sur une estimation exacte de la matrice de défauts. Au même titre que pour

l'accommodation par le principe de compensation, le module de diagnostic constitue un élément essentiel dans l'analyse de la stabilité du système tolérant aux défauts.

3.4.3 - Système non linéaire représenté sous forme d'une combinaison convexe $\mathcal{M}_{\Sigma_{LTI}}$

Dans le cadre de l'étude des systèmes linéaires stochastiques en boucle fermée, [Maybeck, 1999] et [Zhang et Jiang, 2001] considèrent les défauts capteurs ou actionneurs comme des modes de fonctionnement sous forme de multiples modèles distincts. [Maybeck, 1999] considère un banc de filtres de Kalman parallèles, synthétisés pour des défauts spécifiques pouvant survenir sur le système (*par exemple le ième coefficient de la jème colonne de B est fixé à une valeur précise en présence de défauts*). Les sorties de ces filtres sont conjuguées afin de calculer une probabilité associée à chaque défaut permettant ainsi de détecter celui-ci et de le compenser à partir de l'estimation de l'état non corrompue par les défauts. L'algorithme utilisé pour la commande et l'estimation porte l'acronyme *MMAE/MMAC* pour *Multiple Model Adaptive Estimation/ MMACControl*. De manière similaire, [Zhang et Jiang, 2001] et [Rago et al., 1998] considèrent effectivement chaque défaut comme un modèle particulier tout en commandant les systèmes décrits sous forme de systèmes stochastiques hybrides linéaires à partir de l'algorithme *IMM* développé par [Rong et al., 2002]. A chaque mode de fonctionnement, associé à des défauts précis, une loi de commande est synthétisée par un placement de pôle approprié. La sortie du régulateur correspond à une pondération des commandes de chaque régulateur à partir des probabilités des modes de fonctionnement déterminé par l'algorithme *IMM*, utile également à la détection et à la localisation des défauts. Les méthodes présentées restent limitées dans le sens où elles cherchent à détecter et isoler des défauts très spécifiques, un défaut de 40% au niveau d'un capteur est modélisé par la multiplication de la ligne C correspondante par 0,4, de même les défauts d'actionneurs seront décomposés par morceaux en fonction de l'amplitude des défauts envisagés [Kanev et Verhaegen, 2000]. Pour pallier à cette restriction, j'ai développé une nouvelle approche toujours attentif à la notion de modes de fonctionnement mais au lieu de considérer des filtres de Kalman synthétisés sur des modèles en défauts aux matrices de direction très spécifiques, j'ai établi l'algorithme *IMM* sur des filtres de Kalman découplés des défauts n'ayant pas, ainsi, de restriction sur les matrices de direction de défauts [CI_32].

Dans le cadre des systèmes tolérants aux défauts, nos actions de recherche portent, depuis peu, sur le problème de l'accommodation active par le principe de compensation appliqué aux systèmes non linéaires représentés à partir de multiples modèles linéaires. La synthèse de loi de commande en l'absence de défauts a connu et connaît encore un très grand développement de par la facilité de sa mise en oeuvre et son efficacité reconnue dans les milieux industriels. Les méthodes de synthèse de loi de commande permettant de réaliser le passage brusque et/ou modéré d'un régulateur à l'autre sont développées et analysées par [Narendra et al., 2003]. De manière générale, en regard des méthodes de commande robuste aux méthodes de commande adaptative, [Landau, 1999] expose les performances, en terme de suivi de trajectoires, des approches à base de multiples modèles comparées aux approches adaptatives lors des phases de transition. L'application complète de cette approche à un benchmark présentée par [Karimi et Landau, 2000], système de transmission flexible, illustre les excellentes performances de l'approche fondée sur les multiples modèles. Les synthèses bibliographiques de [Leith et Leithead, 1999] et [Rugh et Shamma, 2000] décrivent toute l'étendue des

méthodes concernant l'analyse et la synthèse de loi de commande par *gain-scheduling*. Ce principe a également été considéré dans le cadre de la construction des régulateurs flous à partir du concept PDC (*Parallel Distributed Compensation*) [Tanaka et Sugeno, 1992]. En l'absence de défauts, le système non linéaire est contrôlé par l'interpolation des lois de commande $U_i(t)$ issues des régulateurs locaux synthétisés autour de \aleph différents points de fonctionnement, soit :

$$U(t) = \sum_{i=1}^{\aleph} \mu_i(\sigma) U_i(t) \quad (3.81)$$

où $\mu_i(\sigma)$ représente la variable d'interpolation fonction de σ (dépendant du temps, d'un composant physique par exemple).

Concernant les systèmes non linéaires ou linéaires à paramètres variants, l'interpolation est directement fonction de la variable *gain-scheduling* décrivant le comportement du système. La vitesse de variations du *gain-scheduling* constitue un élément essentiel dont il est impératif de tenir compte dans la synthèse de la loi de commande [Lawrence et Rugh, 1995]. Par contre si cette variable évolue lentement, son influence est négligeable [Shamma et Athans, 1990]. [Rong et al., 2002] montrent combien il est important d'utiliser dans la synthèse d'une loi de commande issue de l'interpolation de la sortie des régulateurs locaux, la vitesse d'évolution temporelle de la variable, permettant de décrire le comportement dynamique d'un système non linéaire à partir d'une combinaison linéaire de multiples modèles linéaires [McLoone et Irwin, 2001]. Cette synthèse est directement issue de la modélisation des systèmes non linéaires sous forme d'interpolation de modèles linéaires développés par [Leith et Leithead, 1999].

En l'absence de connaissance exacte de la variable *gain-scheduling*, le passage d'un régulateur à un autre est généralement réalisé à partir de l'évaluation d'un critère quadratique considérant l'erreur quadratique de poursuite ainsi que de son évolution temporelle sur une fenêtre glissante [Narendra et al., 2003]. En l'absence de défauts, [Banerjee et al., 1995] considèrent un système non linéaire représenté par un ensemble de modèles linéaires associés à un ensemble de points de fonctionnement distincts. A chaque point de fonctionnement est synthétisé un contrôleur adapté. La commande globale du système est calculée à partir de la pondération de chaque sortie des régulateurs locaux :

$$U(k) = \sum_{i=1}^{\aleph} \wp_i(r_i(k)) U_i(k) \quad (3.82)$$

où la fonction de pondération $\wp_i(r_i(k))$ est construite à partir du calcul de la probabilité des modes de fonctionnement utilisant la théorie de Bayes :

$$\varphi_i(r_i(k)) = \varphi_i(k+1) = \frac{\varphi_i(k) \times \Phi_i(r_i(k))}{\sum_{h=1}^{\infty} \varphi_h(k) \times \Phi_h(r_h(k))} \text{ avec}$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(k+1) = 1 \quad (3.83)$$

où $\Phi_i(r_i(k))$ définit la fonction de densité de probabilité suivant une loi de distribution gaussienne calculée à partir du résidu issu d'un filtre de Kalman synthétisé suivant un modèle linéaire stochastique.

La fonction de probabilité constitue une estimation de la variable *gain-scheduling*, permettant d'approximer également le comportement dynamique dans les zones de transition entre les points de fonctionnement.

Notre contribution scientifique s'inscrit dans l'étude des systèmes tolérants des défauts actionneurs suivant la commande développée précédemment. Notre capacité à générer une estimation des défauts insensibles au point de fonctionnement ainsi qu'une fonction de pondération insensible aux défauts est un élément déterminant à la réalisation de l'accommodation de défauts par le principe de compensation. Dès qu'un défaut est détecté, isolé et estimé à partir d'un banc de filtres découplants, défini au paragraphe §3.3.4, la fonction de pondération φ_i , présentée en (3.83), est calculée à partir du vecteur résidu $\gamma_i(k)$ insensible aux défauts permettant ainsi d'avoir une interpolation des lois de commandes également non corrompues. En appliquant le principe de compensation en présence de défauts additifs, présenté au paragraphe §3.4.1 dans le cas linéaire, la loi de commande globale se définit sous la forme conjuguée suivante :

$$U(k) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(\gamma_i(k)) [U_i^N(k) + U_i^F(k)] \quad (3.84)$$

où $U_i^N(k)$ est la commande nominale du $i^{\text{ème}}$ contrôleur défini pour le $i^{\text{ème}}$ point de fonctionnement et $U_i^F(k)$ représente la commande additive compensant les défauts.

Conformément à la méthode développée dans le cas linéaire, chaque loi de commande additive $U_i^F(k)$ doit résoudre l'égalité suivante:

$$B_i U_i^F(k) + F_i f_d(k) = 0 \quad (3.85)$$

En supposant uniquement la présence de défauts actionneurs, la matrice de direction des défauts est équivalente à la matrice de commande, soit $B_i = F_i$. Le filtre découplant génère une estimation de l'amplitude des défauts à partir du vecteur $\Omega_i(k)$, défini à l'équation (3.57).

La méthode développée est moins restrictive que celle exploitant les algorithmes *MMAE* ou *IMM*, mais en présence de pertes complètes ou de blocage d'un actionneur, cette dernière ne permet pas de conserver les performances désirées. Lorsque l'on se réfère au premier chapitre, ce type de défaut critique requiert une reconfiguration ou restructuration du système. Par contre, un défaut de capteurs peut être traité lors de la substitution du capteur réel par le capteur informationnel.

3.4.4 - Système non linéaire représenté sous forme exacte \mathcal{M}_{NL}

Notre recherche sur le thème de l'accommodation de défauts des systèmes non linéaires s'est limitée au principe de rejet de perturbation élaboré à partir de la synthèse d'une loi de commande additive pour les systèmes non linéaires. Au même titre que le diagnostic de défauts est récemment considéré pour les systèmes non linéaires, l'accommodation aux défauts à base de modèles analytiques pour ces derniers a rarement été traitée. Certaines méthodes d'accommodation aux défauts, conçues à partir de techniques heuristiques, ont cependant été développées. Partant d'un modèle neuro/flou, l'accommodation aux défauts est généralement basée sur une commande neuro/floue adaptative stable, apte à réaliser un apprentissage en ligne de nouvelles dynamiques inconnues, occasionnées par l'occurrence d'un défaut. Les approches développées sont générées pour une application spécifique comme par exemple un système d'air conditionné [Liu et Dexter, 2001], un moteur à induction [Lopez-Toribio et Patton, 1999], un réacteur d'avion [Dia et Passino, 2001] et un bateau de transporteur [Izadi-Zamanabadi et Blanke, 1999]. On notera même que le principe de commande additive pour compenser les défauts constitue une des stratégies exploitées dans les approches à base de réseaux de neurones multicouches [Polycarpou et Vemuri, 1995].

Dans le cadre de nos activités, nous nous sommes intéressés aux lois de commande à base de méthodes analytiques. Nous avons développé une méthode d'accommodation aux défauts sur le principe de compensation, méthode pouvant être généralisée à l'ensemble des lois de commande non linéaire de type linéarisation entrée-sortie consistant à transformer un système non linéaire donné en un système linéaire, à l'aide d'un bouclage d'état et d'un changement de coordonnées sur l'état du système [Fossard et Normand-Cyrot, 1995]. En supposant le nombre de sorties au moins équivalent au nombre d'entrées, une loi de commande linéarisante et découplant exactement les entrées des sorties par retour d'état statique peut être synthétisée sous la forme :

$$U(t) = \alpha(X(t)) + \beta(X(t)) \times v(t) \quad (3.86)$$

où pour chaque commande, $\alpha(X(t))$ et $\beta(X(t))$ sont définies à partir d'un certain indice η_j de dérivée de Lie de la fonction non linéaire décrivant l'équation d'état, cet indice étant équivalent au nombre de dérivations de Lie nécessaires à l'apparition de la $j^{\text{ème}}$ commande dans l'écriture de la $j^{\text{ème}}$ sortie [Fossard et Normand-Cyrot, 1995].

Le système non linéaire en boucle fermée possède le comportement entrée-sortie linéaire suivant :

$$\forall j \in [1, 2, \dots, m] \quad y_j^{(\eta_j)}(t) = v_j(t) \quad (3.87)$$

où $y_j^{(\eta_j)}$ représente la (η_j) ème dérivée de la j ème composante de y .

Il est adjoint à ce système en boucle fermée (3.87), une seconde loi de commande pour rendre le système non linéaire en boucle fermée stable. Effectivement en raisonnant sur le modèle linéaire équivalent, une nouvelle loi de commande stabilisante peut être synthétisée de telle sorte que la dynamique de l'erreur de trajectoire réponde aux spécifications dynamiques énoncées.

Ainsi le système non linéaire avec le premier bouclage (linéarisation exacte) se décompose en m sous systèmes linéaires élémentaires en présence de défauts, dont la représentation d'état est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{\widehat{X}}(t) = A \widehat{X}(t) + Bv(t) + \tilde{F}f(t) \\ Y(t) = C \widehat{X}(t) \end{cases} \quad (3.88)$$

où $v(t)$ constitue la *nouvelle* entrée du système linéaire équivalent. La matrice \tilde{F} correspond à la matrice de direction des défauts du système linéaire équivalent, cette matrice est différente de celle définie pour les systèmes linéaires présentés au paragraphe §3.2.

L'équivalence du système non linéaire au système linéaire, précédemment défini, conduit naturellement à synthétiser une méthode d'accommodation aux défauts conçue selon le principe de rejets de perturbation par la présence d'une commande additive supplémentaire, développée en détail au paragraphe §3.4.2, soit :

$$v = v^N + v^F \quad (3.89)$$

où v^N représente la commande nominale et v^F définit une commande additive dépendant des défauts dans le but de compenser ou de rejeter leur effet.

Alors que nous sommes aptes à détecter et isoler des défauts de capteurs et d'actionneurs à partir des équations non linéaires, l'estimation de l'amplitude du défaut d'actionneur reste non accessible depuis ce module de diagnostic. En présence d'une équivalence sous forme linéaire de notre système non linéaire, nous proposons tout naturellement d'utiliser cette dernière représentation linéaire pour estimer l'amplitude du défaut actionneur, la localisation étant réalisée par le module de diagnostic.

3.4.5 - Conclusion

Le fait de considérer la redondance analytique comme un outil pour développer des capteurs informationnels peut paraître élémentaire mais dès les années 1997 [CI_18], nous

avons proposé de pallier aux défaillances des défauts de capteurs réels par des capteurs informationnels. Dans le cadre de nos travaux, l'accommodation de défauts est conçue uniquement sur le principe de rejets de perturbations afin d'annihiler l'effet des défaillances. L'originalité de nos travaux se fonde sur le fait d'étudier exclusivement des défauts d'actionneurs pour lesquels une méthode d'accommodation a pu être développée. L'accommodation aux défauts, analysée et synthétisée pour diverses représentations du procédé étudié (linéaire, non linéaire, combinaison convexe), ne garantit pas l'obtention de critères optimaux définis dans la synthèse d'une loi de commande multivariable, à l'instar d'une stratégie modifiant et adaptant le gain du régulateur présentée récemment [CI_33]. En supposant des défauts additifs, le rejet de perturbations par la synthèse d'une commande additive est concevable pour un grand nombre de procédés étudiés. Cependant en présence d'une défaillance d'un composant ou d'un élément du procédé se traduisant, par exemple, par la perte ou le blocage d'un actionneur, cette stratégie au sein des systèmes tolérants aux défauts est inadaptée. D'autres stratégies doivent être développées, synthétisées et mises en oeuvre (cf. Troisième Partie *Perspectives de recherche*).

L'application de nos travaux de recherche sur un même procédé servant habituellement de benchmark, le système des trois cuves, permet d'illustrer et de valider les méthodes développées.

3.5 - Application à un benchmark : le système des trois cuves

3.5.1 - Introduction

Nous proposons d'illustrer les performances des méthodes développées à l'aide d'un procédé pilote de laboratoire fréquemment étudié dans le domaine du diagnostic : le système des trois cuves. Le système hydraulique concerne le produit commercialisé par la société AMIRA. Il ne s'agit en aucun cas du procédé élaboré dans le cadre du projet européen COSY (Control of Complex SYstems) [Heiming et Lunze, 1999] composé de deux cuves, une troisième servant à la redondance matérielle où les régulations de niveau mises en place peuvent être réalisées à partir de différentes stratégies en présence de défauts ([Askari et al., 1999]), permettant également d'étendre les travaux de recherche aux systèmes hybrides. Nombreux sont les travaux consacrés au diagnostic de défauts du procédé hydraulique des trois cuves et je me propose de faire une synthèse bibliographique avant de présenter nos résultats.

[Koenig et al., 1997] développent une méthode de découplage semblable à celle développée par [Hou et Muller, 1994] pour détecter et isoler des défauts d'actionneurs et de composants autour d'un point de fonctionnement sans estimer l'amplitude du défaut. En supposant la connaissance exacte du modèle non linéaire du système, [Shields et Du, 2000] synthétisent un observateur dédié à une classe de systèmes non linéaires décrit sous forme bilinéaire et également sous forme polynômiale afin de détecter des fuites dans les réservoirs. Le diagnostic à base de modèles flous a également été illustré sur les trois cuves permettant de détecter et isoler des défauts sur toute la plage de fonctionnement ([Marcu et al., 1999] et [Lopez-Toribio et al., 1999]). En présence de défauts de capteurs uniquement, [Zhou et al., 2000] détermine l'amplitude du défaut à partir d'un filtre estimant les paramètres du modèle et l'état augmenté, travaux développés par [Zhou et Frank, 1999]. Cette estimation est utilisée pour développer un système tolérant aux défauts de capteurs. L'illustration sur le système réel reste limitée à de faibles variations de consigne, de plus l'estimation du second défaut de

capteurs conduit à un système tolérant non précis. Beaucoup plus récemment, [Akhenak et al., 2003] estiment, en présence d'entrées inconnues, l'état d'un système non linéaire décrit à partir de plusieurs points de fonctionnement à partir de l'interpolation de multiples observateurs découplants. L'illustration est effectuée à l'aide du système des trois cuves en supposant comme entrée inconnue un bruit blanc. L'extension des entrées inconnues à des défauts n'est pas aussi immédiate étant donné que la matrice de direction des entrées inconnues doit être identique. Cette hypothèse de travail est semblable à celle définie au paragraphe §3.3.4 permettant ainsi d'assurer la stabilité de l'estimation quel que soit le point de fonctionnement.

Dans cette partie du mémoire consacrée à l'illustration de nos travaux, seuls les résultats des méthodes développées en présence de défauts d'actionneurs et de capteurs appliqués au système des trois cuves sont présentés, le lecteur peut consulter nos travaux de recherche consacrés au diagnostic et accommodation de défauts de composants en se reportant à nos contributions scientifiques [CI_30] et [CI_20]. Il faut noter que le diagnostic de défauts de composants dévolu au système des trois cuves est rarement étudié en même temps que les défauts de capteurs. La raison est simple : en supposant la génération de résidus issus de la différence entre la mesure des niveaux de liquide et leur estimation, les signatures de défauts sont identiques. [El Bahir et Kinnaert, 1998] ont abordé ce type de scénario. Ces derniers constatent que le résidu conçu pour être sensible à un défaut de capteur est corrompu par l'occurrence d'une fuite ou d'un encrassement brutal dans les tuyaux. L'auteur remet en cause la méthode qu'il a développé sans s'attacher à comprendre le système. [Koscielny, 1999] traite le problème du diagnostic de défauts de capteurs, d'actionneurs et de composants en supposant la génération de six résidus suivant un modèle non linéaire exact. L'évolution dynamique des résidus en présence de défauts est étudiée à partir de la logique floue permettant ainsi de différencier une fuite d'un encrassement, celle-ci possédant un vecteur de signatures identiques mais de signe différent.

Le procédé hydraulique que nous avons étudié comporte un intérêt indéniable dans le fait de sa parfaite description dynamique. Un modèle non linéaire du système, valable uniquement lors d'écoulement laminaire, permet de simuler sur toute la plage de fonctionnement l'évolution dynamique des niveaux de liquide, ainsi que les débits. La parfaite adéquation entre la plate-forme de simulation et le procédé hydraulique réel nous a conduit, après avoir développé et programmé des algorithmes de diagnostic et d'accommodation de défauts sur le procédé réel ([RI_3] et [CI_24]), à considérer uniquement, par souci d'efficacité, l'illustration de nos travaux de recherche à partir de la plate-forme de simulation permettant ainsi de réaliser de manière non destructive des défauts de capteurs et d'actionneurs mais également, non présenté dans ce mémoire, des défauts de composants tels que des fuites et des encrassements dans les conduites hydrauliques.

3.5.2 - Description et modèle mathématique du système

Le système utilisé pour illustrer les performances des méthodes développées est un benchmark fréquemment utilisé dans le domaine du diagnostic : un système hydraulique composée de trois cuves en série de section identique S . Ces cuves sont connectées par des tuyaux de section S_p avec un coefficient d'écoulement $\mu_{13} = \mu_{32}$. Deux pompes alimentent les cuves 1 et 2. Le débit, noté Q_{20} , situé à la base de la cuve 2 constitue le débit d'évacuation de l'installation avec un coefficient d'écoulement noté μ_{20} . Les débits de sortie Q_1 et Q_2

fournis par chaque pompe ainsi que la hauteur de liquide H_ℓ dans chaque cuve ℓ , $\ell = 1, 2, 3$ sont mesurés.

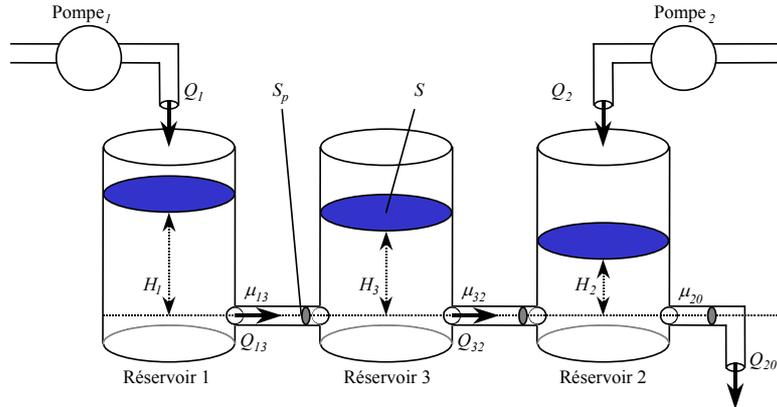


Figure 3.1 : Le système des trois cuves.

Les propriétés de conservation de la matière conduisent à la définition des trois équations dynamiques :

$$S \frac{d}{dt} H_1(t) = Q_1(t) - Q_{13}(t) \quad (3.90)$$

$$S \frac{d}{dt} H_2(t) = Q_2(t) + Q_{32}(t) - Q_{20}(t) \quad (3.91)$$

$$S \frac{d}{dt} H_3(t) = Q_{13}(t) - Q_{32}(t) \quad (3.92)$$

où $Q_{ij}(t)$ représente le débit de liquide de la $i^{\text{ème}}$ cuve vers la $j^{\text{ème}}$ cuve ($\forall i \neq j$, $i, j = 1, 2, 3$) s'exprimant selon la loi de Torricelli par :

$$Q_{ij}(t) = \mu_{ij} \times S_p \times \text{sign}(H_i(t) - H_j(t)) \times \sqrt{2g|H_i(t) - H_j(t)|} \quad (3.93)$$

Le débit Q_{20} en sortie d'installation, en supposant un écoulement laminaire sur toute la plage de fonctionnement, est fonction de la hauteur de liquide selon l'équation suivante :

$$Q_{20}(t) = \mu_{20} \times S_p \times \sqrt{2gH_2(t)} \quad (3.94)$$

Sans limiter notre étude, le système est considéré dans une unique configuration vérifiant les inégalités suivantes : $H_1(t) > H_3(t) > H_2(t)$. Les débits inter-cuves ne peuvent être que positifs. Dans ce cadre, le système est étudié en boucle fermée. Indépendamment du modèle considéré, une loi de commande permettant aux sorties du système de suivre les entrées de référence pré-définies est synthétisée de manière à assurer les contraintes classiques de la boucle fermée : la précision, la stabilité et la rapidité. Les sorties à asservir sont les hauteurs de

liquide H_1 et H_2 agissant sur les deux pompes.

3.5.3 - Résultats et Commentaires

Le système des trois réservoirs constitue un procédé pilote à partir duquel il est possible de mettre en oeuvre des défauts non destructifs de composants, tels que l'encrassement ou la fuite des réservoirs et de connections réalisées par l'intermédiaire de vannes, d'actionneurs et/ou de capteurs par une simple modification informatique du signal entrant ou sortant de la carte d'acquisition émulant ainsi une réduction notable des performances d'une pompe ou bien de l'occurrence d'un biais sur le capteur. Par la suite, nous présentons succinctement les résultats des systèmes tolérants en présence de défauts de capteurs et d'actionneurs présents au sein du système des trois réservoirs. Différents types de défauts d'actionneur et de capteur ont été simulés (cf. Tableau 3.1). Dans un premier temps, les performances du système tolérant aux défauts d'actionneurs autour d'un point de fonctionnement sont présentées dans un contexte déterministe. Nous considérons ensuite le même type de défauts mais en utilisant l'ensemble de la plage de fonctionnement du système traduit sous forme d'une combinaison convexe dans un contexte stochastique. L'accommodation aux défauts de capteurs quant à lui est illustrée sur la base d'une connaissance exacte du modèle non linéaire.

3.5.3.1 - Etude autour d'un point de fonctionnement en présence de défauts d'actionneurs.

Le procédé est étudié autour d'un point de fonctionnement avec des variations de niveau de l'ordre de 10% dans un contexte déterministe. Nous présentons à la figure 3.3 l'évolution des niveaux ainsi que les résultats de la commande nominale appliquée au système sans défaut sur une durée de 3000 secondes, la période d'échantillonnage est fixée à 1 seconde. La commande nominale, associée à un intégrateur, est synthétisée par un simple placement de pôles par retour d'état permettant de calculer une matrice de gain de retour K sur la base d'un modèle issu de la linéarisation des équations de bilan du système autour des points de fonctionnement considérés. La présence de l'intégrateur dans la loi de commande permet d'annuler l'erreur statique.

Dans l'illustration proposée, une réduction de 80% de l'efficacité de la première pompe est réalisée affectant le débit Q_1 . D'après la description des défauts, présentée à l'équation 3.40, la commande appliquée à l'actionneur correspond à la commande nominale multipliée par un coefficient $\beta = 0,8$. Ce défaut apparaît brusquement à l'instant 1000 secondes. Le défaut d'actionneur agit sur le système comme une perturbation sur le niveau de liquide du réservoir directement concerné par la pompe en défaut (figure 3.4). L'occurrence de ce défaut au sein de ce système couplé influence également le niveau de liquide dans les autres réservoirs (figure 3.5).

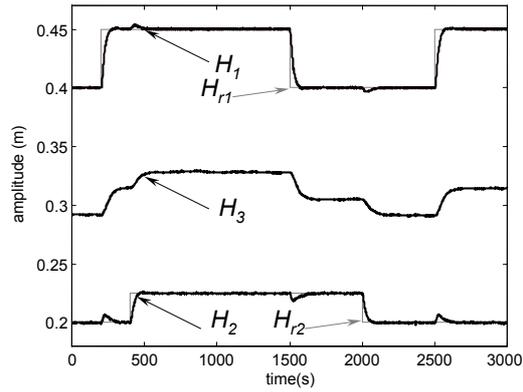


Figure 3.2 : Evolution dynamique des niveaux en réponse à des variations des entrées de référence en l'absence de défauts.

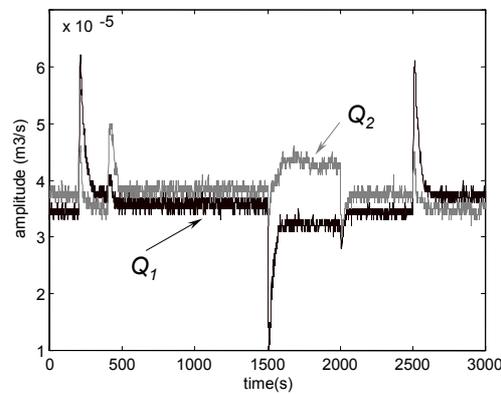


Figure 3.3 : Evolution dynamique de la commande nominale en réponse à des variations des entrées de référence en l'absence de défauts.

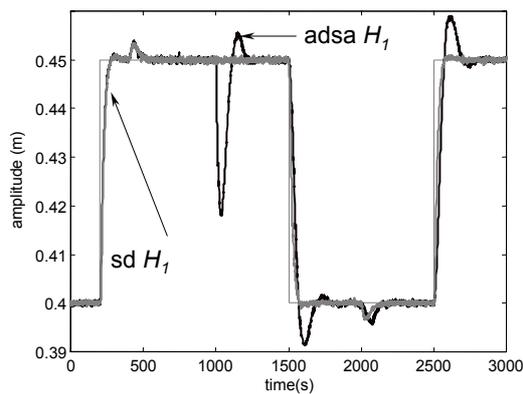


Figure 3.4 : Evolution dynamique du niveau H_1 sans défaut (sd) et avec défaut sans accommodation ($asda$).

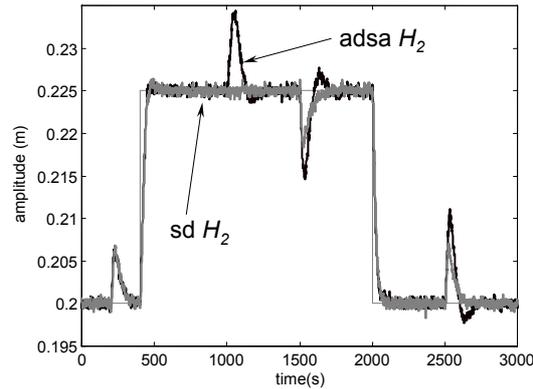


Figure 3.5 : Evolution dynamique du niveau H₂ sans défaut (*sd*) et avec défaut sans accommodation (*asda*).

Dans le cadre de la mise en oeuvre d'un système tolérant aux défauts, développé aux paragraphes §3.3.2 et §3.4.2, le modèle utilisé pour la synthèse de la loi de commande est exploité pour synthétiser le banc d'observateurs à entrées inconnues permettant ainsi de détecter, isoler et estimer les défaut d'actionneurs ou de capteurs. Sous l'hypothèse que trois défauts de capteurs et que deux défauts d'actionneurs peuvent être présents, un banc de cinq observateurs est synthétisé, chacun d'entre eux étant sensible à un unique défaut. La figure 3.6 présente les cinq résidus générés par le banc d'observateurs en présence du défaut d'actionneurs. L'observateur conçu pour générer un résidu insensible à la présence de défauts sur la première pompe remplit sa mission. Le résidu associé n'est certes pas totalement proche de zéro, les variations de 10% des entrées de référence amenant des erreurs de modélisation négligeables à l'égard de l'amplitude du défaut. L'évaluation des résidus par un simple test de Page-Hinkley conduit à la génération des symptômes binaires présentés à la figure 3.6. L'occurrence du défaut peut être directement isolé et ainsi le processus d'accommodation associé à la première pompe est enclenché. La figure 3.7 illustre l'estimation de l'amplitude du défaut, déterminé par l'observateur insensible à la présence du défaut, comparativement au défaut réel, montrant la précision de l'estimation.

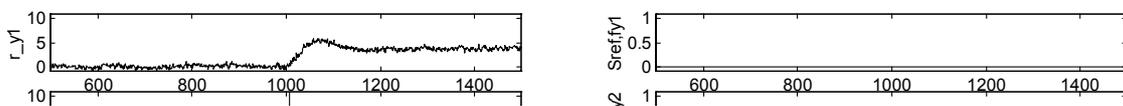


Figure 3.6 : Résidus et Symptômes en présence de défauts

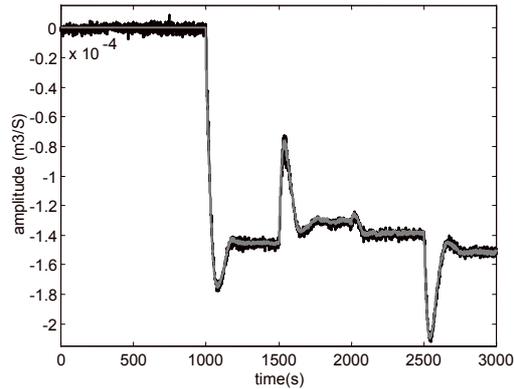


Figure 3.7 : Défaut réel et son estimation.

En présence du défaut sur la première pompe, nous avons remarqué une perte dans les performances dynamiques du procédé qui réagit plus lentement qu'à la normale. Cette dégradation des performances est perceptible suite à l'apparition du défaut ou bien lors d'un changement de consigne. En revanche, à partir de l'estimation de l'amplitude du défaut, la compensation du défaut peut s'effectuer par le calcul d'une loi de commande venant s'ajouter à la loi de commande nominale, permettant à la sortie d'atteindre sa valeur de référence plus rapidement, mais également de rejoindre le comportement dynamique nominal du système en l'absence de défaut. Les figures 3.8 et 3.9 illustrent nos précédents propos, il est à noter qu'un retard à la détection de 16s, inhérent au module de diagnostic, ne compromet pas l'accommodation.

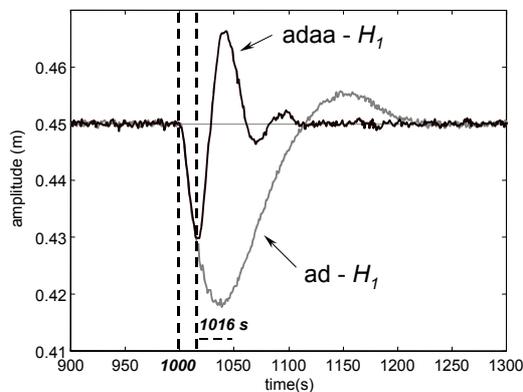


Figure 3.8 : Agrandissement à l'instant d'occurrence du défaut de l'évolution dynamique du niveau dans le premier réservoir avec (*adaa*) ou sans (*ad*) système tolérant aux défauts.

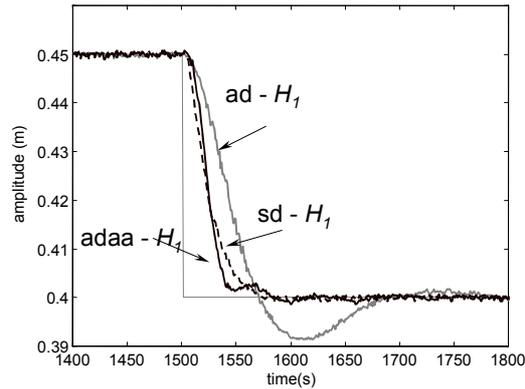


Figure 3.9 : Agrandissement à l’instant d’occurrence du défaut de l’évolution dynamique du niveau dans le premier réservoir avec (*adaa*) ou sans système tolérant aux défauts en présence (*ad*) ou en l’absence de défaut (*sd*)

Cette illustration des performances des travaux de recherche, développés ici, est brièvement exposée, mais des résultats en présence de défauts de capteurs et de d’actionneurs sont présentés et commentés avec plus de détails et de précision dans l’article [RI_5] disponible dans la partie *Publications significatives*.

3.5.3.2 - Etude en présence d’une représentation sous forme d’une combinaison convexe.

Nous considérons l’exploitation du système autour de trois points de fonctionnement dans un contexte stochastique. A chaque point de fonctionnement, une loi de commande linéaire quadratique, associée à un intégrateur, est synthétisée générant après le calcul de la minimisation d’une fonction coût une matrice de gain. Conformément aux méthodes classiques proposées et présentées au paragraphe §3.4.3, une loi de commande globale est établie par l’interpolation des lois de commande synthétisées à chaque point de fonctionnement. L’interpolation est effectuée à partir du calcul d’une fonction de pondération établie sur la base des résidus issus des différents filtres de Kalman. La figure 3.10 illustre l’évolution dynamique des niveaux autour des trois points de fonctionnement.

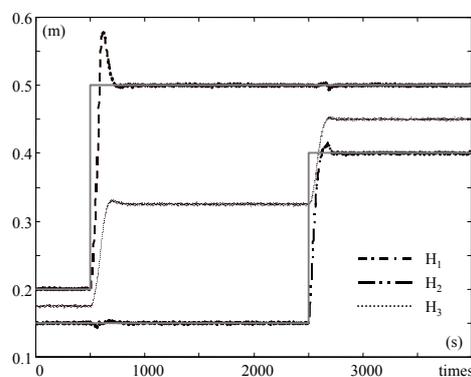


Figure 3.10 : Evolution dynamique des niveaux en réponse à des variations des entrées de

référence en l'absence de défauts.

Pour illustrer les performances du système tolérant développé, nous supposons également l'occurrence d'un défaut d'actionneurs, de la même amplitude que précédemment, présent au niveau de la première pompe à l'instant 550 secondes c'est-à-dire lors de la commutation d'un point de fonctionnement à un autre. En l'absence de système tolérant aux défauts, la dynamique du procédé en boucle fermée reste compromise (figure 3.11) parce que le contrôleur sélectionné n'est pas celui correspondant au point de fonctionnement, l'interpolation des lois de commande est corrompue par la présence du défaut au sein des filtres de Kalman.

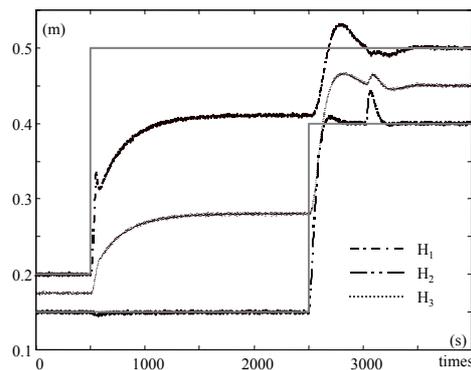


Figure 3.11 : Evolution dynamique des niveaux en réponse à des variations des entrées de référence en présence d'un défaut sur la première pompe.

En revanche, le banc de filtres découplant des défauts, présentés au paragraphe §3.3.4, permet de générer des modes de probabilités insensibles au défaut. L'évolution dynamique des probabilités est présentée à la figure 3.12 : en présence de défauts, l'interpolation des lois de commande est appropriée et similaire à celle considérée en l'absence de défaillances.

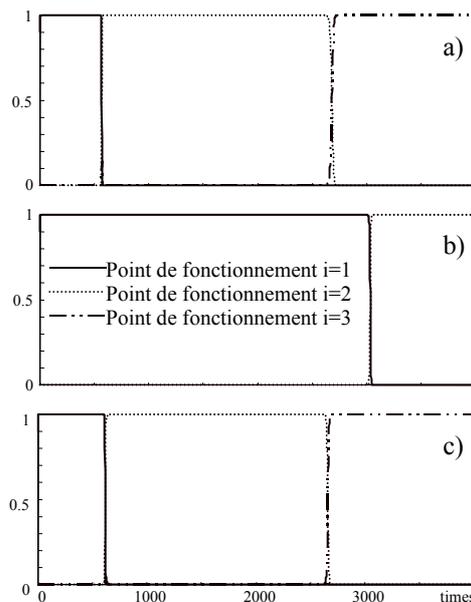


Figure 3.12 : Evolution dynamique des probabilités de fonctionnement $\varphi_i(r_i(k))$ en

l'absence (a) et en présence (b) de défauts ainsi que $\varphi_i(\gamma_i(k))$ en présence (c) de défauts.

La compensation du défaut à partir d'une commande additive établie sur la base de l'estimation du défaut permet de conserver une dynamique similaire à celle en l'absence de défauts (voir figure 3.13). Comparativement à l'exemple précédent, le système tolérant est actif dès le début de la simulation. Nous aurions pu effectivement rendre le système tolérant actif uniquement lors de la détection et l'isolation des défauts, et ceci aurait été établi directement à partir des résidus construits pour être sensible aux différents défauts.

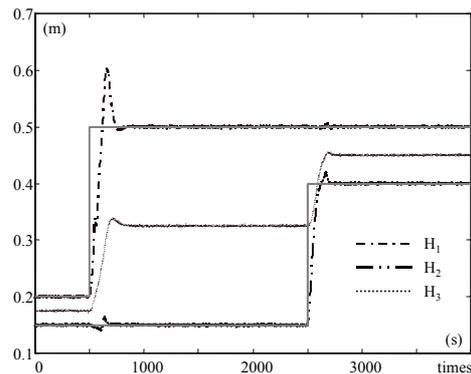


Figure 3.13 : Evolution dynamique des niveaux en réponse à des variations des entrées de référence en présence d'un défaut sur la première pompe intégrant un système tolérant aux défauts

Ces résultats, dont leur intégralité, sont présentés et commentés avec plus de précision dans l'article [CI_41] accessible à l'adresse indiquée dans la partie **Organisation du document**. Ces activités de recherche sont récentes, l'étude de stabilité reste par exemple un élément à approfondir afin de valider dans son ensemble le développement de la stratégie d'accommodation.

3.5.3.3 - Etude en supposant connu le modèle non linéaire exact

Dans cette étude, la synthèse d'une loi de commande non linéaire est établie à partir d'un retour d'état linéarisant découplant les entrées et les sorties afin de suivre les entrées de référence sur l'ensemble de la plage de fonctionnement du système étudié. La figure suivante présente l'évolution dynamique des niveaux de liquide en l'absence de défauts.

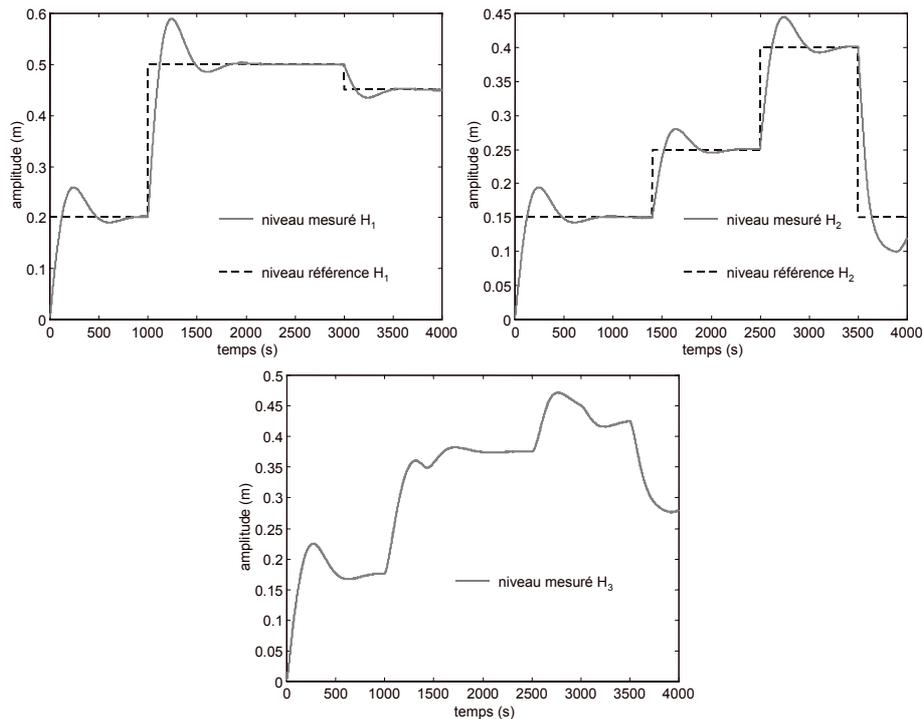


Figure 3.14 : Evolution dynamique des niveaux en réponse à des variations des entrées de référence en l'absence de défauts.

Nous proposons de présenter les résultats de notre recherche aux systèmes tolérants aux défauts en considérant l'occurrence de biais au niveau du capteur mesurant le niveau dans la première cuve à l'instant 2000s. En l'absence de détection, d'isolation et d'accommodation de défauts, la commande nominale réagit face à ce défaut, et tente d'annuler l'écart entre la mesure erronée et sa valeur de référence (voir figure 3.15). Cette variation de la commande modifie ainsi la valeur des débits au niveau des pompes qui augmentent d'une valeur opposée à l'amplitude du défaut. Le parfait découplage de la loi de commande au sein du système non linéaire conduit à une complète insensibilité du niveau de liquide de la seconde cuve en présence d'un défaut dans la première cuve. L'évolution dynamique du niveau de liquide dans la seconde cuve est semblable à celle en l'absence de défauts.

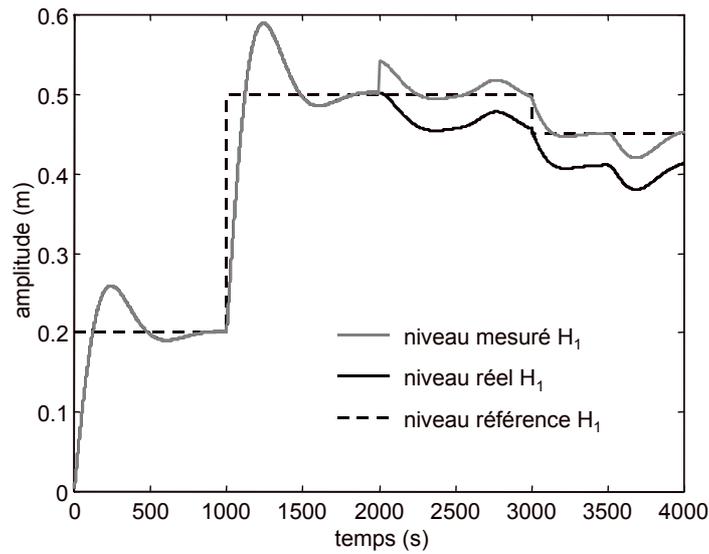


Figure 3.15 : Evolution dynamique du niveau H_1 en réponse à des variations de l'entrée de référence en présence du défaut de capteur.

En revanche, l'exploitation d'un banc d'observateurs découplant les défauts de capteurs ou d'actionneurs par la principe de dérivation, dont la synthèse est présentée au paragraphe 3.3.3 permet de détecter et d'isoler le défaut. L'amplitude est directement estimée au travers la dernière composante du vecteur d'état estimé par l'observateur synthétisé pour être insensible au défaut. L'accommodation en présence d'un défaut de capteurs se limite à un simple passage brusque d'une information erronée provenant d'un capteur réel à une information saine provenant en quelque sorte d'un capteur informationnel. Le défaut de capteur se trouve ainsi complètement masqué et la dynamique du système en boucle fermée en mode dégradé redevient semblable à celle en l'absence de défauts. La figure 3.16 illustre nos propos.

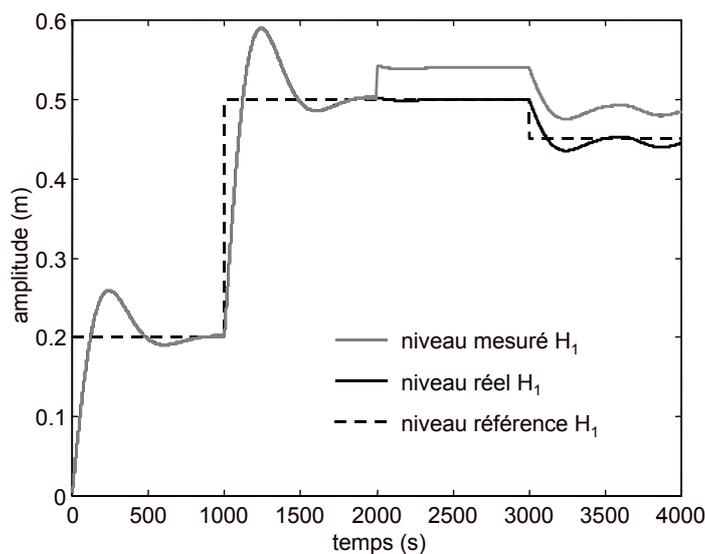


Figure 3.16 : Evolution dynamique du niveau H_1 en réponse à des variations de l'entrée de référence en présence du défaut de capteur intégrant un système tolérant aux défauts

3.5.4 - Conclusion

L'illustration des systèmes tolérants aux défauts à partir d'une plate forme de simulation servant fréquemment de benchmark nous a permis de montrer les performances des méthodes développées uniquement en présence de variations brusques au niveau des capteurs et des actionneurs. Les défauts de type dérive lente ont également été étudiés, et les systèmes tolérants aux défauts ont donné entière satisfaction, seul le retard à la détection inhérent à ce type de défaut doit être signalé. En revanche, alors que la perte complète d'un capteur peut trouver une solution dans les méthodes développées, la perte complète d'un actionneur ne peut être traité convenablement par les systèmes tolérants développés. Les caractéristiques du système nous permettaient de considérer la détection, l'isolation, l'estimation et l'accommodation de deux défauts simultanés au vue de la présence de trois sorties mesurées. Nous avons préféré traiter séparément les défauts de capteurs et d'actionneurs par souci de clarté. Il est important de préciser que l'information issue du diagnostic au sein des systèmes tolérants aux défauts est accessible à l'opérateur, lui permettant ainsi d'intervenir sur le procédé fonctionnant en mode dégradé à des fins de supervision.

3.6 - Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le diagnostic de défauts par le principe de découplage exact exclusivement réalisé à base de modèles mathématiques, par redondance analytique des systèmes linéaires en présence d'incertitudes structurées, assimilant les défauts à des entrées inconnues. Cette approche est étendue aux systèmes non linéaires exacts ou représentés par une combinaison convexe en présence de défauts nous permettant d'envisager d'étudier le diagnostic des systèmes hybrides. L'analyse et la synthèse de méthodes d'accommodation de défauts sur le principe de rejets de perturbations ont été présentées uniquement en présence de défauts non critiques pour diverses représentations du procédé étudié (linéaire, non linéaire, combinaison convexe). En présence de défauts critiques, d'autres stratégies doivent être développées, synthétisées et mises en oeuvre (cf. Troisième Partie *Perspectives de recherche*). Sous l'hypothèse de posséder un modèle analytique représentant le comportement dynamique du système, le diagnostic de défauts par identification paramétrique ([Bachir et al., 2002]) sur des systèmes de dimension raisonnable devra être envisagé permettant ainsi de modifier et d'adapter le gain du régulateur en fonction des performances à atteindre sur la base des paramètres du procédé étudié.

Au mettre titre que nous avons réussi à adapter et à mettre en oeuvre des méthodes de détection et d'isolation de défauts au sein de procédés industriels complexes, un de mes objectifs consiste à développer et à implanter un système tolérant aux défauts également au sein de processus industriels, dans un premier temps, par exemple en présence de défauts de capteur, pour ensuite, envisager d'adapter et d'exploiter celui-ci sur l'ensemble de l'outil de production à disposition.

Troisième Partie :
Perspectives de recherche

Dans ce mémoire, j'ai synthétisé mes travaux de recherche et développé certaines de mes activités réalisées depuis ma nomination en tant que Maître de Conférences. L'analyse de mes activités de recherche passées me conduit, avec autant de conviction, à poursuivre dans le domaine du diagnostic de défauts des procédés, représentés sous forme d'une combinaison convexe Λ de modèles élémentaires établie à partir d'une fonction de pondération \wp . La synthèse de méthodes de diagnostic robuste aux imperfections d'approximation, inhérentes à la représentation, constitue une prospective à court terme initiée dans le cadre des travaux de thèse de Mickaël Rodrigues ([**TH_Rodrigues**]). En considérant des erreurs sous forme d'incertitudes structurées, nous proposons de générer un unique observateur muni d'un gain adaptatif, issu de l'interpolation de matrices découplant les défauts selon la variable de pondération \wp , par opposition à [**Chen et Patton, 1999**], qui suggère, à la page 151 de son ouvrage, de synthétiser un gain d'observateur unique, capable d'être découplé des défauts et des erreurs de modélisation provenant des hypothèses de représentation, sous forme d'interpolation de modèles élémentaires. Cette recherche fondamentale contribuera à résoudre le problème du diagnostic de défauts lors de la transition d'un modèle à l'autre avec l'occurrence simultanée d'un défaut. L'analyse et la synthèse de cet observateur seront accompagnées, en toute rigueur, d'une étude de stabilité. Le problème à résoudre réside dans l'obtention d'une solution unique vérifiant des inégalités en présence de bilinéarité matricielle entre les défauts et la matrice de gain de l'observateur. Dans le cadre des systèmes représentés à partir de multiples modèles, une prospective de recherche ambitieuse est envisagée en terme de travaux à réaliser. Effectivement, l'approche, qui consiste à résoudre le problème du diagnostic de défauts à base de modèles dédiés aux systèmes représentés sous forme d'une combinaison convexe de modèles élémentaires, permet d'être étendue à d'autres procédés. Cette manière de représenter le comportement dynamique des procédés permet de décrire le fonctionnement de classes variées de processus et sont aptes à prendre en compte de larges conditions opératoires. Ainsi, le diagnostic de défauts peut être étudié et envisagé pour un grand nombre de systèmes. Effectivement, s'il existe une évolution de la fonction de pondération connue ou mesurable ρ fonction de l'état du système, des entrées ou d'un signal exogène, alors, le système se décrit selon la représentation d'un système Linéaire à Paramètre Variant ([**Stiwell et Rugh, 1999**]) ou sous forme d'un modèle flou [**Lee et al., 2001**]). De même, sans considérer obligatoirement une étape de linéarisation, il peut être envisagé d'élaborer pour certain système non linéaire une transformation, afin de cacher les non linéarités en incluant une variable de *gain scheduling* ρ . Le système non linéaire se définit alors selon une description nommée quasi-LPV [**Rugh et Shamma, 2000**]. L'état de l'art de [**Leith et Leithead, 2000**], consacré aux méthodes de commande par l'ordonnancement d'un gain, permet au lecteur intéressé, de mieux se rendre compte du nombre important de systèmes industriels contrôlés par ce type de commande stable et performante, pour lesquels le diagnostic, ainsi que la tolérance aux défauts, sont très rarement considérés. Parmi l'étendue des procédés à étudier, la présence de discontinuités au niveau de la fonction de pondération conduit à s'intéresser directement à la résolution du problème de diagnostic de défauts et/ou défaillances au sein de systèmes dont le comportement dynamique se traduit par une commutation brusque d'une représentation à une autre, avec non seulement un changement des valeurs de paramètres mais également un changement de dimensions. Les récents travaux de

[Rong Li et al., 1999a], [Rong Li et al., 1999b] et [Rong Li et Zhang, 2000] ébauchent les prémices de l'estimation d'état de tel système. Cette évolution brusque concerne également le passage d'une représentation sous forme d'équations dynamiques continues à une autre, sous forme d'éléments discrets, nous permettant d'envisager d'étendre le champ de nos activités à un axe de recherche très actif dans le domaine de l'identification, modélisation, et contrôle : les systèmes hybrides. Les sessions organisées au dernier congrès portant sur la définition et l'analyse des systèmes hybrides qui se sont déroulées lors d'un Workshop IFAC du 16 au 18 juin 2003 à Saint-Malo, nous indiquent que le diagnostic reste à développer au sein de ces systèmes particuliers. Les récentes études consacrées à l'analyse de la stabilité et à la synthèse de loi de commande, par exemple par nos collègues du CRAN ([Daafouz et al., 2002a] et [Daafouz et al., 2002a]), constituent une voie de recherche intéressante afin d'assurer la stabilité du système de diagnostic en présence de défauts ou défaillances sans omettre également de s'attacher aux travaux à l'étude de stabilité des contrôleurs flous au sein de la communauté française de nos collègues du LAMIH (Université de Valenciennes et Cambrésis-Hainaut) [Vermeiren, 1998].

L'intérêt que nous portons aux systèmes hybrides est également étroitement lié à notre volonté de poursuivre nos travaux dans le domaine des systèmes tolérants aux défauts en présence de défauts critiques, par exemple la synthèse de stratégies de *reconfiguration* ou de *restructuration* requièrent des commutations brutales d'un système en défauts à un système en mode dégradé. Rappelons, en se référant au préambule dans la partie **Description de nos travaux de recherche**, que si le problème $\langle \gamma, s_a, \theta_a, U \rangle$ n'a pas de solution, la stratégie dite de *reconfiguration* en propose une. Le système reconfiguré doit résoudre un nouveau problème, remplaçant $\langle \gamma, s_a, \theta_a, U \rangle$ par $\langle \gamma, \sigma, \beta, V \rangle$ où certes, l'objectif reste le même, mais suivant une structure du procédé, des paramètres et une loi de commande différents. La partie défaillante est parfaitement définie dès que les défauts ont été détectés et localisés et devient inopérante dans le cadre de la nouvelle commande mise en place. Cette stratégie requiert l'existence d'une redondance structurelle au sein du procédé considéré, ce dernier ne se limitant pas à un simple processus. Sa mise en place repose sur l'existence d'une structuration des composants du procédé ainsi que d'une organisation des services sous forme de modes opératoires [Gehin et Staroswiecki, 1999]. En l'absence de solutions pour la *reconfiguration*, la mise en oeuvre d'une stratégie dite de *restructuration* peut être envisagée. Cette dernière consiste en la modification de l'objectif nominal γ vers un objectif en mode dégradé γ_0 parmi l'ensemble \mathcal{O} des objectifs admissibles par le procédé exploité. De part la structure même d'un procédé, la performance globale de ce dernier peut être atteinte à partir de la contribution des performances locales de chaque sous système le composant. Ainsi, dans une stratégie de *restructuration*, des outils mathématiques, telle l'optimisation convexe devra être envisagée afin de déterminer, au vue des nouvelles performances globales, les performances locales des sous systèmes en adéquation avec les défaillances présentes. La restructuration se «résume» à un problème de prise de décision consistant à trouver l'objectif $\gamma_0 \in \mathcal{O}$, une commande admissible V associée à partir d'une structure s et des paramètres adéquats θ de telle sorte que $\langle \gamma_0, s, \theta, V \rangle$ admette une solution, les propriétés de stabilité et de contrôlabilité devant être conservées. Pour mettre en place de telles stratégies, il est possible d'envisager une modélisation du système en situation de défaillances sous forme d'un système hybride passant brusquement d'un mode à l'autre. En l'absence de défauts, le système complexe pourra être

exploité dans son intégralité. En présence de défauts, le système complexe sera considéré de manière réduite selon une structure s et des paramètres adéquats θ . La définition et la synthèse d'une loi de commande ne sauraient s'affranchir de la théorie du contrôle des systèmes hybrides permettant d'effectuer la commutation d'une loi de commande ou d'un mode de régulation différent, par exemple, d'une commande LQR à une simple régulation tout ou rien permettant de mettre en état de sécurité le système exploité. Pour résoudre le problème de la *restructuration*, la mutualisation des compétences devrait permettre de générer des solutions *ad hoc* dans un premier temps, pour ensuite tendre vers un formalisme global cohérent, compréhensible par un ensemble de chercheurs. Par exemple, le développement de la tolérance aux fautes consacré au robot a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, portant sur la restructuration d'un tel système en présence de pertes complètes d'un moteur au sein d'une articulation, nommé système sous-actionné. Le système tolérant aux défaillances développé permet ainsi de poursuivre les tâches confiées au robot. Cet exemple, certes spécifique à la robotique, permet de nous sensibiliser également à l'enjeu économique inhérent au développement des systèmes tolérants aux défauts.

Une difficulté liée à la *reconfiguration* ainsi qu'à la *restructuration* est de déterminer parmi les solutions envisageables l'optimale en fonction de la gravité du défaut mais également en fonction des contraintes de production et des opérations de maintenance. Par exemple, la perte d'un capteur au sein d'un système d'asservissement muni d'une double redondance matérielle, doit être tout simplement résolue par une simple commutation sur le second capteur redondant ou bien par la prise d'information issue d'un capteur informationnel sachant que ce capteur (un pyromètre par exemple) n'a pas été étalonné depuis dix mille heures. Ainsi, sous l'hypothèse d'un diagnostic de défauts à base de modèles analytiques, l'isolation des éléments défaillants, établie classiquement sur la base d'une matrice de signatures binaires, sera confortée en prenant en compte au niveau du modèle analytique les actions de maintenance à travers un modèle probabiliste [Weber et Jouffe, 2003]. L'intégration de diverses connaissances dans une stratégie de diagnostic ne peut pas être considérée comme un travail de recherche innovant ([CI_13] et [Iserman, 1994]) cependant, l'intérêt d'agréger des informations issues des modèles analytiques et probabilistes, réside dans le fait de disposer de modèles précis au sens de la dynamique des dégradations, permettant de réduire les fausses alarmes et les non-détections dans la localisation des défauts. Plus particulièrement, [Bonivento et al., 2003b] traitent du problème de la robustesse de la prise de décision en agrégeant des connaissances issues du domaine de la sûreté de fonctionnement. Des indices de fiabilité de fausses alarmes et de non-détections caractérisant les performances des méthodes d'évaluation des résidus, affectent les symptômes. De même, à chaque type de défauts est associé un indice de fiabilité sur la nature même des composants du système, par exemple au sein d'un échangeur thermique : une pompe électrique est moins fiable qu'une résistance chauffante. L'approche proposée tient compte également du couplage des défauts, un indice de fiabilité associant le défaut q au défaut z est éventuellement considéré sur la base de l'analyse de la propagation des défauts. La matrice de diagnostic, constituée d'éléments binaires, se trouve transformée en une matrice statistique des symptômes où chaque élément représente la fiabilité d'occurrence du $q^{\text{ème}}$ défaut en présence de l'évaluation positive du $j^{\text{ème}}$ résidu. Cette matrice statistique des symptômes constitue une excellente source d'informations sur la fiabilité des composants et des outils de diagnostic. Cependant, la détermination des valeurs numériques affectant les indices de fiabilité constitue la clef de l'approche considérée et repose essentiellement sur une

évaluation heuristique de certaines constantes. L'agrégation de cette matrice statistique des symptômes avec les résidus pour effectuer une prise de décision en ligne reste une étape à développer. Les connaissances issues du domaine de la sûreté de fonctionnement représentent une excellente source d'informations utiles à la supervision des systèmes tolérants aux défauts. Dans le cadre des systèmes en défauts décrits sous forme de modèles markoviens, l'auteur des articles ([Wu, 2001a] et [Wu, 2001b]) a mis récemment en évidence l'intérêt que nous aurions à exploiter les informations issues des outils de la sûreté de fonctionnement pour fiabiliser les performances des systèmes tolérants aux défauts. En supposant que des propositions de solutions sous forme de scénarios de restructuration existent, la prise de décision constitue le point essentiel à résoudre, afin de déterminer la stratégie de reconfiguration ou de restructuration optimale. Au vue de la dépendance des défauts, des risques issus des multiples sources d'incertitudes et des temps de réponse des ressources matérielles mises en jeu, cette détermination ne s'avère pas être élémentaire. Cette mutualisation des informations issues de différents domaines de recherche constitue une prospective de recherche très intéressante contribuant à la fiabilité et à la supervision des systèmes tolérants aux défauts [Wu et Patton, 2003]. Lorsque les objectifs de la *reconfiguration* ainsi qu'à la *restructuration* seront atteints, le diagnostic devra également à son tour s'accommoder à la nouvelle structure pour pouvoir remplir son rôle de manière optimale.

Les perspectives de recherche, précédemment énoncées, concernent le diagnostic de défauts/défaillances uniquement fondé sur une approche à base de modèles analytiques sous forme de représentation d'état. Les résultats pratiques issus d'une recherche appliquée nous ont sensibilisé quand à l'opportunité de considérer, non pas des modèles énergétiques classiques de la physique, mais une image de ces modèles à travers un modèle, faisant intervenir l'énergie des signaux d'entrée, de sortie et de perturbations ([TH_Pezzin]). Les récents résultats issus du diagnostic de défauts à l'aide de Bond Graph appliqué à un moteur à courant continu ([MS_Gonzales-Contreras]) nous ont permis d'évaluer toute l'importance d'avoir à considérer le diagnostic autrement qu'à travers de modèles analytiques ou heuristiques mais plus par une caractérisation des phénomènes d'échanges de puissance et d'énergie. Un investissement intellectuel doit cependant être effectué pour pouvoir traiter de manière plus approfondie cet axe de recherche.

Par ailleurs, soucieux de promouvoir le thème du diagnostic à base de modèles analytiques, je poursuivrais avec un énorme plaisir le développement de la boîte à outils FADIAMOD avec l'objectif de pouvoir l'exploiter à titre de démonstration sur une plate forme de contrôle/commande et de supervision via internet, plate-forme opérationnelle depuis octobre 2002 permettant ainsi de valoriser et de promouvoir le savoir faire du CRAN dans le domaine du diagnostic et en évitant également, avec pragmatisme, de devoir développer de manière récurrente des blocs fonctionnels de diagnostic lors de collaborations industrielles. En tant que scientifique mais également citoyen, j'ai le profond désir de continuer à m'investir dans l'élaboration et la réalisation de projets consacrés aux traitements des eaux usées en développant des systèmes tolérants spécifiques en les modèles considérés, en les commandes synthétisées et les défauts/défaillances concernés.

Je ne peux m'empêcher d'indiquer que toutes ces perspectives et prospectives de recherche ne pourront voir le jour que si les collaborations existantes avec d'autres chercheurs se

poursuivent et que d'autres se créent.

Quatrième Partie :
Références bibliographiques

[Ahmed-zaid *et al.*, 1991]

F. Ahmed-Zaid, P. Ioannou, K. Gousman et R. Rooney. Accommodation of failures in the F-16 aircraft using adaptive control. *IEEE Control Systems Magazine*, 11(1), 73-78, 1991.

[Alcorta Garcia et Frank, 1996a]

E. Alcorta Garcia et P.M. Frank. On the relationship between observer and parameter identification based approaches to fault detection. *Dans 13ème World Congress of IFAC*, San Francisco C.A., USA, vol. N, 25-29, 1996.

[Alcorta Garcia et Frank, 1996b]

E. Alcorta Garcia et P.M. Frank. Analysis of a class of dedicated observer schemes to sensor fault isolation. *Dans UKACC International Conference on CONTROL*, 60-65, 1996.

[Alcorta Garcia et Frank, 1997]

E. Alcorta Garcia et P.M. Frank. Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis. *Control Engineering Practice*, 5(5), 683-692, 1997.

[Alcorta Garcia et Frank, 1999]

E. Alcorta Garcia et P.M. Frank. Fault detection and isolation in nonlinear systems. *Dans 5ème European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Akhenak *et al.*, 2003]

A. Akhenak, M. Chadli, D. Maquin et J. Ragot. State estimation via multiple observer the three tank system. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 1227-1232, 2003.

[Askari *et al.*, 1999]

J. Askari, B. Heiming et J. Lunze. Controller reconfiguration based on a qualitative model : a solution of three-tanks benchmark problem. *Dans European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Bachir *et al.*, 2002]

S. Bachir, J.C. Trigeassou, S. Tnani et S. Cauët. Diagnostic des défauts statoriques et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse. *Dans 2e Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, Nantes, France, 447-452, 2002.

[Ballé *et al.*, 1997]

P. Ballé, D. Fussel, et O. Hecker. Detection and isolation of sensor faults on nonlinear processes based on local linear models. *Dans American Control Conference*, Albuerque, USA, 468-472, 1997.

[Ballé *et al.*, 1998]

P. Ballé, M. Fischera, D. Fussel, O. Nells et R. Isermann. Integrated control, diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger. *IEEE Control Systems Magazine*, 18(3), 52-63, 1998.

[Banerjee *et al.*, 1995]

A. Banerjee, Y. Arkun, R. Pearson et N. Ogunnaike. Hinfini control of nonlinear processes using multiple linear models. *Dans 3ème European Control Conference*, Rome,

Italie, pp. 2671-2676, 1995.

[Barmish, 1994]

B.R. Barmish. *New tools for robustness of linear systems*. MacMillan Publishing Company, 1994.

[Bastin et Dochain, 1990]

G. Bastin et D. Dochain. *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, Elsevier, 1990.

[Bennett et al., 1999]

S.M. Bennett, R.J. Patton et S. Daley. Sensor fault-tolerant control of a rail traction drive. *Control Engineering Practice*, 7(2), 217-225, 1999.

[Bezdek, 1991]

J.C. Bezdek. *Pattern recognition with fuzzy objective functions algorithms*. Plenum Press New York, 1991.

[Bhattacharyya, 1978]

S. Bhattacharyya. Observer design for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 23(3), 483-484, 1978.

[Blanke et al., 2000]

M. Blanke, C.W. Frei, F. Kraus, R.J. Patton et M. Staroswiecki. What is fault-toward a better integration of residual generation and diagnostic decision. *Dans 4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie, 40-51, 2000.

[Blom et Bar-Shalom, 1988]

H.A.P. Blom et Y. Bar-Shalom. The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficients. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(8), 780-783, 1988.

[Bonivento et al., 2003a]

C. Bonivento, L. Marconi et A. Paoli. Fault-tolerant control of the ship propulsion system benchmark. *Control Engineering Practice*, 11(5), 483-492 2003.

[Bonivento et al., 2003b]

C. Bonivento, L. Marconi, A. Paoli, C. Rossi. A framework for reliability analysis of complex diagnostic systems. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 567-572, 2003.

[Bouchon-Meunier et Marsala, 2003]

B. Bouchon-Meunier et C. Marsala. *Logique floue, principes, aide à la décision*. Traité IC2 Information, Commande, Communication, Hermès Science Publications, 2003.

[Buffington et al., 1999]

J. Buffington, P. Chandler et M. Pachter. On-line system identification for aircraft with distributed control effectors. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9,

1033-1049, 1999.

[Cassar et al., 1994]

J.P. Cassar, R.G. Litwak, V. Cocquemot, et M. Staroswiecki. Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour des procédés industriels complexes. *Revue Diagnostic et Sécurité de Fonctionnement*, 4(2), 179-202, 1994.

[Chen et al., 1996]

J.Chen, R.J. Patton et H. Zang. Design of unknown input observers and robust fault detection filters. *International Journal of Control*, 63(1), 85-105, 1996.

[Chen et Patton, 1999]

J. Chen et R.J. Patton. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

[Chitaro et al., 1993]

L. Chitaro, G. Guida, C. Tasso et E. Toppano. Functional and Teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical systems: a case study in diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(6), 1718-1751, 1993.

[Chow et Willsky, 1984]

E.Y. Chow et A.S. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29(7), 603-614, 1984.

[Combastel et al., 2003]

C. Combastel, S. Gentil et J.P. Rognon. Toward a better integration of residual generation and diagnostic decision. Dans *5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 69-73, 2003.

[Da Cunha et al., 1997]

J.P. Da Cunha, G. Champenois et J.D. Gabano. Thermal diagnosis on a D.C. motor working with variable speed. Dans *3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, vol. 1, 450-455, 1997.

[Daafouz et Bernussou, 2001]

J. Daafouz et J. Bernussou. Parameter dependent Lyapunov functions for discrete time systems with time varying parametric uncertainties. *Systems Control & Letters*, 43(5), 355-359, 2001.

[Daafouz et al., 2002a]

J. Daafouz, G. Millerioux et C. Iung. A poly-quadratic stability based approach for linear switched systems. *International Journal of Control*, 75(16/17), 1302-1310, 2002.

[Daafouz et al., 2002b]

J. Daafouz, P. Riedinger et C. Iung. Stability analysis and control synthesis for switched systems : a switched Lyapunov function approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(11), 1883-1886, 2002.

[Darouach et al., 1994]

M. Darouach, M. Zasadzinski. Full-order observers for linear systems with unknown

inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(3), 606-609, 1994.

[Darouach et al., 1995]

M. Darouach, M. Zasadzinski, A. Bassong Onana, et S. Nowakowski. Kalman filtering with unknown inputs via optimal state estimation of singular systems. *International Journal of Systems Science*, 26(10), 2015-2028, 1995.

[Darouach et Zasadzinski, 1997]

M. Darouach et M. Zasadzinski. Unbiased minimum variance estimation for systems with unknown exogenous inputs. *Automatica*, 33(4), 717-719, 1997.

[Darouach et al., 2003]

M. Darouach, M. Zasadzinski et M. Boutayeb. Extension of minimum variance estimation for systems with unknown inputs. *Automatica*, 39(5), 867-876, 2003.

[Delmaire et al., 1994]

G. Delmaire, J.P. Cassar et M. Staroswiecki. Identification and parity space techniques for failure detection in SISO systems including modeling errors. *Dans 33e Conference in Decision and Control*, Lake Buena Vista FL., USA, vol. 3, 2279-2285, 1994.

[De Persis et Isidori, 2001]

C. De Persis et A. Isidori. A geometric approach to nonlinear fault detection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(6), 853 -865, 2001.

[Dia et Passino, 2001]

Y. Diao et K. M. Passino. Stable fault-tolerant adaptive fuzzy/neural control for a turbine engine. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 9(3), 494 -509, 2001.

[Ding et Frank, 1991]

X. Ding et P.M. Frank. Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation. *Dans 1e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Baden Baden, Germany, vol. 1, 307-312, 1991.

[Dubois et al., 2003]

D. Dubois, M. Grabiscj, O. de Mouzon et H. Prade. *Logique floue, principes, aide à la décision. Classification et diagnostic*. Traité IC2 Information, Commande, Communication, chapitre 5, 149-204, Hermès Science Publications, 2003.

[Edelmayer, 2002]

A. Edelmayer. Editorial Special Issue on FDI Filters. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 12 (8), 2002.

[Eide et Maybeck, 1996]

P. Eide et P. Maybeck. An MMAE Failure detection system for the F-16. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 32(3), 1125-1136, 1996.

[El Bahir et Kinnaert, 1998]

L. El Bahir et M. Kinnaert. Fault detection and isolation for a three tank system based on a bilinear model of the supervised process. *Dans UKACC International Conference on*

CONTROL, 1486-1491, 1996.

[Emami-Naeini *et al.*, 1988]

A. Emami-Naeini, M.M. Akhter et S.M. Rock. Effect of model uncertainty on failure detection : the threshold selector. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(12), 1106-1115, 1988.

[Fairman *et al.*, 1984]

F. Fairman, S. Mahil et L. Luk. Disturbance decoupled observer design via singular value decomposition. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(1), 84-89, 1984.

[Foulloy *et al.*, 2003]

L. Foulloy, S. Galichet et A. Titli. *Commande floue 1 - de la stabilité à la supervision*. Traité IC2 Information, Commande, Communication, Hermès Science Publications, 2003.

[Fossard et Normand-Cyrot, 1995]

A.J. Fossard et D. Normand-Cyrot. *Nonlinear Systems*, Chapman & Hall, London, New York, vol. 3, 1995.

[Frank, 1987]

P.M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation - a survey. In: *System fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, ed. by Tzafestas S., Singh M. et Schmidt G., vol. 1, 35-98, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1987.

[Frank et Wünnenberg, 1989]

P.M. Frank et J. Wünnenberg.. Robust fault diagnosis using unknown input schemes. In: *Fault diagnosis in dynamic systems : theory and applications*, ed. by Patton R.J., Frank P.M. et Clark R., vol. 3, 47-98, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.

[Frank, 1990]

P.M. Frank. Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some news results. *Automatica*, 26(3), 459-474, 1990.

[Frank et Ding, 1997]

P.M. Frank et X. Ding. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of Process Control*, 7(6), 403-424, 1997.

[Gaddouna *et al.*, 1994]

B. Gaddouna, D. Maquin et J. Ragot. Fault detection observer for systems with unknown inputs. *Dans 2e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Espoo, Finlande, vol. 1, 69-74, 1994.

[Gao et Antsaklis, 1991]

Z. Gao et P.J. Antsaklis. Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems. *International Journal of Control*, 53(3), 717-729, 1991.

[Gao et Antsaklis, 1992]

Z. Gao et P.J. Antsaklis. Reconfigurable control system design via perfect model

following. *International Journal of Control*, 56(4), 783-798, 1992.

[Garcia *et al.*, 1991]

H.E. Garcia, A. Ray et R.M. Edwards. Reconfigurable control of using learning data. *IEEE Control Systems Magazine*, 11 (1), 85-92, 1991.

[Gehin et Staroswiecki, 1999]

A.L. Gehin et M. Staroswiecki. A formal approach reconfigurability analysis application to the three tank benchmark. *Dans European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Gertler, 1991]

J. Gertler. Analytical redundancy methods in fault detection and isolation : survey and synthesis. *Dans 1e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Baden Baden, Germany, vol. 1, 9-12, 1991.

[Gertler, 1997]

J. Gertler. Fault detection and isolation using parity relations. *Control Engineering Practice*, 5(5), 653-661, 1997.

[Gertler et DiPierro, 1997]

J. Gertler et G. DiPierro. On the relationship between parity relations and parameter estimation. *Dans 3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, vol. 1, 468-472, 1997.

[Gertler, 1998]

J.J. Gertler. *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. Marcel Dekker, New York, 1998.

[Grimble, 1998]

M.J. Grimble. Combined fault monitoring detection and control. *Dans 37e Conference in Decision and Control*, Tampa, USA, 3675-3680, 1998.

[Guan et Saif, 1991]

Y. Guan et M. Saif. A novel approach to the design of unknown input observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 36(5), 632-635, 1991.

[Gustafsson, 2002]

F. Gustafsson. Stochastic fault diagonability in parity spaces. *Dans 15ème World Congress of IFAC*, Barcelone, Espagne, CD-ROM, 2002.

[Hamelin et Sauter, 2000]

F. Hamelin et D. Sauter. Robust fault detection in uncertain dynamic systems. *Automatica*, 36(11), 1747-1754, 2000.

[Hamelin, 2002]

F. Hamelin. *Génération de résidus robsutes pour la détection de défauts : Approche fréquentielle*. HDR Université Henri Poincaré, 20 novembre, 2002.

[Hammouri *et al.*, 2001]

H. Hammouri, P. Kabore et M. Kinnaert. A geometric approach to fault detection and isolation for bilinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(9), 1451-

1455, 2001.

[Heiming et Lunze, 1999]

B. Heiming et J. Lunze. Definition of the three-tank benchmark problem for controller reconfiguration. *Dans European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Höfling et Pfeufer, 1994]

T. Höfling et T. Pfeufer. Detection of additive and multiplicative faults - parity space vs. parameter estimation. *Dans 2e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Espoo, Finlande, vol. 2, 539-544, 1994.

[Hou et Muller, 1992]

M. Hou et P.C. Muller. Design of observers linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(6), 871-875, 1992.

[Hou et Muller, 1994]

M. Hou et P.C. Muller. Disturbance decoupled observer design: a unified viewpoint. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(6), 1338-1341, 2000.

[Isermann, 1984]

R. Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods - A survey. *Automatica*, 20(4), 387-404, 1984.

[Iserman, 1994]

R. Isermann. Integration of fault detection and diagnosis methods. *Dans 2e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Espoo, Finlande, vol. 2, 597-612, 1994.

[Isermann, 1997]

R. Isermann. Supervision, fault-detection and fault-isolation methods - An introduction. *Control Engineering Practice*, 5(5), 639-652, 1997.

[Isermann et Ballé, 1997]

R. Isermann et P. Ballé. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, 5(5), 709-719, 1997.

[Isidori, 1995]

A. Isidori. *Nonlinear control systems*. Springer-Verlag, Berlin, New York, 1995.

[Izadi-Zamanabadi et Blanke, 1999]

R. Izadi-Zamanabadi et M. Blanke. A ship propulsion system as a benchmark for fault-tolerant control. *Control Engineering Practice*, 7(2), 227-239, 1999.

[Jacobson et Nett, 1991]

C.A. Jacobson et C.N. Nett. An integrated approach to controls and diagnosis using the four parameter controller. *IEEE Control Systems Magazine*, 11(6), 22-28, 1991.

[Jansweijer et al., 1993]

W. Jansweijer, A. Abu-Hanna et R. Benjamins. Configuration of diagnostics applications. *TOOLDIAG'93 International Conference on Fault Diagnosis*, Toulouse,

France, vol. 2, 531-540, 1993.

[Jarrah et Rousan, 2001]

O.M. Jarrah et M. Rousan. Fault detection and accommodation in dynamic systems using adaptive neurofuzzy systems. *IEE proceedings - Control Theory and applications*, 148(4), 283-290, 2001.

[Jiang et Zhao, 1997]

J. Jiang et Q. Zhao. Should we use parameter estimation or state estimation based methods for FDI. Dans *3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, 474-479, 1997.

[Jiang et Zhao, 1998]

J. Jiang et Q. Zhao. Fault tolerant control synthesis using imprecise fault identification and reconfigurable control. Dans *IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, Gaithersburg, MD, USA, 169-174, 1998.

[Join, 2002]

C Join. *Diagnostic des systèmes non linéaires Contribution aux méthodes de découplage*. Thèse Université Henri Poincaré, 29 novembre, 2002.

[Jones et Burge, 1987]

A.H. Jones et S.E. Burge. *An expert design using cause-effect representations and simulation for fault detection*. In: *System Fault Diagnostics, Reliability and Related Knowledge-Based Approaches*, ed. by Tzafestas S., Singh M. et Schmidt G., vol. 2, 71-80, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1987.

[Kabore et Wang, 2001]

P. Kabore et H. Wang. Design of fault diagnosis filters and fault-tolerant control for a class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(11), 1805-1810, 2001.

[Kanev et Verhaegen, 2000]

S. Kanev et M. Verhaegen. Controller reconfiguration for non-linear systems. *Control Engineering Practice*, 8(11), 1223-1235, 2000.

[Karimi et Landau, 2000]

A. Karimi et I.D. Landau. Robust adaptive control of a flexible transmission system using multiple models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(2), 321-331, 2000.

[Karny et Narendra, 2003]

M. Karny et K.S. Narendra. Editorial Special Issue on Multiple models in adaptive systems effectiveness. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 17(2), 2003.

[Keller, 1999]

J.Y. Keller. Fault isolation filter design for linear stochastic systems. *Automatica*, 35(10), 1701-1706, 1999.

[Keller et Darouach, 1999]

J.Y. Keller et M. Darouach. Two-stage Kalman estimator with unknown exogenous

- inputs. *Automatica*, 35(2), 339-342, 1999.
- [Kinnaert, 1999]
M. Kinnaert. Robust fault detection based on observers for bilinear systems *Automatica*, 35(11), 1829-1842, 1999.
- [Kinnaert, 2003]
M. Kinnaert. Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems: a tutorial. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 37-50, 2003.
- [Koenig et al., 1997]
D. Koenig, S. Nowakowski et T. Cecchin. An original approach for actuator and component fault detection and isolation. *Dans 3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, 95-105, 1997.
- [Koscielny, 1999]
J.M. Koscielny. Application of fuzzy logic for fault isolation in a three-tank system. *Dans 14ème World Congress of IFAC*, Beijing, R.P. China, vol. P, 73-78, 1999.
- [Landau, 1999]
I.D. Landau. From robust control to adaptive control. *Control Engineering Practice*, 7(9), 1113-1124, 1999.
- [Lawrence et Rugh, 1995]
D. A. Lawrence and W. J. Rugh. Gain scheduling dynamic linear controllers for a nonlinear plant. *Automatica*, 31(3), 381-390, 1995.
- [Lee et al., 2001]
H.J. Lee, J.B. Park et G. Chen. Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 9(2), 369-379, 2001.
- [Leitch et Galanti, 1992]
R. Leitch et M. Galanti. Task classification for knowledge-based systems in industrial automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(1), 142-152, 1992.
- [Leitch, 1993]
R. Leitch. Engineering diagnosis : matching problems to solutions. *TOOLDIAG'93 International Conference on Fault Diagnosis*, Toulouse, France, vol. 3, 837-845, 1993.
- [Leith et Leithead, 1999]
D.J. Leith et W.E. Leithead. Analytic framework for blended multiple model systems using linear local models. *International Journal of Control*, 72(7/8), 605-619, 1999.
- [Leith et Leithead, 2000]
D.J. Leith et W.E. Leithead. Survey of gain scheduling analysis and design. *International Journal of Control*, 73(11), 1001-1025, 2000.
- [Leonhardt et Ayoubi, 1997]
S. Leonhardt et M. Ayoubi. Methods of fault diagnosis. *Control Engineering Practice*,

5(5), 683-692, 1997.

[Li et Kadiramanathan, 2001]

P.g Li et V. Kadiramanathan. Particle filtering based multiple-model approach to fault diagnosis in nonlinear stochastic systems. *Dans 6^{ème} European Control Conference*, Porto, Portugal, CD-Rom, 2001.

[Liang *et al.*, 2000]

Y.W. Liang, D.C. Liaw et T.C. Lee. Reliable control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(4), 706-710, 2000.

[Liu et Dexter, 2001]

X-F. Liu et A. Dexter. Fault-tolerant supervisory control of VAV air-conditioning systems. *Energy and Buildings*, 33(4), 379-389, 2001.

[Liu et Su, 1997]

B. Liu et J. Si. Fault isolation filter design for linear time-invariant systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(5), 704-707, 1997.

[Liu et Patton, 1998]

G.P. Liu et R.J. Patton. *Eigenstructure assignment for control system design*. John Wiley and Sons, New York, 1998.

[Looze *et al.*, 1985]

D. Looze, J.L. Weiss, J.S. Eterno et N.M. Barrett. An automatic redesign approach for restructurable control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 5(2), 16-22, 1985.

[Lopez-Toribio et Patton, 1999]

C.J. Lopez-Toribio et R.J. Patton. Takagi-Sugeno fuzzy fault-tolerant control for a nonlinear system. *Dans 38^e Conference in Decision and Control*, Phoenix A., USA, 4468-4473, 1999.

[Lopez-Toribio *et al.*, 1999]

C.J. Lopez-Toribio, R.J. Patton, C. Batt et J. Chen. Fault diagnosis of the 3tank system using fuzzy multiple inference modelling. *Dans 5^{ème} European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Lou *et al.*, 1986]

X.C. Lou, A.S. Willsky et G.C. Verghese. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems. *Automatica*, 22(3), 333-344, 1986.

[Luenberger, 1966]

D. Luenberger. Observers for multivariable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(2), 190-197, 1966

[Maciejowski, 1999]

J.M. Maciejowski. Modelling and predictive control: enabling technologies for reconfiguration. *Annual Reviews in Control*, 23, 13-23, 1999.

[Magni et Mouyon, 1994]

J.F. Magni et P. Mouyon. On residual generation by observer and parity space

approches. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(2), 441-447, 1994.

[Magni, 1995]

J.F. Magni. On continuous-time parameter identification by observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(10), 1789-1792, 1995.

[Mangoubi, 1998]

R. Mangoubi. *Robust estimation and failure detection : a concise treatment*. Advances in industrial control. Springer-Verlag, London, New York, 1998.

[Mangoubi et Edelmayer, 2000]

R.S. Mangoubi et A.M. Edelmayer. Model based fault detection : the optimal past, the robust present and a few thoughts on the future. *Dans 4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie, vol. 1, 64-75, 2000.

[Maquin et Ragot, 2000]

D. Maquin et J. Ragot. *Diagnostic des systèmes linéaires*. Collection pédagogique d'automatique. Hermès Sciences Publications, Paris, 2000.

[Marcu et al., 1999]

T. Marcu, M.H. Matcovschi et P.M. Frank. Neural observer-based approach to fault detection and isolation of a three-tank system. *Dans 5^{ème} European Control Conference*, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Maybeck, 1999]

P. Maybeck. Multiple model adaptive algorithms for detecting and compensating sensor and actuator/surface failures in aircraft flight control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9, 1051-1070, 1999.

[McLoone et Irwin, 2001]

S.C. McLoone et G.W. Irwin. On nonlinear modelling using velocity-based multiple model networks. *Dans American Control Conference*, Arlington, USA, 1622-1627, 2001.

[Misawa et Hedrick, 1989]

E.A. Misawa et J.K. Hedrick. Non-linear observer a state of the art survey. *Dans Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Transactions ASME*, 111(3), 344-352, 1989.

[Montmain et Gentil, 2000]

J. Montmain et S. Gentil. Dynamic causal model diagnostic reasoning for online technical process supervision. *Automatica*, 36, 1137-1152, 2000.

[Murray-Smith et Johansen, 1997]

R. Murray-Smith et T.A. Johansen. *Multiple model approaches to modelling and control*. Taylor & Francis, 1997.

[Murray-Smith et al., 1999]

R. Murray-Smith, T.A. Johansen et R. Shorten. On transient dynamics, off-equilibrium behaviour and identification in blended multiple model structures. *Dans 5^{ème} European*

Control Conference, Karlsruhe, Allemagne, CD-Rom, 1999.

[Narendra et Balakrishnan, 1997]

K.S. Narendra et J. Balakrishnan. Adaptive control using multiple models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(2), 171-187, 1997.

[Narendra et Xiang, 2000]

K.S. Narendra et C. Xiang. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45 (9), 1669-1686, 2000.

[Narendra et al., 2003]

K. S. Narendra, O. A. Driollet, M. Feiler et K. George. Adaptive control using multiple models, switching and tuning. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 17, 87-102, 2003.

[Nikoukhah, 1994]

R. Nikoukhah. Innovation generation in the presence of unknown inputs : application to robust failure detection. *Automatica*, 30(12), 1851-1867, 1994.

[Noura et al., 1996]

H. Noura, C. Aubrun, F. Hamelin et D. Sauter. Accommodation des lois de commande des systèmes soumis à des défauts. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 30(10), 1351-1374, 1996.

[Noura, 2002]

H. Noura. *Méthodes d'accommodation aux défauts : Théorie et application*. HDR Université Henri Poincaré, 26 mars, 2002.

[Nyberg, 2000]

M. Nyberg. Model based fault diagnosis using structured hypothesis tests. *Dans 4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie, vol. 2, 1026-1031, 2000.

[Oliviera et al., 1999]

M. C. Oliveira, J. Bernussou et J. C. Geromel. A new discrete-time robust stability condition. *Systems, Control & Letters*, 37(4), 261-265, 1999.

[Park et al., 1994]

J. Park, G. Rizzoni et W.B. Ribbens. On the representation of sensor faults in fault detection filters. *Automatica*, 30, 1793-1793, 1994.

[Park et al., 2001]

J. Park, J. Kim, et D. Park. LMI-Based design of stabilizing fuzzy controllers for nonlinear systems described by Takagi-Sugeno fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*. 122(1), 73-82, 2001.

[Patton et al., 1989]

R.J. Patton, P.M. Frank et R. Clark. *Fault diagnosis in dynamic systems: theory and applications*. Prentice Hall international series in systems and control engineering. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.

[Patton et Chen, 1991]

R.J. Patton and J. Chen. An review of parity space approaches to fault diagnosis. *Dans*

1e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS, Baden Baden, Germany, vol. 1, 239-255, 1991.

[Patton, 1997]

R.J. Patton. Fault Detection Fault-tolerant control: the 1997 situation. *Dans 3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Kingston Upon Hull, Angleterre, 1033-1054, 1997.

[Patton et al., 2000]

R.J. Patton, P.M. Frank et R. Clark. *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer-Verlag, London, New York, 2000.

[Patton et al., 2001]

R.J. Patton, C.J. Lopez Toribio et S. Simani. Robust fault diagnosis in a chemical process using multiple-model approach. *Dans 40e Conference in Decision and Control*, Orlando F.L., USA, 149-154, 2001.

[Polycarpou et Vemuri, 1995]

M.M. Polycarpou et A.T. Vemuri. Learning methodology for failure detection and accommodation. *IEEE Control Systems Magazine*, 15(3), 16-24, 1995.

[Polycarpou, 2001]

M.M. Polycarpou. Fault accommodation of a class of multivariable nonlinear dynamical systems using a learning approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(5), 736-742, 2001.

[Puig et Quevedo, 2001]

V. Puig et J. Quevedo. Fault-tolerant PID controllers using a passive robust fault diagnosis approach. *Control Engineering Practice*, 9(11), 1221-1234, 2001.

[Puig et al., 2002]

V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet et S. De Las Heras. Passive robust fault detection approaches using interval models. *Dans 15ème World Congress of IFAC*, Barcelone, Espagne, CD-ROM, 2002.

[Qiu et Gertler, 1993]

Z. Qiu et J. Gertler. Robust FDI systems and Hoptimization disturbances and tall fault case. *Dans 32e Conference in Decision and Control*, San Antonio TX., USA, 1710-1715, 1993.

[Rago et al., 1998]

C. Rago, R. Prasanth, R. K. Mehra et R. Fortenbaugh. Failure detection and identification and fault tolerant control using the IMM-KF with applications to the Eagle-Eye UAV. *Dans 38e Conference in Decision and Control*, Phoenix A., USA, 4208-4213, 1998.

[Ramoni et al., 1992]

M. Ramoni, M. Stefanelli, L. Magnani et G. Barosi. An epistemological framework for medical knowledge-based systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 22(6), 1361-1375, 1992.

[Rong et al., 2002]

Q. Rong, S.K. McLoone et G.W. Irwin. On hidden coupling in multiple model based PID

controller networks. Dans *15ème World Congress of IFAC*, Barcelone, Espagne, CD-Rom, 2002.

[Rong Li et Bar-Shalom, 1993]

X. Rong Li et Y. Bar-Shalom. Design of interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1(3), 186-194, 1993.

[Rong Li *et al.*, 1999a]

X. Rong Li, X. Zhi et Y. Zhang. Multiple-model estimation with variable structure - Part III: Model group switching algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 35(1), 225-241, 1999.

[Rong Li *et al.*, 1999b]

X. Rong Li, Y. Zhang et X. Zhi. Multiple-model estimation with variable structure - Part IV: Design and evaluation of model-group switching algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 35(1), 242-254, 1999.

[Rong Li et Zhang, 2000]

X. Rong Li et Y. Zhang. Multiple-model estimation with variable structure - Part V: Likely-model set algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 36(2), 448-466, 2000.

[Rugh et Shamma, 2000]

W.J. Rugh et J.S. Shamma. Research on gain scheduling. *Automatica*, 36, 1401-1425, 2000.

[Sauter et Hamelin, 1999]

D. Sauter et F. Hamelin. Frequency-domain optimisation for robust fault detection and isolation in dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(4), 878-882, 1999.

[Shamma et Athans, 1990]

Shamma, J.S. et Athans, M.. Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(8), 898-907, 1990.

[Shields et Du, 2000]

D.N. Shields et S. Du. An assessment of fault detection methods for a benchmark system. Dans *4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie, 937-942, 2000.

[Shorten *et al.*, 1999]

R. Shorten, R. Murray-Smith, R. Bjorgan et H. Golle. On the interpretation of local models in blended multiple model structures. *International Journal of Control*, 72(7/8), 620-628, 1999.

[Shtessel *et al.*, 2002]

Y. Shtessel, J. Buffington et S. Banda. Tailless aircraft flight control using multiple time scale reconfigurable sliding modes. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(2), 288-296, 2002.

[Spreitzer et Ballé, 2000]

K. Spreitzer et P. Ballé. A multi-model approach for detection and isolation of sensor and

- process faults for a heat exchanger. *Dans American Control Conference, Chicago, USA, 2730-2734, 2000.*
- [Staroswiecki et Gehin, 2001]
M. Staroswiecki et A-L. Gehin. From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25, 1-11, 2001.
- [Staroswiecki et Comtet-Varga, 2001]
M. Staroswiecki et G. Comtet-Varga. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 7, 687-699, 2001.
- [Stiwell et Rugh, 1999]
D.J. Stiwell et W.J. Rugh. Interpolation of observer state feedback controllers for gain scheduling. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(6), 1225-1229, 1999.
- [Tao et al., 2001]
G. Tao, S.M. Joshi et X.E. Ma. Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(1), 78-95, 2001.
- [Titli, 1979]
A. Titli. *Analyse et commande des systèmes complexes*. Cepadues éditions, 1979.
- [Tanaka et Sugeno, 1992]
K. Tanaka et M. Sugeno. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*. 45(2), 135-156, 1992.
- [Travé-Massuyès et al., 1997]
L. Travé-Massuyès, P. Dague et F. Guerrin. *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Collection diagnostic et maintenance, Hermès, 1997.
- [Tzafestas et al., 1987]
S.G. Tzafestas, M.G. Singh et G. Schmidt. *System fault diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1987.
- [Ulieru, 1993]
M. Ulieru. From Fault trees to fuzzy relations in managing heuristics for technical diagnosis. *IEEE Systems Man and Cybernetics Conference, Le Touquet, France*, 392-397, 1993.
- [Vadam et al., 1997]
O. Vadam, J. Montmain et J.C. Cassar. Fault detection using parallel simulations. *Dans 3e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS, Kingston Upon Hull, Angleterre, vol. 1, 121-126, 1997.*
- [Van den Hof, 1998]
P. Van den Hof. Closed-loop issues in system identification. *Annual Reviews in Control*, 22, 173-186, 1998.
- [Veillette et al., 1992]
R.J. Veillette, J.V. Medanic et W.R. Perkins. Design of reliable control systems. *IEEE*

Transactions on Automatic Control, 37(3), 290-300, 1992.

[Vermeiren, 1998]

L. Vermeiren. *Proposition de lois de commande pour la stabilisation de modèles flous*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Novembre 1998.

[Wang *et al.*, 1975]

S. Wang et E. Wang et P. Dorato. Observing the states of systems with unmeasurable disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 20(5), 716-715, 1975

[Weber *et al.*, 1999]

P. Weber, S. Gentil, P. Ripoll et L. Foulloy. Multiple fault detection and isolation. *Dans 14ème World Congress of IFAC*, Beijing, R.P. China, vol. P, 223-228, 1999.

[Weber et Jouffe, 2003]

P. Weber et L. Jouffe. Reliability modelling with dynamic bayesian networks. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 57-62, 2003.

[Willsky et Jones, 1976]

A.S. Willsky et H.L. Jones. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 21(1), 108-112, 1976

[Wolfram et Isermann, 2001]

A. Wolfram et R. Isermann. Fault detection of inverter-fed induction motors using a multi-model approach based on neurofuzzy models. *Dans European Control Conference*, Porto, Portugal, CD-Rom, 2001

[Wu *et al.*, 2000]

N.E. Wu, Y. Zhang et K. Zhou. Detection, estimation and accommodation of loss of control effectiveness. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 14, 775-795, 2000.

[Wu, 2001a]

N.E. Wu. Reliability of fault tolerant control systems: Part I. *Dans 40e Conference in Decision and Control*, Orlando F.L., USA, 1460-1465, 2001.

[Wu, 2001b]

N.E. Wu. Reliability of fault tolerant control systems: Part II. *Dans 40e Conference in Decision and Control*, Orlando F.L., USA, 1465-1471, 2001.

[Wu *et al.*, 2003]

N. E. Wu, S. Thavamanit, Y. Zhang et M. Blanke. Sensor fault masking of a ship propulsion system. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 435-440, 2003.

[Wu et Patton, 2003]

N. E. Wu et R.J. Patton. Reliability and supervisory control. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*,

Washington DC, USA, 139-144, 2003.

[Yang et Wilde, 1988]

F. Yang et R.W. Wilde Observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(7), 677-681, 1988

[Yang et al., 2001]

G.H. Yang, J.L. Wang et Y.C. Soh. Reliable H_∞ controller design for linear systems. *Automatica*, 37(5), 717-725, 2001.

[Zhang et al., 1998]

Q. Zhang, M. Basseville et A. Benveniste. Fault Detection and Isolation in Nonlinear Dynamic Systems: A Combined Input-Output and Local Approach. *Automatica*, 34(10), 1359-1373, 1998.

[Zhang et Rong Li, 1998]

Y.M. Zhang et X. Rong Li. Detection and diagnosis of sensors and actuators failures using IMM Estimator. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34(4), 1293-1313, 1998.

[Zhang et Jiang, 2001]

Y.M. Zhang et J. Jiang. Integrated active fault-tolerant control system using Interacting Multiple Model approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(4), 1221-1235, 2001.

[Zhang et Jiang, 2002]

Y.M. Zhang et J. Jiang. An active fault-tolerant control system against partial actuator failures. *IEE proceedings - Control Theory and applications*, 149(1), 95-104, 2002.

[Zhang et Jiang, 2003]

Y.M. Zhang et J. Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Dans 5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington DC, USA, 265-276, 2003.

[Zhao et Jiang, 1998]

Q. Zhao et J. Jiang. Reliable state feedback control systems design against actuator failures. *Automatica*, 34(10), 1267-1272, 1998

[Zhou et Frank, 1998]

D.H. Zhou et P.M. Frank. Fault diagnostics and fault tolerant control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34(2), 420-427, 1998.

[Zhou et Frank, 1999]

D.H. Zhou et P.M. Frank. Nonlinear adaptive observer based component fault diagnosis of nonlinear in closed-loops. *Dans 14ème World Congress of IFAC*, Beijing, R.P. China, vol. P, 25-30, 1999.

[Zhou et al., 2000]

D.H. Zhou, G.Z. Wang et S.X. Ding. Sensor fault tolerant control of nonlinear systems with application to a three-tank-systems. *Dans 4e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Budapest, Hongrie,

810-815, 2000.

[Zhou et Ren, 2001]

K. Zhou et Z. Ren. A new controller architecture for high performance robust, and fault-tolerant control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(10), 2688-2693, 2001.

[Zhuang *et al.*, 1998]

Z. Zhuang, G. Schreier et P. M. Frank. A qualitative-observer approach to generating and evaluation residuals. *Dans 37e Conference in Decision and Control*, Tampa,USA, 102-107, 1998.

Cinquième Partie :
Publications significatives

Cette dernière partie, représentative de mes travaux de recherche, comprend :

- un article paru en 2003 dans la revue *Control Engineering Practice* concernant les capteurs informationnels,
- deux articles parus dans des revues internationales traitant du diagnostic et de l'accommodation de défauts, l'un publié en 2002 dans la revue *ISA Transactions* l'autre en 2000 dans la revue *IEEE Control System Magazine*,
- une communication, récemment acceptée au *5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, dévolue à la problématique du diagnostic au sein des systèmes représentés sous forme convexe.

[RI_6]

- **D. Theilliol**, JC. Ponsart, J. Harmand, C. Join, P. Gras.

“One-line estimation of unmeasured inputs for anaerobic wastewater treatment processes.”
Control Engineering Practice, vol. 11, 1007-1019, 2003.



PERGAMON

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Control Engineering Practice 11 (2003) 1007–1019

CONTROL ENGINEERING
PRACTICEwww.elsevier.com/locate/conengprac

On-line estimation of unmeasured inputs for anaerobic wastewater treatment processes

Didier Theilliol^{a,*}, Jean-Christophe Ponsart^a, Jérôme Harmand^b, Cédric Join^a,
Pascal Gras^b

^a *Faculte des Sciences et Techniques, Universite Henri Poincare Nancy 1, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, CNRS UMR 7039-BP 239, 54506 Vandoeuvre Cedex, France*

^b *Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, INRA Avenue des Etangs, 11100 Narbonne, France*

Received 5 April 2002; accepted 13 October 2002

Abstract

This paper deals with the design of an unknown input observer for anaerobic wastewater treatment plants. A key problem in bioprocessing systems is the absence, in some cases, of reliable on-line measurements for real-time monitoring applications. The objective is to develop on-line estimation of unmeasured input (i.e. unknown input) for anaerobic processes defined as unknown input affine nonlinear systems. Based on a nonlinear state space model, the design approach is to find an observable subsystem insensitive to unmeasured inputs according to the linear theory. This subsystem is used to estimate, from available on-line measurements, the state and the unmeasured inputs. This study focuses on the on-line estimation of unmeasured inputs over a wide range of simulation and a practical experimentation on a pilot plant: an anaerobic fixed bed reactor.

© 2003 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Keywords: Biological processes; Unknown input observer; Nonlinear systems

1. Introduction and problem statement

Due to the increasing complexity and necessity for safety in industrial processes, efficient supervision systems are becoming more and more important. Indeed, even in normal operational conditions, several types of disturbances can be present and they can largely affect the operating conditions of the process. Hence, there is a clear need for advanced control in order to keep the system performance as close as possible to optimal. This is particularly true of biological processes for environmental purposes (e.g., biological wastewater treatment plants or WWTP) where the state of the “living” part of the system must be closely monitored. Extensive surveys have been published and several international conferences have been held on this topic (see Agrawal & Lim, 1984; Beck, 1986; Bastin & Dochain, 1990; Shimizu, 1993; Andrews, 1994; Bastin & Impe, 1995).

However, biological processes exhibit some very specific behaviors, even more since WWTPs are subject to variations of large magnitude in both the influent pollutant concentrations and flow rates which can lead to catastrophic consequences in downstream biological processes. As a consequence, the control needed is not exactly the same as would usually be understood by a control engineer: see for instance the survey paper by Andrews (1994), in which it is underlined that, in such processes, things seem to work fairly well until some failure or fault occurs. In the field of WWTPs, anaerobic digestion processes are commonly used. These processes present a number of advantages. In particular, organic matter is degraded into a gas mixture of carbon dioxide and methane producing valuable fuel. In addition, this kind of process is able to operate under severe conditions: high strength effluents and short hydraulic retention time. It is therefore particularly well adapted to treat concentrated wastewaters such as those coming from agricultural or food industries. When used as such, these processes are subject to large input disturbances—as pointed out in the introduction—so that supervision and diagnosis systems are needed to keep the plant

*Corresponding author. Tel.: +33-383-684-465; fax: +33-383-684-462.

E-mail address: didier.theilliol@cran.uhp-nancy.fr (D. Theilliol).

working, whatever happens. A number of studies on the supervision and the diagnosis of the anaerobic digestion processes have been carried out: see Barnett and Andrews (1992), Chynoweth et al. (1994), Marsili-Libelli and Muller (1996), Steyer, Gleize, Bronner, and Moletta (1997), Pullammanappallil, Svoronos, Chynoweth, and Lyberatos (1998), Genovesi, Harmand, and Steyer (1999) and Aubrun, Harmand, Garnier, and Steyer (2000).

In addition, these processes suffer from a quasi-systematic lack of sensors and all the hypotheses needed to synthesise available estimation and control techniques cannot be verified. This is particularly true when you consider the necessity to measure the inputs of the process. Indeed, if some advanced sensors are available to monitor the composition of the mixture at the exit of a biological reactor (substrate and product concentrations), they are usually not implementable at the input of the process. The range of measurement as well as the presence of solid matters in the effluent to be treated, do not usually allow the implementation of a sensor at the entrance of the treatment plant. As a consequence, the substrate concentrations have to be considered as unknown inputs.

To our knowledge, there is no theory dealing with this situation and taking into account the specificity of biological systems. To deal with this problem, on the one hand, Aubrun et al. (2000) have proposed to use linear theory to build a filter able to estimate the input chemical organic demand (COD, a measure of pollution) at the entrance of a fluidised bed reactor. On the other hand, Alcaraz-Gonzalez et al. (1999) have proposed a new class of observers (called set value or interval observers) to limit the necessary design hypotheses to the knowledge of lower and upper bounds in between which the unknown inputs are assumed to lie.

This paper is concerned with the design of a disturbance decoupled observer. It is then applied to an unknown input affine nonlinear system. The design procedure yields a system which allows us to estimate on-line both the unmeasured inputs and the state variables. The proposed method finds its fundamental theory in the linear case developed by Fairman, Mahil, and Luk (1984). The design for systems with unknown inputs consists in the synthesis of a conventional free unknown input reduced-order system. To do so, the original observer design problem is transformed into a standard one (by a system transformation based on a singular value decomposition and some substitutions). Moreover, the design procedure provides an observer capable of delivering an estimation of the unknown inputs as well.

The paper is organised as follows. Section 2 presents a general theory and the design procedure to build an observer able to estimate the unmeasured inputs of a

general unknown input affine nonlinear system. Section 3 is devoted to the presentation of the process retained for the application, that is an anaerobic WWTP. Simulation results of the considered process are then presented and discussed, using a validated model of the process (cf. Bernard, Sadok, Dochain, Genovesi, & Steyer, 2001 and Appendix B). Based on the nonlinear model of the system and the measurements delivered by a simulator, the unknown inputs are estimated for a wide range of initial conditions and in an extensive functioning space. In order to show the practical interest and relevance of this approach, experimental results obtained using the real anaerobic wastewater treatment process are provided. Finally, concluding remarks are given.

2. On-line estimation of unmeasured inputs

Consider the dynamical mass-balance model of bioprocesses described by the general state space representation (Bastin & Dochain, 1990):

$$\dot{\xi}(t) = K r(\xi(t)) - D(t)\xi(t) + F(t) - Q(t), \quad (1)$$

where ξ is the state vector (i.e. the set of component concentrations), K a yield coefficient matrix, $r(\xi)$ the vector of reaction kinetics (also called reaction rates), D the dilution rate matrix, F a set of feed rates and Q a set of gaseous outflow rates.

A full knowledge of this model is assumed: the structure of the reaction kinetics is completely known; moreover the values of all coefficients are given. Furthermore, the dilution rate D and the gaseous outflow rates Q are measured on-line. The set of feed rates F , however, is considered to be unmeasured.

To summarise, the general mathematical model of bioprocesses can then be rewritten as

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= f(\xi(t), u(t)) + \Gamma \xi_{in}(t), \\ y(t) &= g(\xi(t)), \end{aligned} \quad (2)$$

where $\xi \in \mathbb{R}^n$ is the state vector, $u \in \mathbb{R}^p$ is the control input vector, $\xi_{in} \in \mathbb{R}^q$ is the unknown input vector and $y \in \mathbb{R}^m$ is the output vector. Γ is a constant known matrix of appropriate dimension. $f(\cdot)$ represents the nonlinear state function according to (1) and $g(\cdot)$ represents the nonlinear measurement function. It can be noted that the nonlinear system can be defined as an unknown inputs affine nonlinear system where $\Gamma \xi_{in}(t)$ is equal to $F(t)$.

Based on the general mathematical model of bioprocesses (2), the outline of the paper is the on-line estimation of the unmeasured input vector, when the nonlinear measurement function $g(\cdot)$ is not equal to the identity matrix. In the case where $g(\cdot)$ is equal to $I_{m \times m}$, the on-line estimation of the unmeasured input vector can be solved by a basic inversion of the dynamical equations of the system. The proposed solution consists

in the design of observers for nonlinear systems with unknown inputs (inspired from Hou & Müller, 1992, in linear case) based on a singular value decomposition algorithm. The problem of designing observers for unknown input systems lies in the design of unknown input free reduced-order systems. To solve the different synthesis steps, the singular value decomposition technique is investigated, as first introduced by Fairman et al. (1984). Moreover, the design procedure provides an estimation of the unknown inputs.

Before proceeding further, the following assumptions on system (2) will be adopted through this paper:

- A.1. The number of unknown inputs is less than the number of outputs i.e. $m > q$.
- A.2. Unknown inputs are independent, i.e. $\text{rank}(\Gamma) = q$.
- A.3. A subset of state variables ξ is supposed to be measured on-line as

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\xi(t) \\ h(\xi(t)) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

where $C \in \mathbb{R}^{m_c \times n}$,

- A.4 $\text{rank}(C\Gamma) = \text{rank}(\Gamma) = q$.

It can easily be shown that assumptions A.1 and A.2 are not really restrictive and, without loss of generality, assumption A.3 can easily be verified. The necessity of assumption A.4 for the existence of an unknown input observer has been proved by many authors, e.g. Hou and Müller (1992, 1994), Chen and Patton (1999) and Fairman et al. (1984).

On the previous assumptions, based on the computation of two Singular Value Decompositions, (cf. Appendix A), system (2) can be decomposed into two sub-systems: a reduced-order state space system, depending on $\tilde{\xi}_1$ (sensitive to the unknown input $\tilde{\xi}_{in}$) and a second reduced-order state space system, depending on $\tilde{\xi}_2$ (insensitive to the unknown input $\tilde{\xi}_{in}$). Based on the estimation of the free unknown input state sub-vector $\tilde{\xi}_2$ (estimated using, for instance, an extended Luenberger observer) and on some various substitutions in the state space equation $\dot{\tilde{\xi}}_1(t)$, an estimation of unknown inputs can be obtained as (cf. Appendix A)

$$\begin{aligned} \hat{\tilde{\xi}}_{in}(t) = & V_T(S_T)^{-1} \beta \dot{y}_1(t) - V_T(S_T)^{-1} \gamma \hat{\tilde{\xi}}_2(t) \\ & - V_T(S_T)^{-1} \tilde{f}_1^*(y_1(t), \hat{\tilde{\xi}}_2(t), u(t)). \end{aligned} \quad (4)$$

Please note that this unknown input estimator requires the derivative of the outputs and of the state sub-vector estimation. This on-line derivative computation—in the presence of noise measurements and some model errors—can highlight discrepancies between the true and the estimated unmeasured inputs. From a practical point of view, state variable filters can be used to reconstruct reliable time derivatives (Young, 1992). In the sequel, this approach is applied to the estimation

of unmeasured inputs of an anaerobic wastewater treatment process. Simulation as well as experimental results are reported.

3. Bioprocess description

The process at the core of study is a 948-l fixed bed anaerobic pilot plant used for the treatment of wine vinasses. The reactor is a circular column of 3.5 m height and 0.6 m diameter. A recirculation loop ensures the homogeneity of the liquid phase in the tank. The synopsis of the plant is represented in Fig. 1. This process is located at the “Laboratoire de Biotechnologie de l’Environnement” (LBE), a lab at the National French Institute for Agronomic Research (INRA) in Narbonne, France. It is automatically operated to validate new control or supervision algorithms (Steyer, Bouvier, Conte, Gras, & Sousbie, 2002). This highly instrumented process is equipped with a dilution system that allows the user to simulate input disturbances, while the control action is the input flow rate. A constant temperature of 35°C is maintained, using a heat exchanger located in the recirculation loop.

The available instrumentation includes the measurement of the gas flow rate and its composition, as well as the partial CO₂ pressure. In addition, an on-line automatic titration sensor developed at the LBE INRA in Narbonne is also connected to the ultra-filtration loop. This titration module, named ATP_O, permits the acquisition of on-line partial and total alkalinity measurements, every 3 min if required. It also gives on-line estimates of the bicarbonate and volatile fatty acid (VFA) concentration in the output of the reactor with a high accuracy. An additional characteristic is that the maintenance requirements are totally compatible with industrial needs (only one manual operation per week). Last but not least, this sensor was proven to be very useful to achieve very good monitoring, control and diagnosis of the anaerobic digestion process (see Alcaraz-Gonzalez et al., 1999; Alcaraz-Gonzalez, Harmand, Steyer, González-Alvarez, & Rapaport, 2000a; Alcaraz-Gonzalez et al., 2000b; Bernard et al., 2000; Harmand et al., 2002 and related references). Finally, the output COD is estimated from the measurement delivered by an industrial total organic carbon (TOC) sensor. The input pH and the recirculation flow rate are locally controlled.

All these sensors are connected to an input/output device that allows the acquisition, treatment and storage of data on a PC, using the Modular SPC® software. This software, also developed by LBE-INRA in Narbonne, performs advanced control law calculations as well as process supervision (Steyer et al., 1997).

The mathematical model of the reactor for the treatment of industrial wine distillery vinasses can be

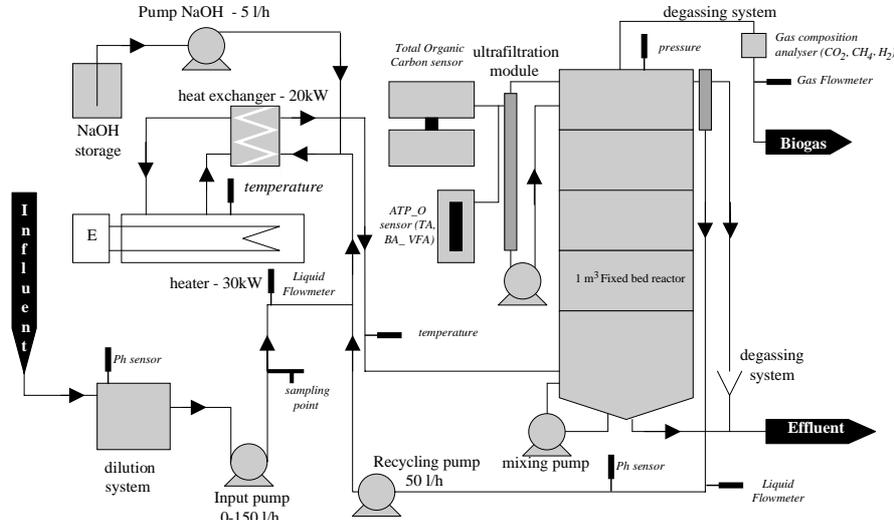


Fig. 1. Schematic representation of the plant.

written as (cf. Bernard et al., 2001 and Appendix B)

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= f(\xi(t), u(t)) + \Gamma \xi_{in}(t), \\ y(t) &= \begin{bmatrix} C \xi(t) \\ h(\xi(t)) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

where $\xi \in \mathbb{R}^6$ ($\xi = [X_1 \ X_2 \ Z \ S_1 S_2 \ C_{TI}]^T$) is the state vector, $u \in \mathbb{R}^1$ ($u = D_r$) is the control input vector, $\xi_{in} \in \mathbb{R}^3$ ($\xi_{in} = [D_r S_1^i \ D_r S_2^i \ D_r Z^i]^T$) is the unknown input vector and $y \in \mathbb{R}^5$ ($y = [S_1 \ S_2 \ Z \ Q_{CH_4} \ Q_{CO_2}]^T$) is the output vector. Γ and C are constant known matrices given by

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

and

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

$f(\cdot)$ represents the nonlinear state function and $h(\cdot)$ represents the nonlinear measurement function. X_1 , X_2 , S_1 , S_2 and C_{TI} are, respectively, the concentrations of acidogenic bacteria, methanogenic bacteria, COD, VFA and total inorganic carbon. The variable Z is a measure of the alkalinity (i.e., the chemical buffer capacity). The variable D_r is the dilution rate, and is supposed to be a persisting input. In all cases, the upper index “ i ”

indicates “influent concentration”. In the following, the total inorganic carbon influent concentration C_{TI}^i is omitted, due to its very weak influence on the anaerobic system.

In the next section, the performances of the proposed estimator are tested and evaluated over a wide range of initial conditions, covering an extensive functioning space. Both simulation and experimental results are presented.

4. Pilot plant application

4.1. Simulation results

In order to illustrate the performances of the proposed unknown input estimators, the process model has been simulated based on the different variables used in the pilot plant simulation as indicated in Fig. 2. The time evolution of the input data is showed in Fig. 3. The dilution rate D_r varies from 0.2 to around 0.8 over 35 days. Other inputs (cf. Fig. 3b–d) are presented but are

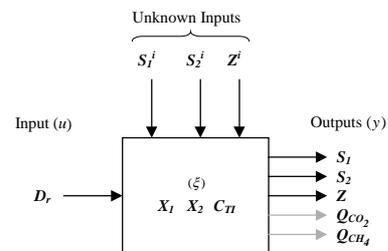


Fig. 2. Simplified diagram of the pilot plant.

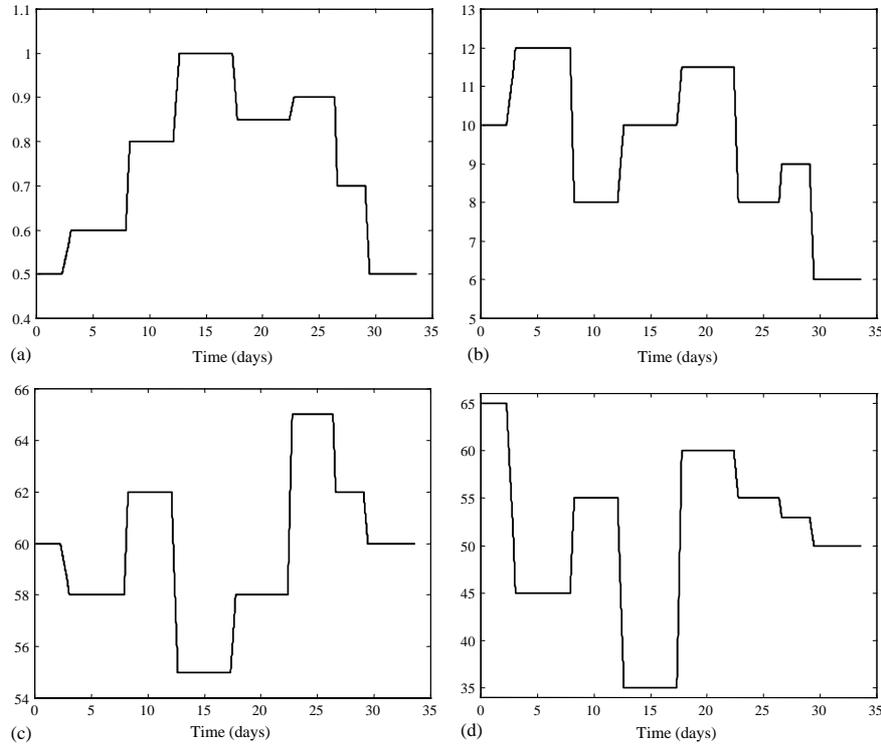


Fig. 3. Time evolution of the measured and unmeasured inputs: (a) dilution rate D_r (d^{-1}), (b) COD concentration S_1^i (g/l), (c) VFA concentration S_2^i (mmol/l), and (d) alkalinity Z (mmol/l).

considered totally unknown in Section 4.2 (in which results of the unknown input estimator are presented). Based on the previous input data, the set of outputs, resulting from the process simulation, are presented in Fig. 4.

4.2. Unknown input estimator design and simulation results

The design procedure of the unknown input estimator is presented. First, it is verified that assumptions A.1–A.4 hold for the dynamical model of the system described in Eq. (5):

- A.1. The number of unknown inputs is less than the number of outputs i.e. $m > q$.
- A.2. Unknown inputs are independent, i.e. $rank(\Gamma) = q$.
- A.3. A subset of state variables ξ is supposed to be measured on-line as

$$y(t) = \begin{bmatrix} C\xi(t) \\ h(\xi(t)) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

- A.4. $rank(C\Gamma) = rank(\Gamma) = q$.

Thus, the design steps (rigorously developed in Appendix A) can be followed:

- (1) apply a first SVD on matrix Γ to obtain a state-space equation insensitive to unknown inputs;
- (2) apply a second SVD on the constant output matrix to obtain an output vector insensitive to the state which is itself insensitive to unknown inputs;
- (3) establish a free unknown input system to estimate the sub-state vector ξ_2 .

To solve the observer design problem, a standard solution is selected according to the extended Luenberger observer. The gain matrix $\mathcal{V}(\hat{\xi}_2(t))$ is chosen so that the linearised tangent error model around $\hat{\xi}_2(t)$ and its time derivatives are bounded. Furthermore, the eigenvalues of $(\partial \hat{f}_2^* / \partial \hat{\xi}_2)(\hat{\xi}_2(t)) - \mathcal{V}(\hat{\xi}_2(t))(\partial \hat{h}_2^* / \partial \hat{\xi}_2)(\hat{\xi}_2(t))$ have strictly negative real parts. An estimation of unknown inputs $\xi_m = [D_r S_1^i \ D_r S_2^i \ D_r Z]^T$ can then be computed according to Eq. (4) using both the estimation of the state sub-vector $\hat{\xi}_2(t)$, the available measurements and their time derivatives.

The general concept of the on-line estimator of unmeasured inputs proposed in this paper is presented in Fig. 5. In order to better investigate the performances of the new proposed observer, the estimation results

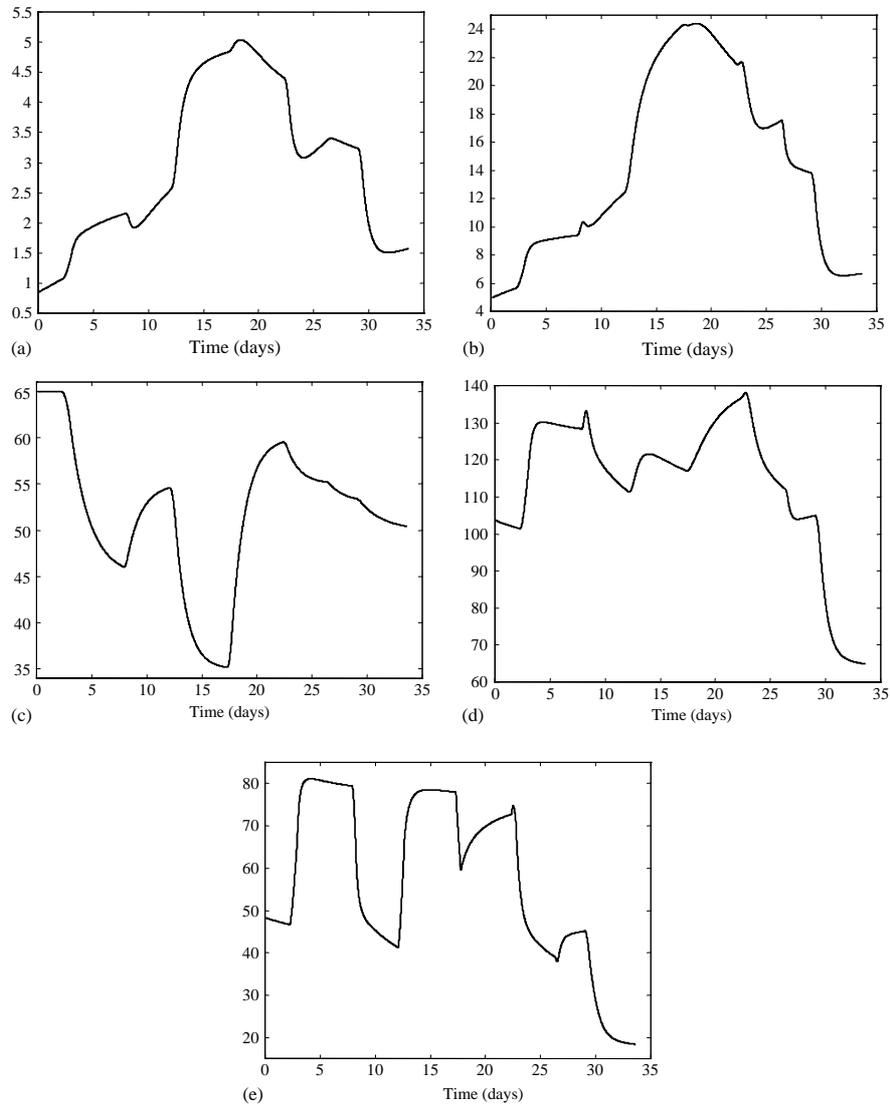


Fig. 4. Time evolution of the outputs: (a) COD concentration rate S_1 (g/l), (b) VFA concentration S_2 (mmol/l), (c) alkalinity Z (mmol/l), (d) CH_4 gas flow rate (l/h), and (e) CO_2 gas flow rate (l/h).

(both concerning the unmeasured states and inputs) are shown using two different sets of initial conditions, summarised in Table 1. Fig. 6 shows the good convergence properties of the estimator for the different initial values. The time evolution illustrates the potential of the proposed approach to estimate unmeasured states and inputs. Note that the different influent concentrations are directly calculated by dividing each component of $\hat{\xi}_{in}$ by the dilution rate D_r ($\forall t D_r \neq 0$). The computation of the norms of the estimation error for the three unknown inputs (cf. Table 2) emphasises the performances of the approach.

4.3. Experimental results

In order to investigate better the practical interest of the approach, the unknown input observer algorithm has been applied to real data. These data have been obtained from an experimental run on the real pilot plant. This experimental run was carried out over a 30-day period. The experimental on-line dilution rate is shown in Fig. 7a. The measurements of the output vector ($y = [S_1 S_2 Z Q_{\text{CH}_4} Q_{\text{CO}_2}]^T$) were performed on-line using the Modular SPC[®] software, and are not presented here. For this experimental run, off-line

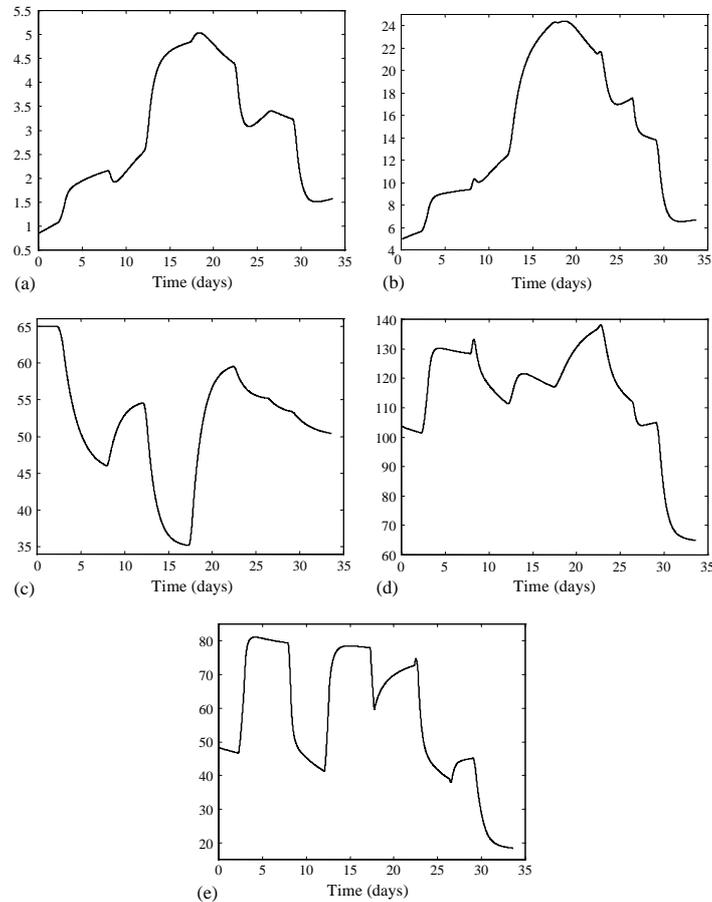


Fig. 5. General unknown input observer scheme: (a) COD concentration S_1 (g/l), (b) VFA concentration S_2 (mmol g/l), (c) alkalinity Z (mmol/l), (d) CH_4 gas flow rate (l/h), and (e) CO_2 gas flow rate (l/h).

Table 1
Initial conditions

	$X_1(0)$	$X_2(0)$	$C_{Tl}(0)$
Real system	3	0.25	60
	$\hat{X}_1(0)$	$\hat{X}_2(0)$	$\hat{C}_{Tl}(0)$
Set 1	2.5	0.5	50
Set 2	3.5	0.15	70

measurements of the unknown input concentrations were done periodically in order to validate the estimation method. These experimental off-line data are represented as small black discs in Fig. 7b–d. According to the mathematical model of the reactor (see Appendix B), the on-line estimator of unmeasured inputs runs with the experimental input data u and output data y . Experimental on-line estimation results on the unmeasured inputs are compared to off-line data and presented in the same figures (see Fig. 7b–d).

4.4. Discussion

First of all, it is to be noticed that the observer has very fast convergence properties. Whatever the variable considered, the observer exhibits very good performances. Under the assumption that the reaction rates are known, it is actually possible to estimate both the unmeasured variables (acidogenic and methanogenic biomasses and inorganic carbon concentration) and the unknown input disturbances (input COD, VFA concentrations and alkalinity). In addition, it should be underlined that the composition changes simulated in the above simulations (see Fig. 3) represent extreme cases in both magnitude and waveform (abrupt steps). Finally, note that the observer performances are comparable, whatever the uncertainty considered on the initial conditions, as presented in Fig. 6 and Table 2. It is worth noting that the sensitivity of the unknown inputs estimation to the noise measurements was not evaluated in this simulation.

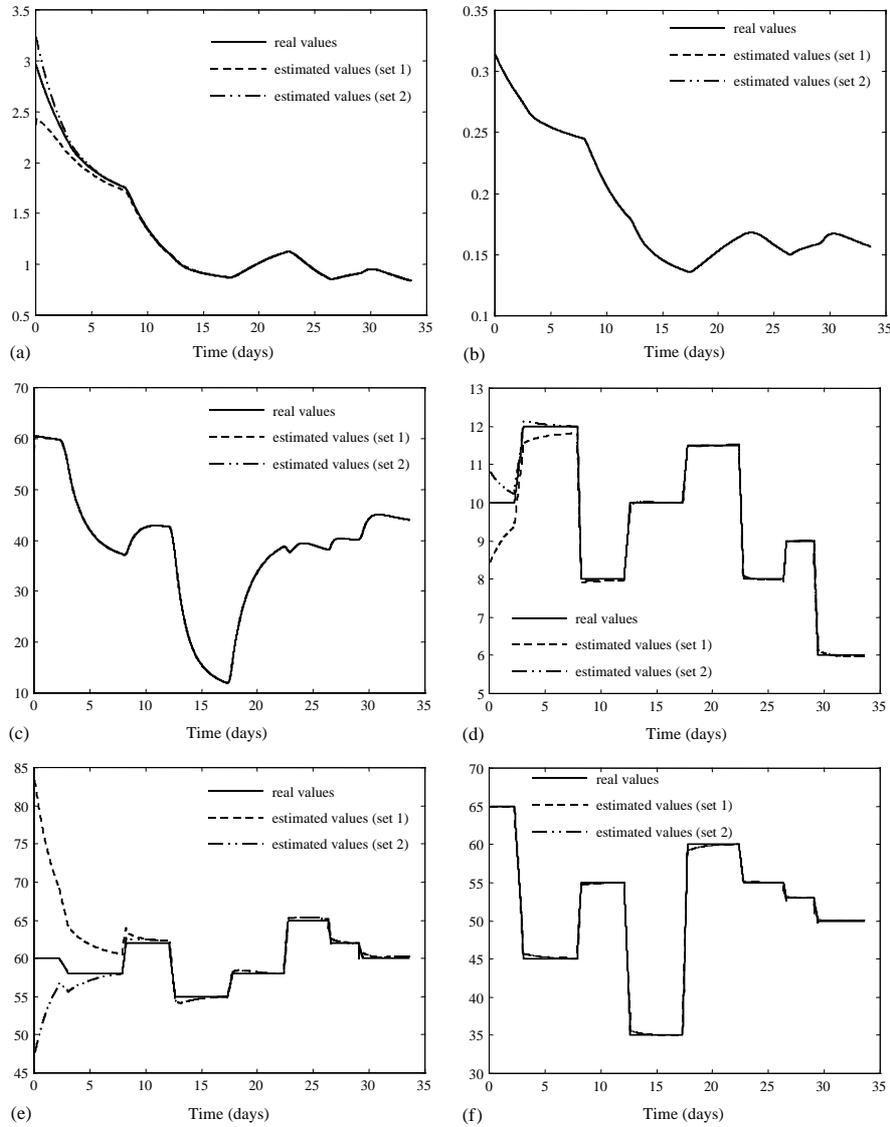


Fig. 6. Time evolution of the unmeasured states and inputs: (a) X_1 and \hat{X}_1 (g/l), (b) X_2 and \hat{X}_2 (g/l), (c) C_{TI} and \hat{C}_{TI} (g/l), (d) S_1^i and \hat{S}_1^i , (e) S_2^i and \hat{S}_2^i , and (f) Z^i and \hat{Z}^i .

Regarding the experimental results obtained, please note that the considered model is very robust in the sense that the adjustment of only a few parameters

allows it to capture the dynamics of the process. In most practical results reported in the literature about biological processes, a 20% error on measurement is something common. Here, it is particularly interesting to note that the estimation results are quite accurate (remember that we are dealing with a biological process) in the presence of noise in the dilution rate D_r . In particular, the peaks in the estimation, visible in Fig. 7b–d just before $t = 5$ days and just after $t = 15$ days, are due to abrupt variations of D_r used in the division of the estimated inputs. It should be pointed out that similar

Table 2
Norm of the estimation error

Variable	S_1^i	S_2^i	Z^i
$\|e\|_2$ Initial conditions for set 1	18.7	276.6	13.6
$\|e\|_2$ Initial conditions for set 2	8.465	128.4	13.5

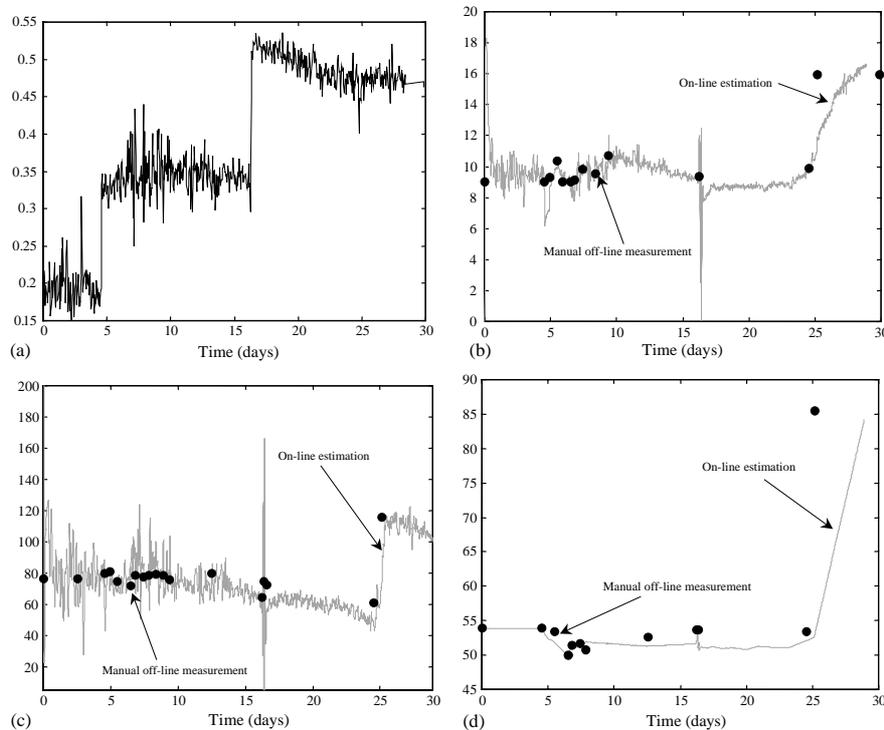


Fig. 7. Time evolution of the measured inputs and estimated/unmeasured inputs: (a) dilution rate D_r , (b) S_1^i and \hat{S}_1^{-i} , (c) S_2^i and \hat{S}_2^{-i} , and (d) Z^i and \hat{Z}^{-i} .

good results for the detection of clogging in the actual process were already obtained using the same model of Harmand et al. (2002).

From a practical point of view, it should be stressed that the obtained results are very interesting. Indeed, as pointed out in the introduction, the estimation of the input concentrations of WWTP is a very challenging problem. Remember that these systems suffer from a quasi-systematic lack of sensors and that their investment and operating costs together with the presence of suspended solids in the influent usually limit their practical implementation. The proposed approach allows the user to estimate both the biomass concentrations and the inputs of the processes, using only a limited number of on-line sensors, implemented at the exit of the process (where, if located after the settler, the suspended solid concentration should be negligible).

Moreover, this approach is particularly well suited for anaerobic digestion processes, since the additional information needed to estimate simultaneously biomass concentrations and unknown inputs come from implementable sensors, that are output gas flow rates. However, this method could certainly be applied to aerobic biological systems, assuming that a gas monitoring system is available (for example, using data from respirometers).

5. Conclusion

In this paper, an on-line estimator of unmeasured inputs for anaerobic processes has been developed. A design procedure has been given in order to establish a conventional unknown input free reduced-order system. Under some assumptions, this observer is performed in such a way that, through some co-ordinate system transformations and some substitutions, the original observer design problem of nonlinear systems with affine unknown inputs is transformed into a standard observer design problem, which can be solved using the extended Luenberger observers. The conventional unknown input free reduced-order system is used to estimate, from available on-line measurements, the state and the unmeasured inputs.

As it has been pointed out in the Introduction, the estimation of the input concentrations of wastewater treatment plants is a very challenging problem. The simulation of an anaerobic wastewater treatment plant has been used to illustrate the abilities of the developed approach. In the wastewater treatment domain, the existence conditions of the proposed method are not more restrictive than those obtained in the work of others dealing with nonlinear observer without unknown inputs, where all state variables are measured but

where the whole reaction rate vector is unknown. Future work concerns the on-line estimation of unmeasured inputs for anaerobic processes with bounded uncertainty in the reaction rate (Perrier, Feyo de Azevedo, Ferreira, & Dochain, 2000) or with a neural network model (Chen, Bernard, Bastin, & Angelov, 2000). By applying the on-line estimation of unmeasured inputs to a control loop, a considerable improvement in the control performance becomes possible, without catastrophic consequences for downstream biological processes.

Acknowledgements

The authors are grateful to the research and technical staff, and especially to Jean-Philippe Steyer for allowing them to use experimental data sets obtained at the LBE-INRA, Narbonne, France.

Appendix A

Consider the following general mathematical model:

$$\begin{aligned}\dot{\xi}(t) &= f(\xi(t), u(t)) + \Gamma \xi_{in}(t), \\ y(t) &= g(\xi(t)),\end{aligned}\quad (\text{A.1})$$

where $\xi \in \mathbb{R}^n$ is the state vector, $u \in \mathbb{R}^p$ is the control input vector, $\xi_{in} \in \mathbb{R}^q$ is the unknown input vector and $y \in \mathbb{R}^m$ is the output vector. Γ is a constant known matrix of appropriate dimension. $f(\cdot)$ represents the nonlinear state function according to (1) and $g(\cdot)$ represents the nonlinear measurement function. It can be noted that the nonlinear system can be defined as an unknown inputs affine nonlinear system where $\Gamma \xi_{in}(t)$ is equal to $F(t)$.

Assuming that Γ is a matrix of full column rank, a singular value decomposition (Golub & Loan, 1983) can be applied as

$$\Gamma = U_{\Gamma} \begin{bmatrix} S_{\Gamma} \\ [0] \end{bmatrix} V_{\Gamma}^T, \quad (\text{A.2})$$

where $U_{\Gamma} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ and $V_{\Gamma} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ are orthogonal matrices, and $S_{\Gamma} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ is a nonsingular diagonal matrix.

Using this singular value decomposition, and replacing (A.2) in (A.1) leads to

$$\begin{aligned}U_{\Gamma} \dot{\xi}(t) &= f(U_{\Gamma} \xi(t), u(t)) + U_{\Gamma} \begin{bmatrix} S_{\Gamma} \\ [0] \end{bmatrix} V_{\Gamma}^T \xi_{in}(t), \\ y(t) &= \begin{bmatrix} CU_{\Gamma} \xi(t) \\ h(U_{\Gamma} \xi(t)) \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (\text{A.3})$$

where $\xi = U_{\Gamma} \bar{\xi}$.

By premultiplying both sides of state equation by U_{Γ}^T , system (A.3) becomes

$$\begin{aligned}\dot{\bar{\xi}}(t) &= f^{\star}(\bar{\xi}(t), u(t)) + \begin{bmatrix} S_{\Gamma} \\ [0] \end{bmatrix} \bar{\xi}_{in}(t), \\ y(t) &= \begin{bmatrix} \bar{C} \bar{\xi}(t) \\ h^{\star}(\bar{\xi}(t)) \end{bmatrix},\end{aligned}\quad (\text{A.4})$$

where $\bar{\xi}_{in} = V_{\Gamma}^T \xi_{in}$, $\bar{C} = CU_{\Gamma}$, $f^{\star}(\cdot)$ and $h^{\star}(\cdot)$ represents the nonlinear functions according to the orthogonal matrix manipulation.

The previous nonlinear state equation can then be rewritten as

$$\dot{\bar{\xi}}_1(t) = f_1^{\star}(\bar{\xi}_1(t), \bar{\xi}_2(t), u(t)) + S_{\Gamma} \bar{\xi}_{in}(t), \quad (\text{A.5a})$$

$$\dot{\bar{\xi}}_2(t) = f_2^{\star}(\bar{\xi}_1(t), \bar{\xi}_2(t), u(t)) \quad (\text{A.5b})$$

with $\bar{\xi}_1 \in \mathbb{R}^q$ and $\bar{\xi}_2 \in \mathbb{R}^{n-q}$. It can be noticed that $f_1^{\star}(\cdot)$ represents the nonlinear function corresponding to the differential equation $\bar{\xi}_1$ directly involved in the unknown input $\bar{\xi}_{in}$. Hence, $f_2^{\star}(\cdot)$ represents the nonlinear function corresponding to the differential equation $\bar{\xi}_2$ independent from the unknown input $\bar{\xi}_{in}$.

Concerning the on-line output, the measurement equation of system (A.4) can be decomposed into two sub-vectors as follows:

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_1 \bar{\xi}_1(t) + \bar{C}_2 \bar{\xi}_2(t) \\ h_2^{\star}(\bar{\xi}_1(t), \bar{\xi}_2(t)) \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

where $y_1 \in \mathbb{R}^{m_c}$, $y_2 \in \mathbb{R}^{m-m_c}$, $\bar{C}_1 \in \mathbb{R}^{m_c \times q}$, $\bar{C}_2 \in \mathbb{R}^{(m-m_c) \times (n-q)}$ and $h_2^{\star}(\cdot)$ represents the nonlinear output equation associated to y_2 .

The main objective is now to establish from (A.5) and (A.6) a reduced-order state space system, insensitive to the unknown input $\bar{\xi}_{in}$ as

$$\begin{aligned}\dot{\bar{\xi}}_2 &= F(\bar{\xi}_1(t), \bar{\xi}_2(t), u(t)), \\ Y(t) &= H(\bar{\xi}_1(t), \bar{\xi}_2(t)).\end{aligned}\quad (\text{A.7})$$

In the sequel, in order to estimate $\bar{\xi}_2$, it is necessary to have some ‘‘knowledge’’ about $\bar{\xi}_1$. This requirement can be satisfied through the substitution of the first set of relation or measurement vector from (A.6). As previously, based on assumption A.4, a singular value decomposition can then be applied to matrix \bar{C}_1 :

$$\bar{C}_1 = U_{\bar{C}_1} \begin{bmatrix} S_{\bar{C}_1} \\ [0] \end{bmatrix} V_{\bar{C}_1}^T, \quad (\text{A.8})$$

where $U_{\bar{C}_1} \in \mathbb{R}^{m_c \times m_c}$ and $V_{\bar{C}_1} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ are orthogonal matrices, and $S_{\bar{C}_1} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ is a nonsingular diagonal matrix.

Let us denote $\tilde{y}_1(t) = U_{\bar{C}_1}^T y_1(t) = [\tilde{y}_{11}(t) \ \tilde{y}_{12}(t)]^T$ with $U_{\bar{C}_1} = [U_{\bar{C}_{11}} \ U_{\bar{C}_{12}}]$ which transforms the first set of

relations or measurement equation (A.6) into

$$\tilde{y}_1(t) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{11}(t) \\ \tilde{y}_{12}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{C1} V_{C1}^T \tilde{\xi}_1(t) + U_{C11}^T \tilde{C}_2 \tilde{\xi}_2(t) \\ U_{C12}^T \tilde{C}_2 \tilde{\xi}_2(t) \end{bmatrix}. \quad (\text{A.9})$$

According to the previous equations, system (A.4) can be rewritten as follows:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{\xi}}_1(t) \\ \dot{\tilde{\xi}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^*(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)) + S_F \tilde{\xi}_{in}(t) \\ f_2^*(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_{11}(t) \\ \tilde{y}_{12}(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{C1} V_{C1}^T \tilde{\xi}_1(t) + U_{C11}^T \tilde{C}_2 \tilde{\xi}_2(t) \\ U_{C12}^T \tilde{C}_2 \tilde{\xi}_2(t) \\ h_2^*(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t)) \end{bmatrix}. \quad (\text{A.10})$$

According to (A.7), a reduced-order state space system, insensitive to the unknown input $\tilde{\xi}_{in}$ can be established from (A.10) as

$$\dot{\tilde{\xi}}_2(t) = f_2^*(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)) = F(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)),$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_{12}(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{C12}^T \tilde{C}_2 \tilde{\xi}_2(t) \\ h_2^*(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t)) \end{bmatrix} = H(\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t)). \quad (\text{A.11})$$

Moreover, using the first measurement equation of (A.9), it is possible to get

$$\tilde{\xi}_1(t) = V_{C1}(S_{C1})^{-1} U_{C11}^T y_1(t) - V_{C1}(S_{C1})^{-1} U_{C11}^T \tilde{C}_2 \tilde{\xi}_2(t) = \beta y_1(t) - \gamma \tilde{\xi}_2(t), \quad (\text{A.12})$$

where $\beta = V_{C1}(S_{C1})^{-1} U_{C11}^T$ and $\gamma = V_{C1}(S_{C1})^{-1} U_{C11}^T \tilde{C}_2$. Then, the substitution of (A.12) into (A.11) gives the unknown input free subsystem:

$$\dot{\tilde{\xi}}_2(t) = F(\beta y_1(t) - \gamma \tilde{\xi}_2(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)) = \tilde{f}_2^*(y_1(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)),$$

$$Y(t) = H(\beta y_1(t) - \gamma \tilde{\xi}_2(t), \tilde{\xi}_2(t)) = \tilde{h}_2^*(y_1(t), \tilde{\xi}_2(t)). \quad (\text{A.13})$$

If the unknown input free system (A.13) is observable, a general class of state observers can be designed to reconstruct the unmeasured state variables from the measured ones, as follows:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_2(t) &= \tilde{f}_2^*(y_1(t), \hat{\xi}_2(t), u(t)) + \mathcal{V}(\hat{\xi}_2(t))[Y(t) \\ &\quad - \tilde{h}_2^*(y_1(t), \hat{\xi}_2(t))], \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

where $\hat{\xi}_2$ denotes the on-line estimate of $\tilde{\xi}_2$ and $\mathcal{V}(\hat{\xi}_2(t)) \in \mathbb{R}^{n-q \times m-m_c}$ is a gain matrix depending on $\hat{\xi}_2$. The computation of the gain matrix can be carried out so that the observation error ($e = \tilde{\xi}_2 - \hat{\xi}_2$) has desirable properties. For instance, an extended Luenberger observer can be synthesised. The reader can refer to Gauthier, Hammouri, and Othman (1992) or Busawon and Saif (1999).

Furthermore, based on the estimated state sub-vector $\hat{\xi}_2$ and (A.12), Eq. (A.5a) can be rewritten as

$$\begin{aligned} \beta \dot{y}_1(t) - \dot{\gamma} \hat{\xi}_2(t) &= f_1^*(\beta y_1(t) - \gamma \hat{\xi}_2(t), \tilde{\xi}_2(t), u(t)) + S_F \tilde{\xi}_{in}(t) \\ &= \tilde{f}_1^*(y_1(t), \hat{\xi}_2(t), u(t)) + S_F \tilde{\xi}_{in}(t). \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

Based on the matrix property S_F (see Eq. (A.2)) and the substitution established in (A.4) ($\tilde{\xi}_{in} = V_F^T$), an estimation of unknown inputs can finally be obtained as

$$\begin{aligned} \hat{\xi}_{in}(t) &= V_F(S_F)^{-1} \beta \dot{y}_1(t) - V_F(S_F)^{-1} \dot{\gamma} \hat{\xi}_2(t) \\ &\quad - V_F(S_F)^{-1} \tilde{f}_1^*(y_1(t), \hat{\xi}_2(t), u(t)). \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Appendix B

The nonlinear mass balance model of the anaerobic digestion process is given by the following ordinary differential equation system (Bernard et al., 2001):

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= (\mu_1 - \alpha D_r) X_1, \\ \dot{X}_2 &= (\mu_2 - \alpha D_2) X_2, \\ \dot{Z} &= D_r(Z^i - Z), \\ \dot{S}_1 &= D_r(S_1^i - S_1) - k_1 \mu_1 X_1, \\ \dot{S}_2 &= D_r(S_2^i - S_2) + k_2 \mu_1 X_1 - k_3 \mu_2 X_2, \\ \dot{C}_{TI} &= D_r(C_{TI}^i - C_{TI}) + k_4 \mu_1 X_1 + k_5 \mu_2 X_2 \\ &\quad + k_7(k_8 P_{CO_2} + Z - C_{TI} - S_2). \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

where X_1 , X_2 , S_1 , S_2 and C_{TI} are, respectively, the concentrations of acidogenic bacteria, methanogenic bacteria, COD, VFA and total inorganic carbon. The variable Z is a measure of the alkalinity (i.e., the chemical buffer capacity). The parameter α represents a proportionality parameter of experimental determination. The variable D_r is the dilution rate and is supposed to be a persisting input, i.e. $\int_0^\infty D_r(\tau) d\tau > 0$. In all cases, the upper index i indicates ‘‘influent concentration’’. In the following, the total inorganic carbon influent concentration C_{TI}^i is omitted due to the very weak influence on the anaerobic system.

Like in any other mass-balance model of biological processes, a nonlinear kinetic behaviour is present due to the reaction rates. These rates are given by $\mu_1 = \mu_{\max} S_1 / (K_{S1} + S_1)$ where μ_{\max} is the maximum bacterial growth rate and K_{S1} the half-saturation constant associated with the substrate S_1 and

$$\mu_2 = \mu_{2\max} \frac{S_2}{S_2 + K_{S2} + (S_2/K_{I2})^2}$$

where $\mu_{2\max}$ is the maximum bacterial growth rate without inhibition, K_{S2} and K_{I2} the saturation and inhibition constants associated with the substrate S_2 , respectively. The CO_2 partial pressure P_{CO_2} is expressed as function of the states as $P_{CO_2} =$

Table 3
Model parameters of the pilot plant (from Bernard et al., 1998)

Parameter	Meaning	Value
k_1	Yield coefficient for COD degradation	12.1 g COD/g X_1
k_2	Yield coefficient for fatty acid production	181.2 mmol VFA/g X_1
k_3	Yield coefficient for fatty acid consumption	1640 mmol VFA/g X_2
k_4	Yield coefficient for CO_2 production due to X_1	169 mmol CO_2 /g X_1
k_5	Yield coefficient for CO_2 production due to X_2	273 mmol CO_2 /g X_2
k_6	Yield coefficient for CH_4 production	1804 mmol CH_4 /g X_2
k_{La}	Liquid/gas transfer rate	200 day ⁻¹
k_H	Henry's constant	22.3 mmol CO_2 /l atm
α	Proportion of dilution rate for bacteria	0.5
$\mu_{\max 1}$	Maximum acidogenic biomass growth rate	1.25 day ⁻¹
$\mu_{\max 2}$	Maximum methanogenic biomass growth rate	0.85 day ⁻¹
K_{S1}	Saturation parameter associated with S_1	7.65 g COD/l
K_{S2}	Saturation parameter associated with S_2	18 (mmol VFA/l) ^{1/2}
K_{I1}	Inhibition constant associated with S_2	25 mmol VFA/l
P_T	Total pressure in the reactor	1.0434 atm

$(\phi - \sqrt{\phi^2 - 4k_8 P_T [\text{CO}_2]}) / 2k_8$ where $\phi = k_8 P_T + [\text{CO}_2] + k_6 \mu_2 X_2 / k_7$ and $[\text{CO}_2] = C_{TI} + S_2 - Z$.

The model takes the following classic state space representation, as defined in (1):

$$\dot{\xi} = Kr(\xi) - D\xi + F - Q, \quad (\text{B.2})$$

where

$$\xi = [X_1 \ X_2 \ Z \ S_1 \ S_2 \ C_{TI}]^T, \quad r(\xi) = \begin{bmatrix} \mu_1(\xi) X_1 \\ \mu_2(\xi) X_2 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ -k_1 & 0 \\ k_2 & -k_3 \\ k_4 & k_5 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_r Z^i \\ D_r S_1^i \\ D_r S_2^i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q_{\text{CO}_2} \end{bmatrix},$$

and

$$D = \text{diag}(\alpha D_r, \alpha D_r, D_r, D_r, D_r, D_r).$$

In this study, it can be noticed that many process variables are measured on the process. S_1 , S_2 , Z , Q_{CO_2} and Q_{CH_4} represent the measurements available on the process. The output vector is denoted y and is related to

the state of the system as follows:

$$y = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ Z \\ Q_{\text{CH}_4} \\ Q_{\text{CO}_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ Z \\ k_6 \mu_2 X_2 \\ k_{La} \left(C_{TI} + S_2 - Z - \frac{K_h P_T + C_{TI} + S_2 - Z + V k_6 \mu_2 X_2^2}{-\frac{1}{2} \left(\sqrt{(k_h P_T + C_{TI} + S_2 - Z + V k_6 \mu_2 X_2^2)^2} \right)} \right) \right) \end{bmatrix}. \quad (\text{B.3})$$

The definition of the parameters and their values are given in Table 3.

References

- Agrawal, P., & Lim, H. (1984). Analyses of various control schemes for continuous bioreactors. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 30, 61–90.
- Alcaraz-Gonzalez, V., Genovesi, A., Harmand, J., González-Alvarez, V., Rapaport, A., & Steyer, J. (1999). Robust exponential nonlinear observers for a class of lumped models useful in chemical and biochemical engineering—application to a wastewater treatment process. In *International workshop on application of interval analysis to systems and control, MISC'99*, Girona, Spain.
- Alcaraz-Gonzalez, V., Harmand, J., Steyer, J., González-Alvarez, V., & Rapaport, A. (2000a). Robust interval based siso regulation for a class of highly uncertain nonlinear systems: Application to an anaerobic reactor. In *3rd IFAC symposium on robust control design*, Prague, Czech Republic.
- Alcaraz-Gonzalez, V., Maloum, A., Harmand, J., Rapaport, A., Steyer, J., & Pelayo-Ortiz, C. (2000b). Robust interval-based siso and simo regulation for a class of highly uncertain bioreactors:

- Application to the anaerobic digestion. In *39th IEEE conference on decision and control*, Sydney, Australia.
- Andrews, J. (1994). Dynamic control of wastewater treatment plants. *Environmental Science Technology*, 28(9), 434–440.
- Aubrun, C., Harmand, J., Garnier, O., & Steyer, J. (2000). Fault detection filter design for an anaerobic digestion process. *Bioprocess Engineering*, 22(5), 413–420.
- Barnett, M., & Andrews, J. (1992). Expert system for anaerobic digestion process operation. *Journal of Environmental Engineering*, 118(6), 949–963.
- Bastin, G., & Dochain, D. (1990). *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier.
- Bastin, G., & Impe, J. V. (1995). Nonlinear and adaptive control in biotechnology: A tutorial. *European Journal of Control*, 1(37), 37–53.
- Beck, M. (1986). Identification, estimation and control of biological waste-water treatment processes. *IEE Proceedings*, 133(5), 254–264.
- Bernard, O., Dochain, D., Genovesi, A., Punal, A., Roca, E., & Perez Alvarino, D. (1998). Software sensor design for an anaerobic wastewater treatment plant. In *International workshop on decision and control in waste bioprocessing*, Montpellier, Narbonne, France.
- Bernard, O., Polit, M., Hadj-Sadok, Z., Pengov, M., Dochain, D., Estaben, M., & Labat, P. (2000). Advanced monitoring and control of anaerobic digestion treatment plants: 3. Software sensors and controllers. In *International IWA conference WATERMAT-TEX'2000*, Gent, Belgium.
- Bernard, O., Sadok, Z. H., Dochain, D., Genovesi, A., & Steyer, J. (2001). Dynamical model development and parameter identification for anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and Bioengineering*, 75, 424–439.
- Busawon, K., & Saif, M. (1999). A state observer for nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44(11), 2098–2103.
- Chen, L., Bernard, O., Bastin, G., & Angelov, P. (2000). Hybrid modelling of biotechnology processes using neural networks. *Control Engineering Practice*, 8, 821–827.
- Chen, J., & Patton, R. (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Chynoweth, D., Svoronos, S. A., Lyberatos, G., Harman, J., Pullammanappallil, P., & Owens, J. (1994). Real-time expert system control of anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 30(12), 21–29.
- Fairman, F., Mahil, S., & Luk, L. (1984). Disturbance decoupled observer design via singular value decomposition. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29(1), 84–89.
- Gauthier, J., Hammouri, H., & Othman, S. (1992). A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(6), 875–880.
- Genovesi, A., Harmand, J., & Steyer, J. P. (1999). A fuzzy logic based diagnosis system for on-line supervision of an anaerobic digester pilot-plant. *Biochemical Engineering Journal*, 3, 171–183.
- Golub, G., & Loan, C. V. (1983). *Matrix computations*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press.
- Harmand, J., Miens, F., Conte, T., Buffière, P., Gras, P., & Steyer, J. (2002). Model prediction of the clogging of an anaerobic fixed bed reactor. *Water Science and Technology*, 45(4–5), 255–262.
- Hou, M., & Müller, P. (1992). Design of observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(6), 871–875.
- Hou, M., & Müller, P. (1994). Disturbance decoupled observer design: a unified viewpoint. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(6), 1338–1341.
- Marsili-Libelli, S., & Muller, A. (1996). Adaptive fuzzy pattern recognition in the anaerobic digestion process. *Pattern Recognition Letters*, 17(6), 651–659.
- Perrier, M., Feyo de Azevedo, S., Ferreira, E., & Dochain, D. (2000). Tuning of observer-based estimators: Theory and application to the on-line estimation of kinetic parameters. *Control Engineering Practice*, 8, 377–388.
- Pullammanappallil, P., Svoronos, S., Chynoweth, D., & Lyberatos, G. (1998). Expert system for control of anaerobic digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, 58(1), 13–22.
- Shimizu, K. (1993). An overview on the control system design of bioreactors. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 50, 65–84.
- Steyer, J., Bouvier, J., Conte, T., Gras, P., & Sousbie, P. (2002). Evaluation of a 4 year experience with a fully instrumented anaerobic digestion process. *Water Science and Technology*, 45(4–5), 495–502.
- Steyer, J., Gleize, D., Bronner, C., & Moletta, R. (1997). Control-buffer: une solution à l'automatisation des procédés de dépollution (in french). *L'Eau, l'Industrie, les Nuisances*, 206, 46–49.
- Young, P. (1992). In flight dynamic checkout. *IEEE Transactions on Aerospace*, 2, 1106–1111.

[RI_5]

- **D. Theilliol**, H. Noura, J.C. Ponsart.

“Fault diagnosis and accommodation of a three-tank-system based on analytical redundancy.” *ISA Transactions*, vol. 41, n°3, pp. 365-382, 2002.

Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy

Didier Theilliol,* Hassan Noura, Jean-Christophe Ponsart

Centre de Recherche en Automatique de Nancy-CNRS UPRESA 7039, Université Henri Poincaré,
Nancy 1, BP 239-54506-Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France

(Received 20 March 2001; received in revised form 10 July 2001; accepted 16 September 2001)

Abstract

This paper investigates the application of a fault diagnosis and accommodation method to a real system composed of three tanks. The performance of a closed-loop system can be altered by the occurrence of faults which can, in some circumstances, cause serious damage on the system. The research goal is to prevent the system deterioration by developing a controller that has some capabilities to compensate for faults, that is, the fault accommodation or fault-tolerant control. In this paper, a two-step scheme composed of a fault detection, isolation and estimation module, and a control compensation module is presented. The main contribution is to develop a unique structured residual generator able to isolate and estimate both sensor and actuator faults. This estimation is of paramount importance to compensate for these faults and to preserve the system performances. The application of this method to the three-tank system gives encouraging results which are presented and commented on in case of various kinds of faults. © 2002 ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Keywords: Fault diagnosis; Fault accommodation; Unknown input observers; Three-tank system

1. Introduction and problem statement

With the growing complexity of modern engineering systems and ever increasing demand for safety and reliability, there has been great interest in the development of fault detection and isolation methods. There exists a great body of literature dealing with practical and theoretical aspects of fault detection and isolation methods using different techniques [1–4]. A short historical view on this development can be seen in Isermann and Ballé [5]. The essence of such algorithms is to take measurements from the process (usually the already existing measurements used for control purposes) to detect the presence of any failure and

to locate the malfunctioning part. Any kind of malfunction or degradation in a plant can lead to a reduction in performances or loss of important functions, impairing the safety and the availability of the plant. Therefore the consideration of a fault accommodation strategy can be motivated by the adjustment or the on-line modification of the nominal control law in order to maintain the safety of the operators and the reliability of the process. Over the last decades, much research has dealt with the fault accommodation problem. The survey paper of Patton [6] gives the state of the art in the field of the fault accommodation or fault tolerant control, and a general approach of fault tolerant control has been presented by Noura *et al.* [7].

Fault diagnosis of industrial systems has been an object of many publications as defined in Refs. [8–11]. Various fault detection and isolation meth-

*Fax: +33 383 912 030; E-mail address:
didier.theilliol@cran.uhp-nancy.fr

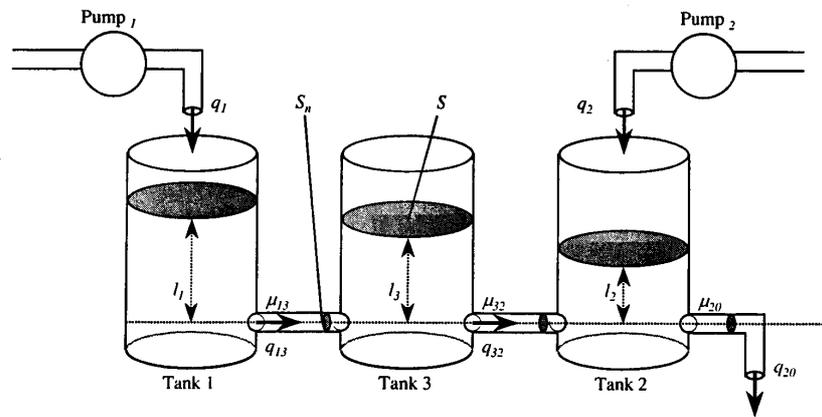


Fig. 1. Diagram of the three-tank system.

ods have already been applied to these systems, but fault accommodation techniques have been rarely considered. That is why this paper is devoted to the complete design of fault diagnosis and accommodation scheme in closed-loop control of a three-tank system. The purpose is to show the performance of this scheme on real measurements and not only in simulation. This paper deals with sensor and actuator faults, because the diagnostic system should diagnose all kinds of faults. Sensors and actuators are critical components in almost all modern engineering systems. Faults can be amplified by the closed-loop control systems and can develop into malfunction of the loop. Various studies dealing with sensor and actuator fault accommodation are based on hardware or analytical redundancy. The hardware redundancy technique consists of switching from the failed part of the process to another achieving the same task [12]. The analytical redundancy [13–16] is an alternative to solve the fault accommodation problem avoiding the disadvantages of the hardware redundancy such as high cost and space. The proposed approach is based on the on-line fault detection, isolation and estimation of a quantity representing the fault effect on the system, and the computation of a new control law different from the nominal one in order to compensate for this fault effect and to maintain the system outputs to their nominal values.

The paper is organized as follows. Section 2 presents the three-tank system used to illustrate the performance of the fault diagnosis and accom-

modation method. The consequences of sensor and actuator faults on the three-tank system are illustrated in closed loop. The next section is devoted to the strategy of fault diagnosis based on unknown input observers used to detect, isolate, and estimate the faults. The results of the strategy on the three-tank system are also presented. In Sec. 4, the objectives of the presented fault accommodation method are indicated. A new control law, that aims at reducing or annihilating the fault effect on the system outputs, is discussed. Finally, concluding remarks are given.

2. Three-tank system

In this section, the three-tank system is described. The control law and the influence of the sensor and actuator faults are analyzed.

2.1. Process description

The system under consideration is a pilot plant composed of three identical cylindrical tanks with a cross section S [17]. A schematic diagram of the considered system is shown in Fig. 1. The tanks are coupled by two connecting cylindrical pipes with a cross section S_n and an outflow coefficient $\mu_{13} = \mu_{32}$. The nominal outflow is located at tank 2; it also has a circular cross section S_n and an outflow coefficient μ_{20} .

The experimental plant is equipped with sensors and actuators that communicate via a data acquisition card (DAC6214) with a personnel computer.

Table 1
Parameter values of the three tank system.

Variable	Symbol	Value
Tank cross sectional area	S	0.0154 m^2
Inter tank cross sectional area	S_n	$5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Outflow coefficient	$\mu_{13} = \mu_{32}$	0.5
	μ_{20}	0.6
Maximum flow rate	$q_{i \max} (i \in [1 \ 2])$	$1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Maximum level	$l_{j \max} (j \in [1 \ 2 \ 3])$	0.62 m

Two pumps driven by dc motors supply tanks 1 and 2. Pump flow rates q_1 and q_2 are defined by the calculation of flow per rotation. Two D/A converters with a voltage range from -10 to $+10$ V are used to control the pumps. The highest possible flow rate of pump i is denoted by $q_{i \max}$. Finally, piezoresistive differential pressure sensors carry out the necessary level measurements. The three transducers deliver a voltage signal between -10 and $+10$ V. The variable l_j denotes the level in tank j , and $l_{j \max}$, the highest possible liquid level.

Using the mass balance equations, the system can be described by the following equations:

$$\begin{aligned} S \frac{dl_1(t)}{dt} &= q_1(t) - q_{13}(t), \\ S \frac{dl_2(t)}{dt} &= q_2(t) + q_{32}(t) - q_{20}(t), \\ S \frac{dl_3(t)}{dt} &= q_{13}(t) - q_{32}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

where q_{13} represents the water flow-rate from tank 1 to tank 3, q_{32} represents the water flow-rate from tank 3 to tank 2, and q_{20} represents the outflow rate. These unmeasured flow rates can be determined using the Torricelli-rule as

$$\begin{aligned} q_{13}(t) &= \mu_{13} S_n \operatorname{sgn}[l_1(t) - l_3(t)] \\ &\quad \times \sqrt{2g|l_1(t) - l_3(t)|}, \\ q_{32}(t) &= \mu_{32} S_n \operatorname{sgn}[l_3(t) - l_2(t)] \\ &\quad \times \sqrt{2g|l_3(t) - l_2(t)|}, \\ q_{20}(t) &= \mu_{20} S_n \sqrt{2gl_2(t)}. \end{aligned} \quad (2)$$

The numerical values of the plant parameters are listed in Table 1.

According to Eqs. (1) and (2), the system can be written in the nonlinear state space:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\mathbf{x}}(t)}{dt} &= f(\bar{\mathbf{x}}(t), \bar{\mathbf{u}}(t)), \\ \bar{\mathbf{y}}(t) &= \bar{\mathbf{x}}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

where $\bar{\mathbf{y}} = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$ is the output vector, and $\bar{\mathbf{u}} = [q_1 \ q_2]^T$ is the input vector.

The process is used in closed loop. The volume flows of lateral tanks (q_1 and q_2) are controlled such that the liquid levels in the corresponding tanks (l_1 and l_2) can be independently assigned. The third output of the process, level l_3 in the middle tank, is uncontrollable. The purpose is to control the system around an operating point $(\bar{\mathbf{u}}_0, \bar{\mathbf{y}}_0)$, which is fixed to

$$\bar{\mathbf{u}}_0 = [0.35 \ 0.375]^T 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

and

$$\bar{\mathbf{y}}_0 = [0.40 \ 0.295 \ 0.20]^T \text{ m}. \quad (4)$$

The system is linearized around this operating point using a Taylor expansion. The linearized system is described by a discrete linear state space representation with a sampling period $T_s = 1$ s as

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (5)$$

where $\mathbf{y} = \bar{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{y}}_0$, $\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_0$, $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} - \bar{\mathbf{u}}_0$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.9880 & 0.0001 & 0.0109 \\ 0.0001 & 0.9778 & 0.0114 \\ 0.0109 & 0.0114 & 0.9776 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 64.576 & 0.0014 \\ 0.0014 & 64.212 \\ 0.3571 & 0.3721 \end{bmatrix}.$$

2.2. Tracking system design

The study considered in this paper is suitable not only in regulation, but also in the tracking control problem where outputs are required to track reference inputs. Consider the discrete linear system given by the following state space representation:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (6)$$

where $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$, and $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ are, respectively, the state, the control, and the output matrices. $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ is the state vector, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ is the control input vector, and $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ is the output vector.

In order to maintain controllability, the number of outputs that can track a reference input vector, \mathbf{y}_r , cannot exceed the number of control inputs [18]. Thus in the open-loop system given by Eq. (6), the output equation can be rewritten as

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(k) \\ \mathbf{y}_2(k) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

where $\mathbf{y}_1 \in \mathbb{R}^h$ ($h \leq p$) represents the vector of the outputs that are required to follow the reference input vector \mathbf{y}_r . The feedback controller is required to cause the output vector \mathbf{y}_1 to track the reference input vector \mathbf{y}_r in the sense that the steady state response is

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \mathbf{y}_1(k) = \mathbf{y}_r(k). \quad (8)$$

To achieve this task, a method consists of adding a vector comparator and integrator ($\mathbf{z} \in \mathbb{R}^h$) that satisfies:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(k+1) &= \mathbf{z}(k) + T_s[\mathbf{y}_r(k) - \mathbf{y}_1(k)] \\ &= \mathbf{z}(k) + T_s[\mathbf{y}_r(k) - \mathbf{C}_1\mathbf{x}(k)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Therefore the open-loop system is governed by the augmented state space representation:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}(k+1) &= \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{u}(k) + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{y}_r(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}(k), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{with } \tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T \ \mathbf{z}^T]^T, \quad \tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -T_s\mathbf{C}_1 & \mathbf{I} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ T_s\mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \text{and } \tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \ \mathbf{0}].$$

The state feedback control law is computed by

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= -\tilde{\mathbf{K}}\tilde{\mathbf{x}}(k) = -\mathbf{K}_1\mathbf{x}(k) - \mathbf{K}_2\mathbf{z}(k) \\ &= -[\mathbf{K}_1 \ \mathbf{K}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{z}(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

In this application, matrix \mathbf{C} is an identity matrix: the outputs are the state variables. In opposite case, the control law could be computed using the estimated state variables obtained, for instance, by a Kalman filter.

2.3. General actuator and sensor fault representation

In this paper, various additive and/or multiplicative faults, which can affect a system due to abnormal operation or to material aging, are considered. This paper deals with sensor or actuator faults described in Ref. [19]. The fault diagnosis and accommodation of component faults were already considered in previous work [20].

In the presence of a sensor fault, the faulty output can be written as

$$y_j^f(k) = \beta_j y_j(k) + y_{j0}, \quad (12)$$

where y_j and y_j^f denote the j th nominal and faulty sensor, respectively. y_{j0} represents a constant offset and $0 \leq \beta_j \leq 1$ corresponds to a gain degradation of the j th sensor.

Similar to the sensor fault representation, an actuator fault can be represented by additive and/or multiplicative faults as follows:

$$u_i^f(k) = \alpha_i u_i(k) + u_{i0}, \quad (13)$$

where u_i and u_i^f represent the normal and fault control actions of the i th actuator, respectively. u_{i0} denotes a constant offset and $0 \leq \alpha_i \leq 1$ denotes a gain degradation of the i th actuator. Various types of failures, defined in the framework of model based fault diagnosis, are included in the sensor (12) or actuator (13) fault representation and summarized in Table 2.

Using the representations (12) and (13), the state space description of the system, defined in Eq. (6) becomes

Table 2
Different types of failures.

	Constant offset =0	Constant offset≠0
Gain degradation =1	fault free case	bias
Gain degradation ∈]0|1[	loss of effectiveness	loss of effectiveness
Gain degradation =0	out of order	freezing

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}\mathbf{f}_a(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{f}_s(k), \end{aligned} \quad (14)$$

where $\mathbf{f}_a \in \mathbb{R}^p$ represents the actuator fault vector and $\mathbf{f}_s \in \mathbb{R}^m$ denotes the sensor fault vector. These faults are assumed to be completely unknown.

In the presence of sensor and actuator faults, system (14) can also be represented by the unified general formulation:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_x\mathbf{f}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_y\mathbf{f}(k), \end{aligned} \quad (15)$$

where $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_a^T \mathbf{f}_s^T]^T \in \mathbb{R}^v$ ($v = p + m$) is a common representation of sensor and actuator faults. $\mathbf{F}_x \in \mathbb{R}^{n \times v}$ and $\mathbf{F}_y \in \mathbb{R}^{m \times v}$ are, respectively, the actuator and sensor faults matrices with $\mathbf{F}_x = [\mathbf{B} \mathbf{0}_{n \times m}]$ and $\mathbf{F}_y = [\mathbf{0}_{m \times p} \mathbf{I}_m]$.

2.4. Application results

Levels l_1 and l_2 have to follow reference input vector $\mathbf{y}_r \in \mathbb{R}^2$ ($\mathbf{y}_r = [y_{r1}, y_{r2}]^T$). These outputs are controlled using the multivariable control law described in Sec. 2.2. The control matrix pair $(\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}})$ of the augmented plant is controllable, and the feedback gain matrix $\tilde{\mathbf{K}}$ is computed by pole placement. The control law has been written in C code and implemented on a PC with a sampling period equal to 1 s. The eigenvalues of the closed-loop augmented system (10), chosen to be equal to [0.92 0.97 0.90 0.95 0.94], lead to the following feedback gain matrix:

$$\tilde{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} 21.6 & 3 & -5 & -0.95 & -0.32 \\ 2.9 & 19 & -4 & -0.3 & -0.91 \end{bmatrix} 10^{-4}. \quad (16)$$

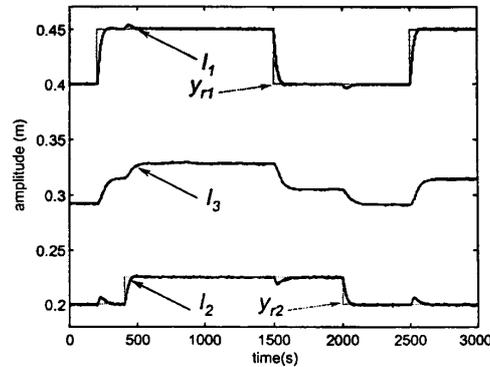


Fig. 2. Nominal system outputs.

2.4.1. Fault-free case

The validation of the tracking control with the linearized model is shown in Figs. 2 and 3 where step responses with respect to set-point changes are considered for a range of 3000 s. Reference inputs \mathbf{y}_r are step changes of 12.5% for l_1 and l_2 of their corresponding operating values. The dynamic responses demonstrate that a tracker is synthesized correctly (see Fig. 2). Fig. 3 shows the corresponding control inputs for step changes in the reference inputs.

2.4.2. Sensor fault case

The consequence of a sensor fault is illustrated through two experiments. First, a constant offset on level sensor l_1 has been created and added at instant 1000 s ($\beta_1 = 1$ and $y_{10} = -0.03$ m). This bias can be observed in Fig. 4. The control law

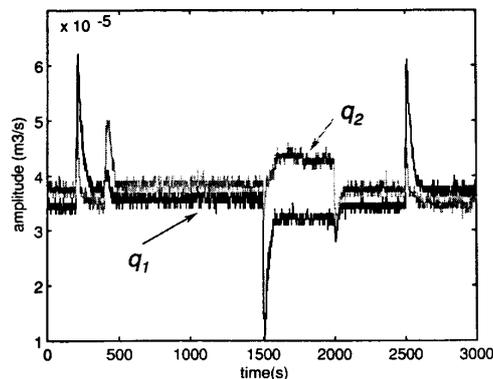


Fig. 3. Nominal control inputs.

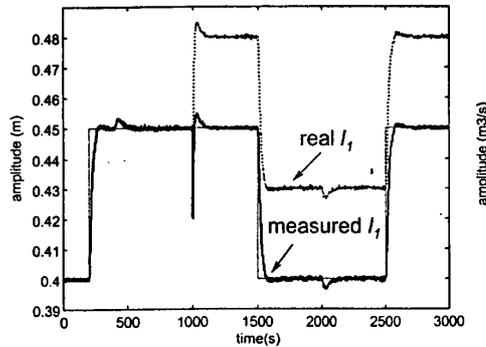


Fig. 4. Level l_1 with a bias in sensor l_1 .

tries to cancel the static error created by the corrupted output. Consequently, the real output is different from the reference input and the control law is different from its nominal value, as illustrated in Fig. 5.

In a second experiment, a severe fault is also tested when level sensor l_1 is out of order at instant 1000 s, i.e., the measured level l_1 is equal to zero ($\beta_1=0$ and $y_{10}=0$). In the presence of such a fault, level l_1 increases dangerously and reaches its physical limitation (see Fig. 6). The fault influence on levels l_2 and l_3 can be observed in Fig. 7. Thus the process cannot run safely and it must be stopped.

2.4.3. Actuator fault case

Then, in a similar way, an actuator fault has been applied. A gain degradation of pump 1

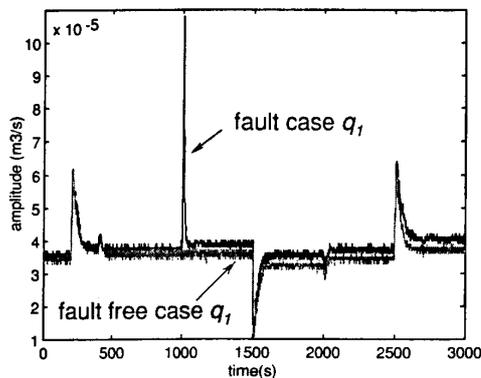


Fig. 5. Flow rate q_1 with a bias in sensor l_1 .

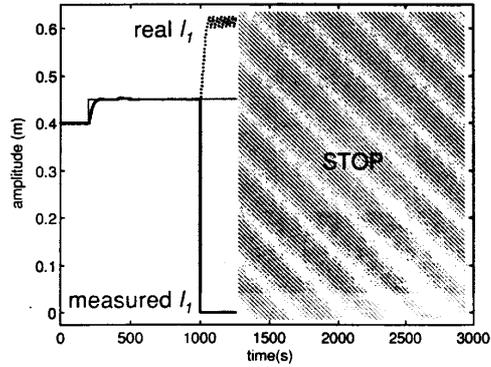


Fig. 6. Level l_1 with sensor l_1 out of order.

(clogged or rusty pump,...) is considered and appears abruptly at instant 1000 s on the system. To do so without breaking the system, the control input applied to the system is equal to the control input computed by the controller multiplied by a constant system ($\alpha_1=0.2$ and $u_{10}=0$). Since an actuator fault acts on the system as a perturbation, and due to the presence of the integral error in the controller, the system outputs reach again their nominal values (see Fig. 8). With this controller, the dynamic behavior of level l_2 is also affected by this fault as illustrated in Fig. 9.

Then, a complete loss of pump 1 is tested. This fault is achieved by switching off pump 1 at instant 1300 s, that is $\alpha_1=0$ and $u_{10}=0$. Figs. 10 and 11 show the dynamic behavior of the system

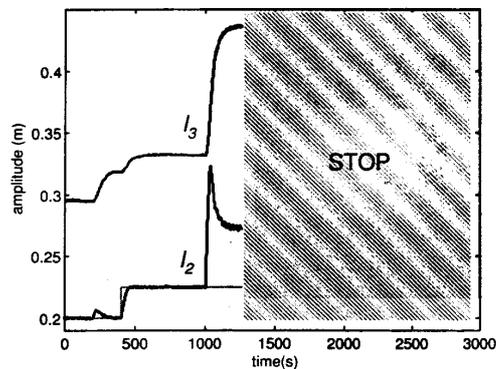


Fig. 7. Levels l_2 and l_3 with sensor l_1 out of order.

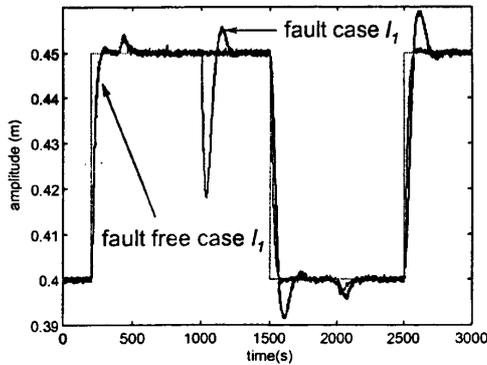


Fig. 8. Level l_1 with fault on pump 1.

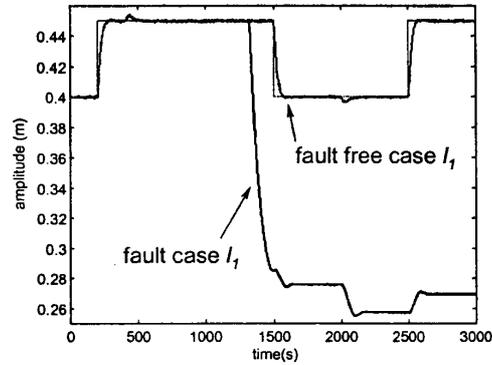


Fig. 10. Level l_1 with pump 1 out of order.

controlled outputs. It can be easily seen that the control law is unable to maintain the nominal performances.

As shown in the previous results, the presence of such faults may lead to a performance deterioration, instability of the system or the loss of the process. To ensure the control objective, a model based fault diagnosis is developed to detect, isolate, and estimate the fault magnitude. Moreover, a fault detection, isolation and estimation module will be used in an intelligent control scheme in order to provide to operators an information about the occurrence of a possible fault.

3. Fault detection, isolation, and estimation

3.1. From basic principles to a unified approach

The aim of a diagnosis procedure is to perform two main decision tasks: fault detection, consist-

ing of deciding whether a fault has occurred or not, and fault isolation, consisting of deciding which element of the system has failed. The general procedure comprises the following three steps.

Residual generation: the process of associating, with the pair model observation, features that allow us to evaluate the difference with respect to normal operating conditions.

Residual evaluation: the process of comparing residuals to some predefined thresholds according to a test and at a stage where symptoms are produced.

Decision making: the process of deciding, based on the symptoms, which elements are faulty (i.e., isolation).

This implies the design of residuals that are close to zero in the fault-free situations while

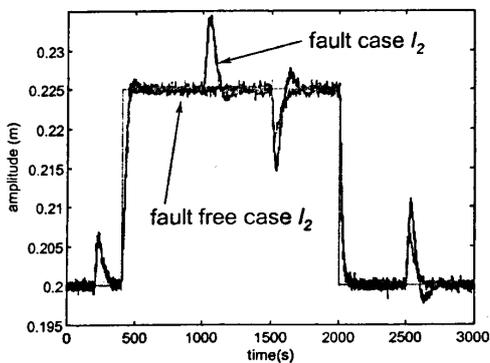


Fig. 9. Level l_2 with fault on pump 1.

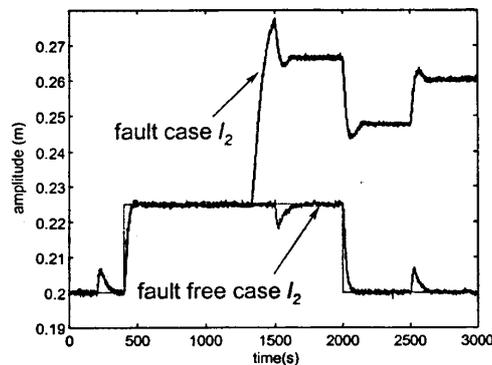


Fig. 11. Level l_2 with pump 1 out of order.

clearly deviating from zero in the presence of faults and that possess the ability to discriminate between all possible modes of faults, which explains the use of the term isolation. The fault detection and isolation (FDI) module can also be exploited in order to estimate the fault magnitude.

For this purpose, let us review the general system description given by Eq. (15) in the presence of sensor and actuator faults:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_x \mathbf{f}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_y \mathbf{f}(k). \end{aligned} \quad (17)$$

The objective is to isolate faults. This is achieved by generating structured residuals sensitive to certain faults and insensitive to others. The fault vector \mathbf{f} in Eq. (17) can be split into two parts. The first part contains the d faults to be isolated $\mathbf{f}^o \in \mathbb{R}^d$. In the second part, the other $v-d$ faults are gathered in a vector $\mathbf{f}^* \in \mathbb{R}^{v-d}$. Then, the system can be written under the following form:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_x^o \mathbf{f}^o(k) + \mathbf{F}_x^* \mathbf{f}^*(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_y^o \mathbf{f}^o(k) + \mathbf{F}_y^* \mathbf{f}^*(k). \end{aligned} \quad (18)$$

Matrices \mathbf{F}_x^o , \mathbf{F}_x^* , \mathbf{F}_y^o , and \mathbf{F}_y^* , assumed to be known, characterize the distribution matrices of \mathbf{f}^* and \mathbf{f}^o acting directly on the system dynamics and on the measurements, respectively.

In this paper, a diagnosis procedure is developed to make possible the detection and isolation of a particular fault among several others. While a single residual is sufficient to detect a fault, a set of structured residuals is required for fault isolation. Several approaches have been suggested by Chen and Patton [1], Frank [2], and Gertler [4] to generate structured residuals. Here, a residual generation using unknown input observer scheme is considered in order to be sensitive to fault vector \mathbf{f}^* and insensitive to \mathbf{f}^o . In this paper, only a single fault (actuator or sensor fault) may occur at a given time, because simultaneous faults are hardly *isolable*. Hence vector \mathbf{f}^o is a scalar ($d=1$) and it is considered as an unknown input.

In this context, and according to Hou and Muller [21], the necessary condition of the existence of an unknown input decoupled observer is fulfilled: the number of unknown inputs must not be greater than the number of measurements ($d=1 \leq m$).

In case of an i th actuator fault, the system can be represented according to Eq. (18) by

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ &\quad + \mathbf{B}_i f^o(k) + [\bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{0}_{n \times m}] \mathbf{f}^*(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + [\mathbf{0}_{m \times (p-1)} \mathbf{I}_m] \mathbf{f}^*(k), \end{aligned} \quad (19)$$

where \mathbf{B}_i is the i th column of matrix \mathbf{B} and $\bar{\mathbf{B}}_i$ is matrix \mathbf{B} without the i th column.

In the same spirit, for a j th sensor fault, the system is described as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + [\mathbf{B} \mathbf{0}_{n \times (m-1)}] \mathbf{f}^*(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{E}_j f^o(k) + [\mathbf{0}_{m \times p} \bar{\mathbf{E}}_j] \mathbf{f}^*(k), \end{aligned} \quad (20)$$

where $\mathbf{E}_j = [0 \cdots 1 \cdots 0]^T$ represents the j th sensor fault effect on the output vector and $\bar{\mathbf{E}}_j$ is the identity matrix without the j th column.

According to Park *et al.* [22], a system affected by a sensor fault can be written as a system represented by an actuator fault. Assume the dynamic of a sensor fault described as

$$f^o(k+1) = f^o(k) + T_s \xi(k), \quad (21)$$

where ξ defines the sensor error input and T_s is the sampling period.

From Eqs. (20) and (21), a new system representation including this auxiliary state can be introduced:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ f^o(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0}_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ f^o(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0}_{1 \times p} \end{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ &\quad + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} \\ T_s \end{bmatrix} \xi(k) \\ &\quad + \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0}_{n \times (m-1)} \\ \mathbf{0}_{1 \times p} & \mathbf{0}_{1 \times (m-1)} \end{bmatrix} \mathbf{f}^*(k), \\ \mathbf{y}(k) &= [\mathbf{C} \ \mathbf{E}_j] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ f^o(k) \end{bmatrix} + [\mathbf{0}_{m \times p} \ \bar{\mathbf{E}}_j] \mathbf{f}^*(k). \end{aligned} \quad (22)$$

Consequently, for actuator or sensor faults representation [Eqs. (19) and (22)], a unique state space representation can be established to describe the faulty system as follows:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}_d \mathbf{f}_d(k) + \mathbf{F}_x^* \mathbf{f}^*(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_y^* \mathbf{f}^*(k), \end{aligned} \quad (23)$$

where \mathbf{f}_d is the unknown input vector.

Table 3
Inference matrix.

$S(\mathbf{r})$	No. faults	S_{ref,f_1}	S_{ref,f_2}	...	$S_{\text{ref},f_{p+m}}$	Other faults
$S(\|\mathbf{r}_1\|)$	0	0	1	...	1	1
$S(\|\mathbf{r}_2\|)$	0	1	0	...	1	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$S(\|\mathbf{r}_{p+m}\|)$	0	1	1	...	0	1

3.1.1. A unified unknown input observer

Based on the previous representation, the theory and the design of unknown input observers, developed in the book of Chen and Patton [1], can be applied. A full-order observer is established:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}(k+1) &= \mathbf{F}\mathbf{w}(k) + \mathbf{T}\mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{K}\mathbf{y}(k), \\ \hat{\mathbf{x}}(k) &= \mathbf{w}(k) + \mathbf{H}\mathbf{y}(k), \end{aligned} \quad (24)$$

where $\hat{\mathbf{x}}$ is the estimated state vector and \mathbf{w} is the state of this full-order observer. \mathbf{F} , \mathbf{T} , \mathbf{K} , and \mathbf{H} are matrices to be designed for achieving unknown input decoupling requirements. That is to say, the state estimation error vector ($\mathbf{e} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}$) of the observer goes to zero asymptotically, regardless of the presence of the unknown input in the system. The design of the unknown input observer is achieved by solving the following equations:

$$(\mathbf{H}\mathbf{C} - \mathbf{I})\mathbf{F}_d = \mathbf{0}, \quad (25)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{I} - \mathbf{H}\mathbf{C}, \quad (26)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C}\mathbf{A} - \mathbf{K}_1\mathbf{C}, \quad (27)$$

$$\mathbf{K}_2 = \mathbf{F}\mathbf{H}, \quad (28)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2, \quad (29)$$

and \mathbf{F} must be a stable matrix.

The system defined by Eq. (24) is an unknown input observer for the system defined by Eq. (23) if the necessary and sufficient conditions are established:

- (i) $\text{rank}(\mathbf{C}\mathbf{F}_d) = \text{rank}(\mathbf{F}_d)$,
- (ii) $(\mathbf{C}, \mathbf{A}_1)$ is a detectable pair, where $\mathbf{A}_1 = \mathbf{F} + \mathbf{K}_1\mathbf{C}$.

If these conditions are fulfilled, an unknown input observer provides an estimation of the state vector, used to generate a residual vector $\mathbf{r}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k)$ independent of $\mathbf{f}_d(k)$. This means that

$\mathbf{r}(k) = \mathbf{0}$ if $\mathbf{f}^*(k) = \mathbf{0}$ and $\mathbf{r}(k) \neq \mathbf{0}$ if $\mathbf{f}^*(k) \neq \mathbf{0}$ whatever $\mathbf{u}(k)$ and $\mathbf{f}_d(k)$.

3.1.2. Fault isolation

For the fault isolation, a bank of $v = p + m$ unknown input observers is established. Each residual vector \mathbf{r}_j ($j = [1 \dots v]$), produced by the j th unknown input observer, may be used to detect a fault according to a statistical test. Consequently, it involves the use of statistical tests such as the Page Hinkley test, limit checking test, generalized likelihood ratio test, and trend analysis test [23]. An output vector of the statistical test, called the coherence vector $\mathbf{S}[\mathbf{r}(k)]$, can then be built from the bank of $p + m$ residual generators:

$$\mathbf{S}[\mathbf{r}(k)] = \{S[\|\mathbf{r}_1(k)\|] \cdots S[\|\mathbf{r}_{p+m}(k)\|]\}^T, \quad (30)$$

where $S(\|\mathbf{r}_j\|)$ represents a symptom associated to the norm of the residual vector \mathbf{r}_j . It is equal to zero in the fault free case and set to one when a fault is detected.

The coherence vector is then compared to the fault signature vector $\mathbf{S}_{\text{ref},f_j}$ associated to the j th fault according to the residual generators built to produce a signal sensitive to all faults except one as represented in Table 3.

Decision-making is then realized according to an elementary logic test [24] that can be described as follows: an indicator $I(f_j)$ is equal to 1 if $\mathbf{S}(\mathbf{r})$ is equal to the j th column of the incidence matrix ($\mathbf{S}_{\text{ref},f_j}$) and is equal to zero otherwise. The element associated with the indicator equal to one is then declared to be faulty.

3.1.3. Fault estimation

According to the fault isolation, the fault magnitude estimation of the corrupted element is extracted directly from the j th unknown input ob-

Table 4

Inference matrix of the three-tank system. $S(\|r_{\sigma_i}\|)$ represents the symptom obtained from the evaluation of residual r_{σ_i} and $S_{ref,f\sigma_i}$ represents the fault signature associated with the i th actuator for $\sigma=u$ and the i th sensor for $\sigma=y$.

$S(r)$	$S_{ref,no\ fault}$	S_{ref,fu_1}	S_{ref,fu_2}	S_{ref,fy_1}	S_{ref,fy_2}	S_{ref,fy_3}
$S(\|r_{u_1}\|)$	0	0	1	1	1	1
$S(\|r_{u_2}\|)$	0	1	0	1	1	1
$S(\|r_{y_1}\|)$	0	1	1	0	1	1
$S(\|r_{y_2}\|)$	0	1	1	1	0	1
$S(\|r_{y_3}\|)$	0	1	1	1	1	0

server which is built to be insensitive to the j th fault [$f^*(k)=0$]. Based on the unknown input observer, the substitution of the state estimation in the faulty description (23) leads to

$$F_d f_d(k) = \hat{x}(k+1) - A\hat{x}(k) - Bu(k). \quad (31)$$

In the presence of an actuator fault, F_d is a matrix of full column rank. Thus the estimation of the fault magnitude $\hat{f}^o(k) = \hat{f}_d(k)$ makes use of the singular-value decomposition (SVD) [25].

Let $F_d = U \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} V^T$ be the SVD of F_d . Thus R is a diagonal and nonsingular matrix and U and V are orthogonal matrices.

Using this SVD and replacing in Eq. (31) leads to

$$\bar{x}(k+1) = \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{B}u(k) + \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} V^T f_d(k), \quad (32)$$

where

$$\hat{x}(k) = U\bar{x}(k) = U \begin{bmatrix} \bar{x}_1(k) \\ \bar{x}_2(k) \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$\bar{A} = U^{-1}AU = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

$$\bar{B} = U^{-1}B = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Based on Eq. (32), the estimation of the actuator fault magnitude is defined as

$$\begin{aligned} \hat{f}^o(k) &= \hat{f}_d(k) \\ &= VR^{-1}[\bar{x}_1(k+1) - \bar{A}_{11}\bar{x}_1(k) \\ &\quad - \bar{A}_{12}\bar{x}_2(k) - \bar{B}_1u(k)]. \end{aligned} \quad (36)$$

For a sensor fault, the fault estimation $\hat{f}^o(k)$ is the last component of the estimated augmented state vector $\hat{x}(k)$ as defined in Eq. (22).

3.2. Application results

The application of the previous FDI method to the three-tank system requires the design of a bank of five ($p=2+m=3$) unknown input observers. The bank is set up in order to produce five residuals vectors: two of them (noted r_{u_i}) are generated using Eq. (19) and the three others (noted r_{y_j}) using Eq. (20). The inference matrix, presented in Table 4, defines the various fault signatures associated with the bank of residuals.

The fault detection, isolation, and estimation module has been illustrated in the presence of a fault on the first sensor (with $\beta_1=1$ and $y_{10} = -0.03$ m) and also of a fault on the first actuator (with $\alpha_1=0.2$ and $u_{10}=0$) as shown in Fig. 12. For the fault on sensor l_1 (respectively, actuator 1), residual r_{y_1} (respectively, r_{u_1}) is only close to zero, the other residuals are different from zero at the time the sensor fault (respectively, actuator fault) occurs. These features correspond to the expected results (see Fig. 13).

These residuals are evaluated using the Page-Hinkley test. According to the decision task, the fault is isolated correctly as shown in Fig. 13.

The good performances of the FDI module in terms of detection and isolation delays are presented in Table 5.

Based on the experimental data set given as an example, the sensor and actuator fault magnitude and their estimations are illustrated in Fig. 14. The fault estimation is close to zero in the fault-free case due to the linearized model error, and is close

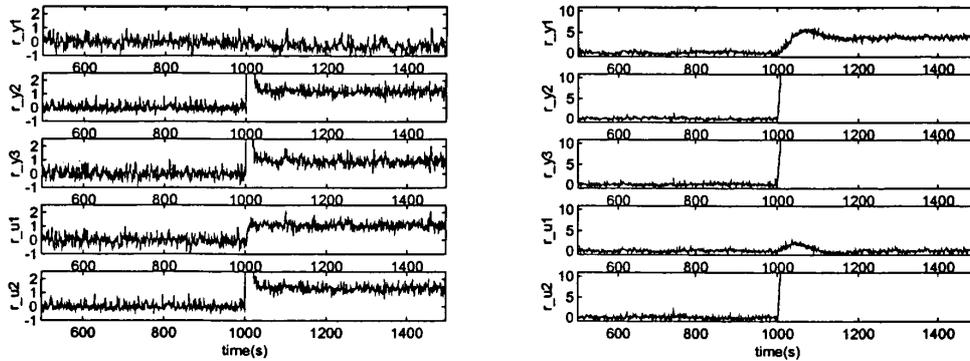


Fig. 12. Residuals behavior for sensor fault (left column) and actuator fault (right column).

to the fault magnitude when the fault has occurred.

The same experiments have been conducted on the other sensors and actuators. The fault detection, isolation, and estimation module indicates which sensor or actuator is faulty and estimates the fault magnitude. According to the fault detection, isolation, and estimation module, a new control law, based on the nominal one (cf. Sec. 2.2), must be computed in order to thwart the fault effect on the system.

4. Sensor and actuator fault accommodation

As sensor and actuator faults do not act in the same way on the system, the new control law is not computed in the same way for both cases. Thus the first part deals with sensor faults and then actuator faults are considered.

4.1. Sensor fault accommodation

4.1.1. General form

Sensor fault accommodation can be obtained by computing a new control law using a fault-free estimation of the faulty element. The fault-free estimation \hat{y}_j of the corrupted output is extracted from the unknown input observer (24) which is built to be insensitive to the j th sensor fault. Consequently, the output vector y_{control} used for the design of the control law is

$$y_{\text{control}} = [\bar{y}_1 \cdots \bar{y}_j \cdots \bar{y}_m]^T, \quad (37)$$

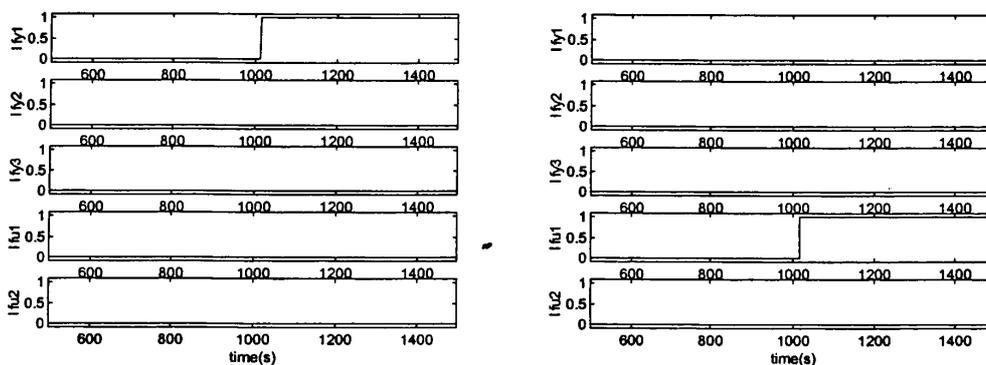


Fig. 13. Fault indicators for sensor fault (left column) and actuator fault (right column).

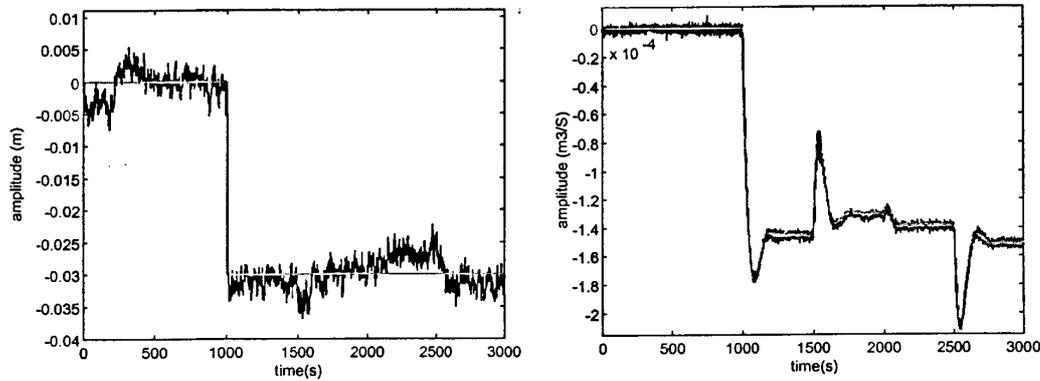


Fig. 14. Fault magnitude and its estimation for sensor fault (left column) and actuator fault (right column).

$$\bar{y}_j = [1 - I(f_j)]y_j + I(f_j)\hat{y}_j$$

$$\text{with } I(f_j) = \begin{cases} 1 & \text{jth faulty sensor} \\ 0 & \text{fault-free case.} \end{cases} \quad (38)$$

Thus the abilities of this accommodation method to compensate for faults are closely related to the results provided by the FDI module.

4.1.2. Application results

The fault accommodation method developed in this paper has been implemented and applied to the three tank system corrupted by sensor or actuator faults. At instant 1000 s, an abrupt sensor fault appears. As stated previously, only the first residual is insensitive to the fault on level sensor l_1 . The fault is isolated at instant 1013 s and consequently the control law switches from measurement l_1 to its estimation \hat{l}_1 . In Fig. 15, it can be noticed that with the fault accommodation (FA) method the real level follows the set point; it is not the case for the classical control law (CL). Figure 16 shows a zoom of Fig. 15 around instant 1000 s and indicates that the fault accommodation approach preserves the dynamical behavior of the

Table 5
Detection and isolation delays.

	Fault occurrence	Fault isolation
Fault in sensor l_1	1000 s	1013 s
Fault in actuator 1	1000 s	1016 s

system in the presence of a fault. The corresponding flow rates are presented in Fig. 17.

The approach is also tested when level sensor l_1 is out of order at instant 1000 s (Fig. 18). With the fault accommodation method, once the fault is isolated, real levels l_1 and l_2 follow their corresponding set points. Thus stopping the system immediately can be avoided and it can continue running safely (Fig. 19).

4.2. Actuator fault accommodation

4.2.1. General form

In the presence of an i th actuator fault, the state space equation described in Eq. (19) becomes

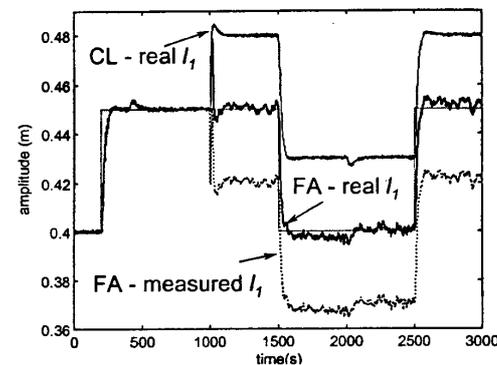


Fig. 15. Level l_1 with a bias in sensor l_1 .

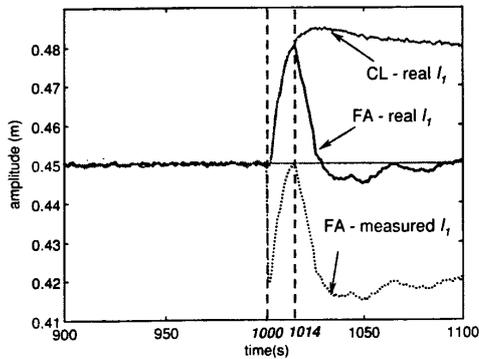


Fig. 16. Zoom of Fig. 15 around 1000 s.

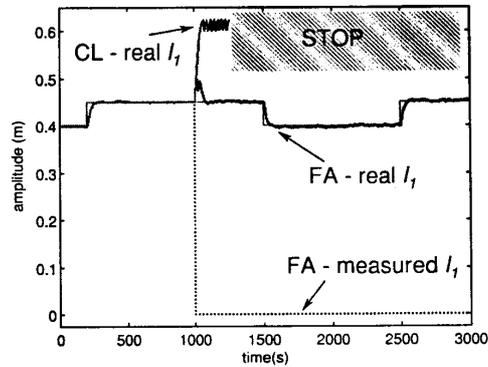


Fig. 18. Level l_1 with sensor l_1 out of order.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_i f^o(k), \\ y(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k). \end{aligned} \quad (39)$$

In order to annihilate the fault effect on the system, a new control law \mathbf{u}_{comp} , added to the nominal one (cf. Sec. 2.2), is computed. Therefore the new control law applied to the system is given by

$$\mathbf{u}(k) = -[\mathbf{K}_1 \ \mathbf{K}_2]\bar{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{u}_{\text{comp}}(k). \quad (40)$$

The additional control law \mathbf{u}_{comp} must be computed such that the faulty system (39) is as close as possible to the nominal one, therefore

$$\mathbf{B}\mathbf{u}_{\text{comp}}(k) + \mathbf{B}_i f^o(k) = 0. \quad (41)$$

Using the estimation of the fault magnitude \hat{f}^o described in the previous section, the solution of Eq.

(41) can be obtained by the following relation if matrix \mathbf{B} ($\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$) is of full row rank:

$$\mathbf{u}_{\text{comp}}(k) = -\mathbf{B}^+ \mathbf{B}_i \hat{f}^o(k), \quad (42)$$

where \mathbf{B}^+ is the pseudoinverse of matrix \mathbf{B} .

Remark 1: Matrix \mathbf{B} is of full row rank if the number of the state variables is less than or equal to the number of control inputs ($n \leq p$). However, the case where $n < p$ is seldom encountered. In the case where $n = p$, the matrix \mathbf{B} is square and the ordinary inverse is used instead of the pseudoinverse:

$$\mathbf{u}_{\text{comp}}(k) = -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{B}_i \hat{f}^o(k). \quad (43)$$

Remark 2: In case matrix \mathbf{B} is not of full row rank, that is the number of system inputs is less than the

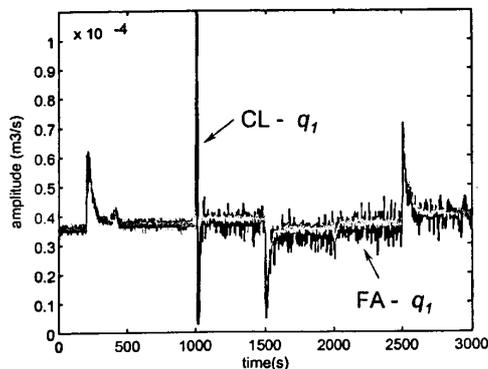


Fig. 17. Flow rate q_1 with a bias in sensor l_1 .

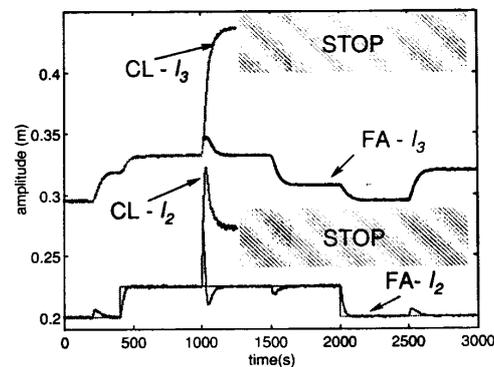


Fig. 19. Levels l_2 and l_3 with sensor l_1 out of order.

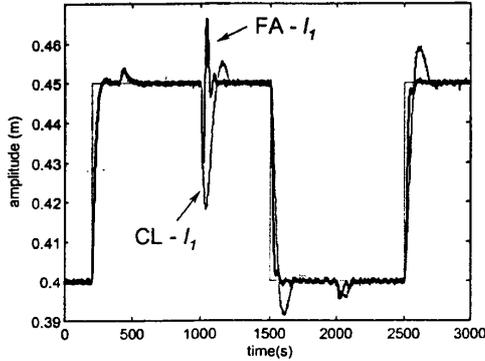


Fig. 20. Level l_1 with fault on pump 1.

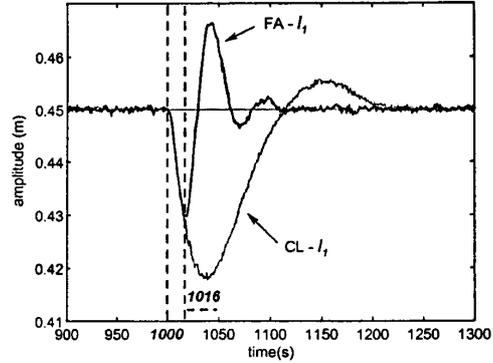


Fig. 22. Zoom of Fig. 20 around 1000 s.

number of state variables, the SVD theorem [25] can be applied to matrix \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \Psi \begin{bmatrix} \Sigma \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Omega^T, \quad (44)$$

where $\Psi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ and $\Omega \in \mathbb{R}^{p \times p}$ are orthogonal matrices, and $\Sigma \in \mathbb{R}^{p \times p}$ is a nonsingular diagonal matrix with $p = \text{rank}(\mathbf{B})$.

Replacing Eq. (44) in Eq. (41) leads to

$$\mathbf{u}_{\text{comp}}(k) = -\Omega \Sigma^{-1} \mathbf{F}_i \hat{f}_o(k), \quad (45)$$

where \mathbf{F}_i is such that $\Psi^T \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ according to the fact that Eq. (44) can be written as $\Psi^T \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Sigma \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Omega^T = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$, thus \mathbf{F}_i is the i th column of matrix \mathbf{F} .

4.2.2. Application results

In the same way, the fault accommodation method's ability to compensate for faults is illustrated in the presence of a fault on pump 1. Once the fault is isolated and estimated, the compensation control law is computed in order to reduce the fault effect on the system. Indeed, since an actuator fault acts on the system as a perturbation, the system outputs reach again their nominal values, as illustrated in Figs. 20 and 21. With the fault accommodation (FA) method, the outputs decrease less than in the case of a classical control law (CL), then they reach the nominal values quicker because the fault is estimated and the new control law is able to compensate for the fault effect at instant 1016 s when the fault is isolated. Accord-

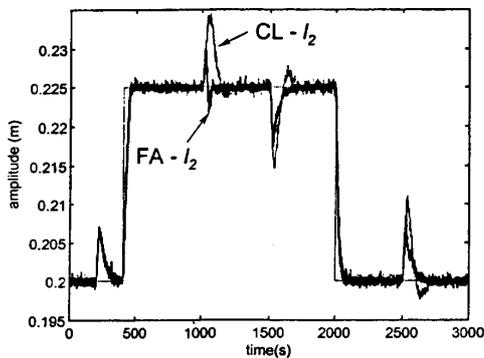


Fig. 21. Level l_2 with fault on pump 1.

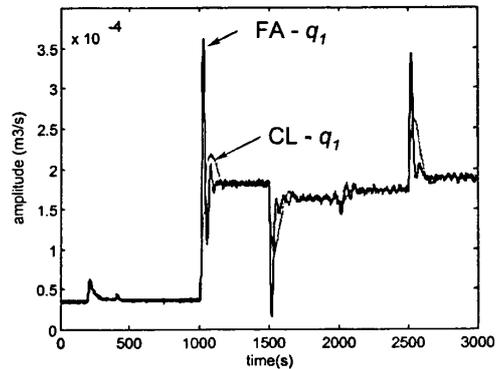


Fig. 23. Flow rate q_1 with fault on pump 1.

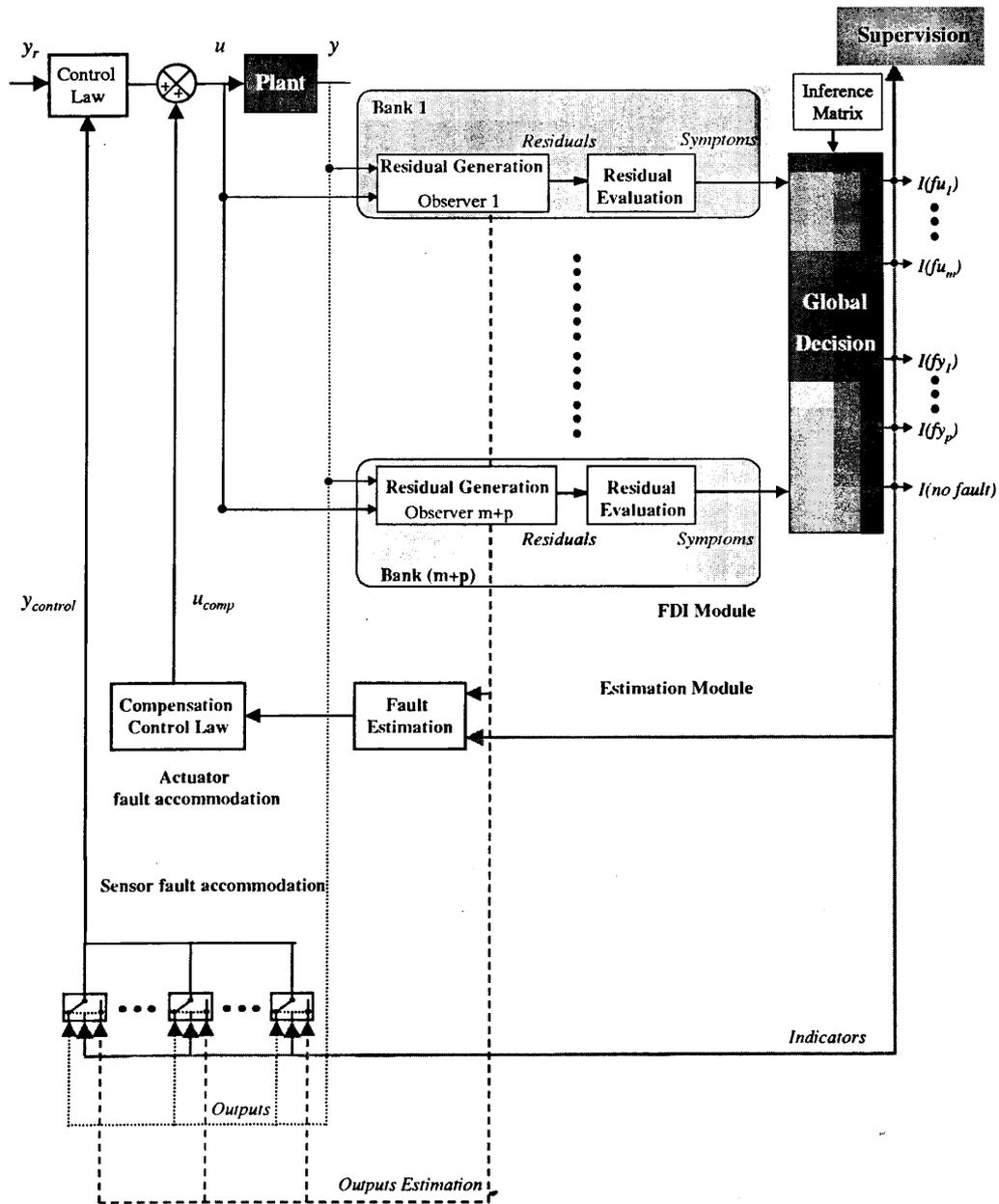


Fig. 24. General fault diagnosis and accommodation scheme.

Table 6
Tracking error norm.

	Fault-free case	Sensor fault		Actuator fault	
		CL	FA	CL	FA
$\|e_{l_1}\|_2$	0.3416	1.3832	0.3516	0.4892	0.3692
$\|e_{l_2}\|_2$	0.1546	0.1564	0.1552	0.1831	0.1571

ing to Fig. 22, it can be easily seen that after the fault occurrence, the time response and the overshoot of the compensated outputs are smaller than those of the faulty outputs with a classical control law. These results can be confirmed by the examination of control input q_1 (Fig. 23). In the classical law, the control input increases slowly trying to compensate for the fault effect on the system. In the accommodation approach, the control input increases quicker and enables the rapid fault compensation on the controlled system outputs.

However, it has to be said that if an actuator is out of order, as presented in Sec. 2.4, the actuator fault accommodation method is unable to preserve the system performance. This is due to the fact that the system becomes uncontrollable (the number of control inputs becomes smaller than the number of controlled outputs). In this case, only actuator redundancy allows us to maintain the nominal objectives and to avoid stopping the system.

4.3. Fault diagnosis and accommodation assessment

The general concept of the fault diagnosis and accommodation, presented in this paper, is sche-

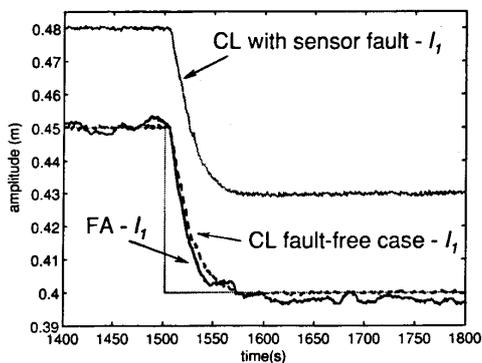


Fig. 25. Dynamic behavior in a sensor fault case.

matized by Fig. 24. The fault detection, isolation, and estimation modules consist of residual generation, residual evaluation, fault magnitude estimation, and finally the decision as to which sensor or actuator is faulty. The fault accommodation module starts the computation of the new control law and is only able to reduce the fault effect on the system once the fault is detected and isolated.

The computation of the tracking error norm in the fault-free case, in the faulty case with classical control law, and fault accommodation emphasizes the performances of the approach as seen in Table 6.

With the fault accommodation method (FA), the tracking error norm for outputs l_1 and l_2 is a little bit bigger than the nominal one but it is still widely smaller than the one with the classical control law (CL). This also is confirmed by the dynamic behavior of these outputs after a sensor or actuator fault occurrence as illustrated in Figs. 25 and 26.

5. Conclusion

In this paper, the importance of fault diagnosis for fault accommodation has been emphasized. A

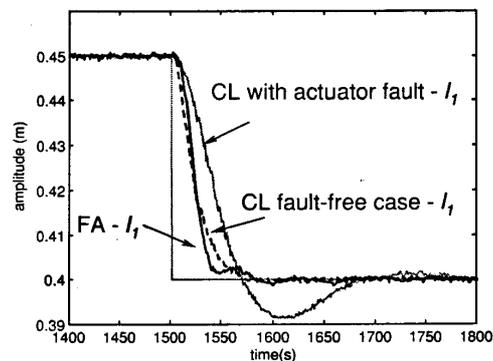


Fig. 26. Dynamic behavior in an actuator fault case.

three-tank system is used to illustrate the abilities of the developed method to compensate for both sensor and actuator faults. A description of these faults has been given, and their influence on the three-tank system has been illustrated.

A bank of unknown input observers has been designed in order to detect, isolate, and estimate faults, and principally to distinguish between sensor and actuator faults. Indeed, since the compensation for an actuator fault cannot be achieved in the same way as for a sensor fault, it is of great importance to distinguish between these faults, which is not usually easy in closed-loop systems.

Various experiments have been conducted in the presence of sensor and actuator faults. The fault accommodation method based on the fault diagnosis results shows that the compensated outputs behavior are closer to the nominal outputs rather than the faulty outputs with a classical control law. Moreover, in certain cases, it allows the system to continue operating safely and avoids stopping it immediately.

It has been shown that the compensation for sensor faults is possible even if a sensor is completely out of order. This, obviously, can be achieved if the system is still observable. The system observability can be checked off-line as indicated in condition (ii) in Sec. 3.1.

The main difficulty in applying this fault diagnosis and accommodation method in a more complex industrial system consists of the establishment of an analytical model. However, in many cases, the decomposition of the whole system into subsystems makes possible the modeling and the application of such a method. It can be noted that for each subsystem the obtained model is assumed to be linear around an operating point and is suitable in the associated operating zone. A way to take into account a more wide operating zone could consist of the use of multiple models techniques.

Another drawback is that this method is not able to compensate for a complete loss of an actuator. The occurrence of this kind of critical failure requires either a hardware redundancy or an on-line modification of the nominal objectives in order to avoid catastrophic consequences until stopping the system safely. Future work concerns the compensation of critical actuator failures and the fault accommodation in case not all state variables are available for measurement.

References

- [1] Chen, J. and Patton, R. J., *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] Frank, P. M., Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy—A survey and some new results. *Automatica* **26**, 459–474 (1990).
- [3] Frank, P. M. and Ding, X., Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *J. Process Control* **7**, 403–424 (1997).
- [4] Gertler, J. J., *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Dekker, New York, 1998.
- [5] Isermann, R. and Ballé, P., Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes. 13th Triennial World Congress IFAC, San Francisco, CA, 1996, pp. 1–12.
- [6] Patton, R. J., Fault tolerant control: The 1997 situation (survey). In: *IFAC SAFEPROCESS'97*, Hull, U.K., 1997, Vol. 2, pp. 1033–1055.
- [7] Noura, H., Sauter, D., Hamelin, F., and Theilliol, D., Fault-tolerant control in dynamic systems: Application to a winding machine. *IEEE Control Syst. Mag.* **20**, 33–49 (2000).
- [8] Aguirre, L. A. and Pereira, M. F. S., A modified observer scheme for fault detection and isolation applied to a poorly observed process with integration. *J. Process Control* **8**, 47–56 (1998).
- [9] Koscielny, J. M., Application of fuzzy logic for fault isolation in a three-tank system. In: 14th Triennial World Congress IFAC, Beijing, P.R. China, 1999, pp. 73–78.
- [10] Zolghadri, A., Model based fault detection in a process multivariable hydraulic process. In: 13th Triennial World Congress IFAC, San Francisco, CA, 1996, pp. 253–258.
- [11] Ponsart, J. C., Theilliol, D., and Noura, H., Fault-tolerant control of a nonlinear system application to a three-tank-system. In: *ECC'99*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [12] Napolitano, M. R. and Swaim, R. L., A new technique for aircraft flight control reconfiguration. *Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf.*, Pt. 1, 1989.
- [13] Blanke, M., Fault-tolerant control systems. *Advances in Control Highlights of ECC'99*. Springer Edition, 1999.
- [14] Marcu, T., Matcoschi, M. H., and Frank, P. M., Neural observer-based approach to fault-tolerant control of a three-tank system. In: *ECC'99*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [15] Theilliol, D., Ponsart, J. C., and Noura, H., Sensor fault diagnosis and accommodation based on analytical redundancy: Application to a three-tank system. In: *SAFEPROCESS'2000*, Budapest, Hungary, 2000, pp. 542–547.
- [16] Zhang, Y. and Jiang, J., Design of integrated fault detection, diagnosis and reconfigurable control systems. In: *IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix, AZ, 1999, pp. 3587–3592.
- [17] Amira-DTS2000 Laboratory Setup Three Tank Sys-

- tem, Amira GmbH, Bismarckstra., D-47057 Duisburg, Germany, 1996.
- [18] D'Azzo, J. J. and Houpis, C. H., *Linear Control Systems Analysis and Design*. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [19] Rao, M., Xia, Q., and Ying, Y., *Modeling and advanced control for process industries—Applications to paper making processes*. Springer-Verlag Advances in Industrial Control. Springer-Verlag, Berlin, 1994, pp. 157–191.
- [20] Theilliol, D., Noura, H., and Sauter, D., *Fault-tolerant control method for actuator and component faults*, IEEE Conf. on Decision and Control, Tampa, FL, 1998.
- [21] Hou, M. and Muller, P. C., *Disturbance decoupled observer design: a unified viewpoint*. IEEE Trans. Autom. Control **39**, 1338–1341 (1994).
- [22] Park, J., Rizzoni, G., and Ribbens, W. B., *On the representation of sensor faults in fault detection filters*. Automatica **30**, 1793–1795 (1994).
- [23] Basseville, M. and Nikiforov, I., *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. In: Information and System Sciences Series. Prentice Hall International (UK) Ltd, 1993.
- [24] Leonhardt, S. and Ayoubi, M., *Methods of fault diagnosis*. Control Eng. Pract. **5**, 683–692 (1997).
- [25] Golub, G. H. and Van Loan, C. F., *Matrix Computations*, second edition. The Johns Hopkins University Press, 1989.

Didier Theilliol earned a Ph.D. degree in Control Engineering from the Henri Poincaré University, Nancy 1 (France) in 1993. He has been an associated professor at the Research Centre for Automatic Control of Nancy since 1994. D. Theilliol's research experience includes identification of nonlinear SISO systems with multilayer neural networks and decision support systems within the framework of its participation in European project (EUREKA PROJECT EU 996 MAINE DIALOGS) for three years. Current research interests of D. Theilliol include robust fault diagnosis and accommodation.

Hassan Noura was born in Ablah, Lebanon, in 1965. He received the Ph.D. degree in Automatic control engineering from the Henri Poincaré University, Nancy 1, France in 1993. He is with the Research Center for Automatic Control of Nancy. He has been an associate professor since 1994. His research interests include fault diagnosis and fault-tolerant control.

Jean-Christophe Ponsart received his Ph.D. in 1996 from the University of Savoie in Annecy, France in nonlinear control of magnetic suspensions and its digital implementation aspects. In 1997, he participated in design and implementation of real time controllers with digital signal processor architecture for an industrial company. He has been with the Research Center for Automatic Control of Nancy, France (CRAN) since 1998 as an Assistant Professor. His current interests include fault diagnosis and accommodation, and fault tolerant control applied to nonlinear systems.

[RI_2]

- H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin, **D. Theilliol**.

“Fault tolerant control in dynamic systems: application to a winding machine.” *IEEE Control System Magazine*, vol. 20, n°1, pp. 33-49, 2000.

FEATURE

By Hassan Noura,
Dominique Sauter,
Frédéric Hamelin,
and Didier Theilliol

Fault-Tolerant Control in Dynamic Systems:

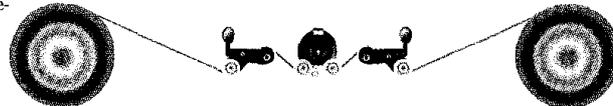
Application to a Winding Machine

Over the past two decades, the growing demand for reliability in industrial processes has drawn increasing attention to the problem of fault detection and isolation (FDI), but only a few studies have been dedicated to the related fault-tolerant control (FTC) problem. A fault (abrupt or incipient) is any kind of malfunction or degradation in the plant that can lead to a reduction in performance or loss of important functions, impairing safety. Therefore, FTC can be motivated by different goals depending on the application under consideration; for instance, safety in flight control or reliability, or quality improvements in industrial processes.

Although FTC is a recent research topic in control theory, the idea of controlling a system that deviates from its nominal operating conditions has been investigated by many researchers. The methods for dealing with this problem usually stem from linear-quadratic, adaptive, or robust control. The problems to consider in the design of a fault-tolerant controller are quite particular. First, the number of possible faults, and consequently

actions, is very large. Second, the occurrence of a fault can make the system evolve far from its normal operating conditions and can lead to a drastic change in system behavior. It is often a rapid change, and the time for accommodation is very short. Furthermore, correct isolation of the faulty component is required to react successfully, a rather difficult problem in the case of closed-loop systems. Finally, FTC is a multivariable problem, with strong coupling between the different variables.

Various approaches for fault-tolerant control have been suggested in the literature [40]. From the applica-



tion viewpoint, flight-control systems have represented the main area of research, and only a few studies have been devoted to industrial processes. One of the main goals of this article is to show that these approaches are appropriate to such systems.

Fault-tolerant control systems are characterized here by their capabilities, after fault occurrence, to recover

The authors are with the Research Center for Automatic Control of Nancy, CNRS UPRESA 7039, Université Henri Poincaré, Nancy I, BP 239 - 54506 Vandœuvre-lès-Nancy - France (hassan.noura@cran.u-nancy.fr)

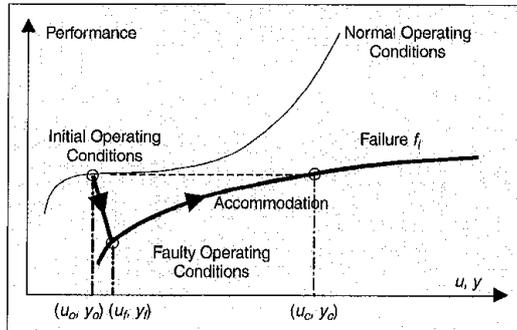


Figure 1. The fault-tolerant control problem.

performance close to the nominal desired performance. In addition, their ability to react successfully (stably) during a transient period between the fault occurrence and the performance recovery is an important feature. Accommodation capability of a control system depends on many factors such as the severity of the failure, the robustness of the nominal system, and the actuators' redundancy.

Actually, fault-tolerant control concepts can be separated into "passive" and "active" approaches. The passive approach uses robust control techniques to ensure that a closed-loop system remains insensitive to certain faults. When redundant actuators are available, methods dealing with this approach are also called reliable control methods [26], [48], [56]. In the active approach, a new set of control parameters is determined such that the faulty system reaches the nominal system performance. The principle of active approaches, illustrated by Fig. 1, is very simple. After the fault occurrence, the system deviates from its nominal operating point defined by its input/output variables (u_0, y_0) to a faulty one (u_f, y_f) . The goal of fault-tolerant control is to determine a new control law that takes the degraded system parameters into account and drives the system to a new operating point (u_c, y_c) such that the main performance parameters (stability, accuracy, etc.) are preserved (i.e., are as close as possible to the initial parameters). It is, therefore, important to define precisely the degraded modes that are acceptable with regard to the required performance parameters, since after the occurrence of faults, conventional feedback control design may result in unsatisfactory performance such as tracking error, instability, and so on.

When the exact model of the failed system is known, the control system can be accommodated so that system performance parameters are recovered and the new system behaves as initially specified. Gao and Antsaklis [17], [18] and Morse and Ossman [31] suggest a basic approach based on what they call the pseudo-inverse method. In practice, however, the faults are unanticipated and the model of the impaired system is not available.

To overcome the limitations of conventional feedback control, new controllers have been developed with accom-

modation capabilities or tolerance to faults. These fault-tolerant controllers belong to different categories:

- Adaptive control seems to be the most natural approach to accommodate faults; the faults' effects appear as model parameter changes and are identified online, and the control law is reconfigured automatically based on new parameters [8], [35], [42], [55]. Wu et al. [54] consider a loss of effectiveness in actuators and suggest using an augmented state Kalman filter to estimate both the fault-free state and the faulty parameters. The estimated fault-free state is used to feed the controller. All these approaches have the advantage of not requiring that the faults be categorized a priori, although the design of robust identification and control algorithms presents significant challenges.
- Integrated approaches represent another trend [33]. They integrate fault monitoring and control procedures. In this case, the possible actuator or sensor faults are represented by signals and are estimated by the same algorithm that computes the control law [32], [44], [47]. The faults are modeled first, then the controller is built to be insensitive to these faults, but the operator should be aware of possible faults through the alarm-monitoring function.
- The fault-tolerant control problem can also be formulated as a multiobjective problem based on the assumption that, like the uncertainties, the faults' effects can be expressed by means of linear fractional transformation (LFT). Following this methodology, a linear matrix inequality formulation for fault-tolerant controller synthesis has been recently introduced by Chen et al. [10]. Another approach based on convex optimization has been also considered where an LQ controller is used and the reconfiguration is achieved by choosing new values of the weighting matrices in the performance index to offset the effect of faults [29], [43].
- Finally, another way to achieve fault-tolerant control relies on supervised control where an FDI unit provides information about the location and time occurrence of any fault. Faults are compensated via an appropriate control law triggered according to the diagnosis of the system. This can be achieved by using gain scheduling [24] or compensation via additive input design [34], [46].

Methods combining model-based and knowledge-based or heuristic techniques were also successfully used to tune the controller [1], [2], [27], [40].

The fault-tolerant control method described in this article aims to compensate for both actuator and sensor faults. An actuator fault, for instance, a loss in effectiveness, acts on the system as a disturbance. In the nominal control law, the presence of an integrator in the controller may compensate only for the static error but not for the loss in dynamic performance.

In the fault-free case, the measurements issued from the sensors are equal to the real outputs. When a sensor fault occurs, the integral control law makes the tracking error (the error between the measurements and the reference values) go to zero. Hence, the real output is far from the desired value. The usual recommendation is to replace this measurement either by another one, if a redundant sensor is available, or by its estimation obtained via a state estimator. This is not always the best solution, however, since the state estimator is driven by measurements.

A natural way to cope with the FTC problem is to modify the controller parameters according to an online identification of the system parameters when a fault occurs. However, due to difficulties inherent to the online multivariable identification in closed-loop systems, such as noise or the lack of excitation signals, we propose an alternative based on the computation of a new control law to be added to the nominal one. But since this new control law is not the same for both cases, an FDI module is necessary to isolate the faulty element accurately.

Before handling faults that can occur on the system, the objective is to design a nominal tracking control where outputs are required to track reference inputs.

This article is organized as follows. First, we describe the fault effects on the system, and then we review the tracking nominal control design. Next, we describe the principle of the fault-tolerant control method in the presence of actuator and sensor faults, and then we present the fault diagnosis architecture used to isolate the faulty element. After summarizing the general FTC scheme, we present the experimental results of applying this method to a winding machine. Finally, concluding remarks are given.

Fault Description

Consider the discrete linear system given by the following state-space representation:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (1)$$

where $x \in \mathbb{R}^n$ is the state vector, $y \in \mathbb{R}^q$ the output observation vector, $u \in \mathbb{R}^m$ the input vector, and A , B , and C are known matrices of appropriate dimensions. Different additive and/or multiplicative faults may affect the system due to abnormal operation or to material aging. Additive faults characterize sensor or actuator faults, while the multiplicative ones designate component faults.

In the fault-diagnosis literature, a distinction should be made between additive and multiplicative faults; however,

for fault-tolerant control, the aim is to compensate for all faults, whatever their types.

A classical way of representing component faults is to consider variations in the parameters of the system. Therefore, the component faults (i.e., internal faults) that are due to changes in the process coefficients are assumed to produce deviations in the parameters of the system. After the fault occurrence, the model of the system becomes

$$\begin{aligned} x_f(k+1) &= A_f x_f(k) + B_f u(k) \\ y_f(k) &= C_f x_f(k), \end{aligned} \quad (2)$$

where f denotes the faulty index. The various matrices involved in the system description are modified according to:

$$A_f = A + \delta A, \quad B_f = B + \delta B, \quad C_f = C + \delta C, \quad (3)$$

where δA , δB , and δC are the parameter deviations from the nominal operating values.

In the sequel, only actuator and sensor faults are considered. Additive faults are usually described using an unknown input vector $f \in \mathbb{R}^k$ acting directly on the dynamics or on the measurements of the system. For instance, an actuator fault should be represented by

$$B_f = B(I + \text{diag}(\alpha(k))), \quad (4)$$

with $\alpha = [\alpha_1 \ \dots \ \alpha_i \ \dots \ \alpha_m]^T$, and in the case of complete loss of the i th actuator, $\alpha_i = -1$. As B_f is an unknown matrix, the state-space representation of the faulty system requires the definition of an unknown input f_a , which is equal to zero in the fault-free case

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_a f_a(k) \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (5)$$

Likewise, in the presence of a sensor fault characterized by changes of matrix C ,

$$C_f = (I + \text{diag}(\beta(k)))C, \quad (6)$$

with $\beta = [\beta_1 \ \dots \ \beta_j \ \dots \ \beta_q]^T$, the state-space representation is

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) + F_s f_s(k). \end{aligned} \quad (7)$$

Before handling faults that can occur on the system, the objective is to design a nominal tracking control where outputs are required to track reference inputs.

Nominal Tracking Control Design

In tracking control, the number of outputs that have to follow a reference input vector, y_r , must be less than or equal to the number of control inputs [12]. Thus, the output equation in (1) can be rewritten as:

$$y(k) = Cx(k) = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} x(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

If a sensor fault occurs on the system, the nominal control law u is modified to have a zero static error.

where $y_1 \in \mathbb{R}^p$ ($p \leq m$) represents the vector of p outputs that are required to follow the reference input vector y_r . The feedback controller is required to cause the output vector y_1 to track the reference input vector in the sense that in steady state,

$$y_r(k) - y_1(k) = 0. \quad (9)$$

To achieve this task, a comparator and integrator vector z is added to satisfy the following relation:

$$\begin{aligned} z(k+1) &= z(k) + T_s(y_r(k) - y_1(k)) \\ &= z(k) + T_s(y_r(k) - E_1 x(k)), \end{aligned} \quad (10)$$

where T_s is the sampling interval. Therefore, the open-loop system is governed by the augmented state and output equations, where I_p is an identity matrix of dimension p :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -T_s E_1 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ T_s I_p \end{bmatrix} y_r(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

The nominal feedback control law of this system can be computed by:

$$u(k) = -K \tilde{x}(k) = -[K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

with $\tilde{x} = [x^T \ z^T]^T$ and $K = [K_1 \quad K_2]$ being the feedback gain matrix obtained, for instance, by pole assignment, linear quadratic optimization, and so on. To achieve this control law, the state variables are assumed to be available for measurement. Moreover, the state space considered here is the one where the outputs are the state variables (C is the identity matrix I_n). In the opposite case, the control law is com-

puted using the estimated state variables obtained, for instance, by a Kalman filter.

Fault-Tolerant Control

Once the FDI module indicates which sensor or actuator is faulty, the fault magnitude is estimated and a new control law is added to the nominal one to thwart the fault effect on the system. As sensor and actuator faults do not act in the same way on the system, the additive control law is not the same for both cases. Thus, in the sequel, the first part deals with actuator faults and then sensor faults are considered. Moreover, only one fault is assumed to occur at the same time.

Actuator Fault Estimation

In the presence of an actuator fault and according to (5) and (11), the augmented state-space representation of the system is written as

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ -T_s E_1 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ T_s I_p \end{bmatrix} y_r(k) + \begin{bmatrix} F_a \\ 0 \end{bmatrix} f_a(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

where F_a corresponds to the i th column of matrix B in the case of the i th actuator fault.

To estimate the fault magnitude f_a , the system given by (13) is considered in the following rearranged form:

$$\bar{E}_a \bar{X}_a(k+1) = \bar{A}_a \bar{X}_a(k) + \bar{B}_a \bar{U}(k) + \bar{G}_a y_r(k), \quad (14)$$

where:

$$\begin{aligned} \bar{E}_a &= \begin{bmatrix} I_n & 0 & -F_a \\ 0 & I_p & 0 \\ I_n & 0 & 0 \end{bmatrix} & \bar{A}_a &= \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ -T_s E_1 & I_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \bar{B}_a &= \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \\ \bar{G}_a &= \begin{bmatrix} 0 \\ T_s I_p \\ 0 \end{bmatrix} & \bar{X}_a(k) &= \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \\ f_a(k-1) \end{bmatrix} & \bar{U}(k) &= \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

In (14), \bar{E}_a is a matrix of full column rank. Thus, the estimation of the fault magnitude f_a makes use of the following singular-value decomposition (SVD) [5], [20].

Let

$$\bar{E}_a = T \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} M^T$$

be the SVD of \bar{E}_a and partition $T = [T_1 \ T_2]$. Thus, S is a diagonal and nonsingular matrix, and T and M are orthogonal matrices.

Using this SVD and replacing it in (14) leads to

$$\bar{X}_a(k+1) = \tilde{A}_a \bar{X}_a(k) + \tilde{B}_a \bar{U}(k) + \tilde{G}_a y_r(k), \quad (16)$$

with

$$\begin{aligned} \tilde{A}_a &= MS^{-1}T_1^T \bar{A}_a = \bar{E}_a^+ \bar{A}_a \\ \tilde{B}_a &= MS^{-1}T_1^T \bar{B}_a = \bar{E}_a^+ \bar{B}_a \\ \tilde{G}_a &= MS^{-1}T_1^T \bar{G}_a = \bar{E}_a^+ \bar{G}_a, \end{aligned} \quad (17)$$

where \bar{E}_a^+ is the pseudo-inverse of matrix \bar{E}_a .

Hence, solving (16) gives an estimation \hat{f}_a of the fault magnitude f_a , which is the last component of the augmented state vector \bar{X}_a . This estimation is then used to determine the additive control law able to reduce the fault effect on the system outputs. Notice from relation (15) that the estimation of the fault magnitude f_a at instant (k) depends on the system outputs y at instant $(k+1)$. To avoid this problem, computation of the fault estimation is delayed by one sample.

Actuator Fault Compensation

Replacing the nominal control law (12) in the equations of the system affected by an actuator fault (5) leads to the closed-loop state-space representation

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A - BK_1)x(k) - BK_2z(k) + F_a f_u(k) \\ y(k) &= x(k), \end{aligned} \quad (18)$$

We propose computing a new control law u_{ad} to be added to the nominal one to compensate for the fault effect on the system. Therefore, the total control law applied to the system is given by

$$u(k) = -[K_1 \ K_2]\tilde{x}(k) + u_{ad}(k). \quad (19)$$

Hence, the closed-loop state equation becomes

$$x(k+1) = (A - BK_1)x(k) - BK_2z(k) + F_a f_a(k) + Bu_{ad}(k). \quad (20)$$

The additional control law u_{ad} must be computed such that the faulty system is as close as possible to the nominal one. In other terms, u_{ad} must satisfy

$$Bu_{ad}(k) + F_a f_a(k) = 0. \quad (21)$$

Using the estimation of the fault magnitude described in the previous section, the solution of (21) can

be obtained by the following relation if matrix B is of full row rank:

$$u_{ad}(k) = -B^+ F_a \hat{f}_a(k), \quad (22)$$

where B^+ is the pseudo-inverse of matrix B . The existence of a solution u_{ad} is discussed in the Appendix.

Sensor Fault Estimation

If a sensor fault occurs on the system, the nominal control law u is modified to have a zero static error. But in this case, the real output is far from its nominal value. Hence, in the presence of a sensor fault, this control law must be prevented from reacting, unlike the case of an actuator fault. This can be achieved by canceling the fault effect on the control input.

For sensor faults, the output equation given in (7) is decomposed according to (8):

$$y(k) = x(k) + F_s f_s(k) = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} F_{s1} \\ F_{s2} \end{bmatrix} f_s(k). \quad (23)$$

In this case, the integral error vector z is described by

$$\begin{aligned} z(k+1) &= z(k) + T_s(y_r(k) - y_1(k)) \\ &= z(k) + T_s(y_r(k) - E_1 x(k) - F_{s1} f_s(k)). \end{aligned} \quad (24)$$

The sensor fault magnitude can be estimated in a way similar to actuator fault estimation, by describing the augmented system as follows:

$$\bar{E}_s \bar{X}_s(k+1) = \bar{A}_s \bar{X}_s(k) + \bar{B}_s \bar{U}(k) + \bar{G}_s y_r(k), \quad (25)$$

where:

$$\begin{aligned} \bar{E}_s &= \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 \\ 0 & I_p & 0 \\ I_n & 0 & F_s \end{bmatrix} & \bar{A}_s &= \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ -T_s E_1 & I_p & -T_s F_{s1} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \bar{B}_s &= \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I_q \end{bmatrix} \\ \bar{G}_s &= \begin{bmatrix} 0 \\ T_s I_p \\ 0 \end{bmatrix} & \bar{X}_s(k) &= \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \\ f_s(k) \end{bmatrix} & \bar{U}(k) &= \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

Hence, using the SVD of \bar{E}_s , as described under "Actuator Fault Estimation," allows an estimation of the sensor fault magnitude \hat{f}_s .

Sensor Fault Compensation

In the same way, when a sensor fault occurs, an additive control law is added to the nominal one

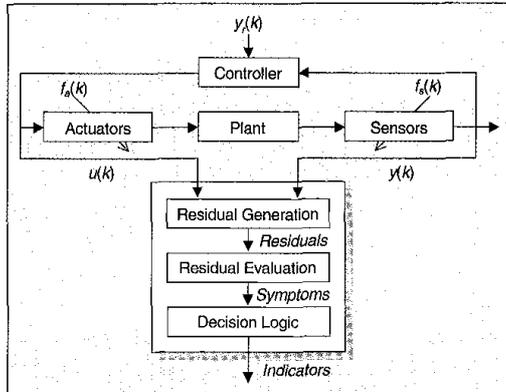


Figure 2. Fault diagnosis architecture.

$$u(k) = -K_1 x(k) - K_2 z(k) + u_{ad}(k). \quad (27)$$

In the presence of a sensor fault, both the output y and the integral error z are affected such that

$$\begin{aligned} y(k) &= x(k) = x_0(k) + F_s f_s(k) \\ z(k) &= z_0(k) + \tilde{f}(k) \\ \tilde{f}(k) &= \tilde{f}(k-1) - T_s F_{s1} f_s(k-1), \end{aligned} \quad (28)$$

where x_0 and z_0 are the fault-free values of x and z , and \tilde{f} is the integral of $-F_{s1} f_s$. This leads the control law to be given by

$$u(k) = -K_1 x_0(k) - K_1 F_s f_s(k) - K_2 z_0(k) - K_2 \tilde{f}(k) + u_{ad}(k). \quad (29)$$

Clearly, since the sensor fault magnitude \hat{f}_s is estimated, the fault effect can be canceled by computing u_{ad} such that

$$u_{ad}(k) = K_1 F_s \hat{f}_s(k) + K_2 \tilde{f}(k). \quad (30)$$

It has been shown that the new control law added to the nominal one is not the same in the case of an actuator or sensor fault. Thus, the ability of this FTC method to compensate for faults is closely related to the results given by the FDI

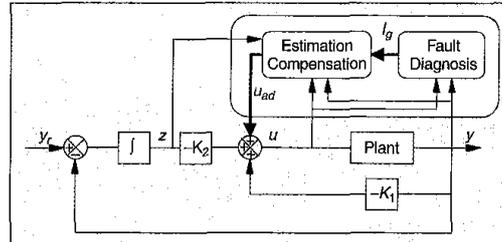


Figure 3. Fault-tolerant control scheme.

module concerning the decision of whether a sensor or an actuator fault has occurred.

Fault Diagnosis

Diagnosis is the primary stage of fault-tolerant control systems. Its goal is to perform two main decision tasks: fault detection, consisting of deciding whether or not a fault has occurred, and fault isolation, consisting of deciding which element of the system has failed. The general procedure comprises the following three steps:

- *Residual generation*—the process of associating, with the pair model-observation, features that allow us to evaluate the difference with respect to normal operating conditions.
- *Residual evaluation*—the process of comparing residuals to some predefined thresholds according to a test and at a stage where symptoms are produced.
- *Decision making*—the process of deciding, based on the symptoms, which elements are faulty (i.e., isolation).

This implies designing residuals that are (a) close to zero in fault-free situations while clearly deviating from zero in the presence of faults, and (b) able to discriminate between all possible modes of faults (which explains the use of the term *isolation*). Fig. 2 shows the fault diagnosis architecture.

Residual Generation

Consider a discrete linear system described by the general state-space representation, including the presence of disturbances and sensor and actuator faults

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_x^o f^o(k) + F_x^s f^s(k) \\ y(k) &= Cx(k) + F_y^o f^o(k) + F_y^s f^s(k), \end{aligned} \quad (31)$$

$S(r)$	$S_{ref, no\ fault}$	S_{ref, f_1}	S_{ref, f_2}	S_{ref, f_3}
$S(r_1)$	0	1	0	0
$S(r_2)$	0	0	1	0
$S(r_3)$	0	0	0	1

$S(r)$	$S_{ref, no\ fault}$	S_{ref, f_1}	S_{ref, f_2}	S_{ref, f_3}
$S(r_1)$	0	0	1	1
$S(r_2)$	0	1	0	1
$S(r_3)$	0	1	1	0

where the unknown input $f \in \mathbb{R}^d$ represents all disturbances or faults that do not correspond to those $f^o \in \mathbb{R}^k$ to be detected. The matrices F_x^o , F_x^f , F_y^o , and F_y^f , assumed to be known, characterize the distribution of the unknown inputs f and f^o acting directly on the dynamics and the measurements, respectively.

According to this representation, the objective is to generate residuals sensitive to certain faults f^o and insensitive to an unknown input vector f in order to isolate faults. A wide variety of model-based approaches have been developed [3], [13], [53]. It is recognized that FDI model-based methods can be separated into two categories. The first is based on state estimation and includes detection filters [7], [25], [44], [52]; parity space approaches [11], [19], [37]; and diagnostic, observer-based methods [15], [36], [50], [51]. Parameter estimation techniques [23] belong to the second category. In practice, the two kinds of methods do not apply to the same FDI problems: parameter estimation is especially suitable for multiplicative faults, whereas state estimations are preferred for additive faults.

In this article, the problem is how to design a diagnosis procedure that makes it possible to detect and isolate a particular fault among several others. Numerous model-based approaches have been proposed to solve this problem.

For structured types of faults, the current literature proposes a variety of solutions to achieve isolation. The geometrical approaches [30], [52] and the techniques of fault-effect decoupling based on observers with unknown inputs [16], [38], [39], [49] or robust parity relations developed in [11], [21], [30] constitute the most relevant approaches for achieving enhanced robustness. When it is not possible to totally decouple the effects of faults, we often resort to optimization.

The robustness of the residual generator resides in its sensitivity to faults and its ability to distinguish between different faults in the presence of uncertain parameters. The parity space approach is used here.

Thus, starting with the model given in (31), the idea is to generate a residual of the form

$$r(k) = v^T \begin{pmatrix} y(k-s) \\ \vdots \\ y(k) \end{pmatrix} - H_1 \begin{pmatrix} u(k-s) \\ \vdots \\ u(k) \end{pmatrix}, \quad (32)$$

where the parity vector v is a component vector of the parity space P defined as follows:

$$P = \{v^T H_0 = 0\}, \quad (33)$$

s is the parity space order, and

$$H_0 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix}, H_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & \dots & 0 \\ CB & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ CA^{s-1}B & \dots & CB & 0 \end{bmatrix}. \quad (34)$$

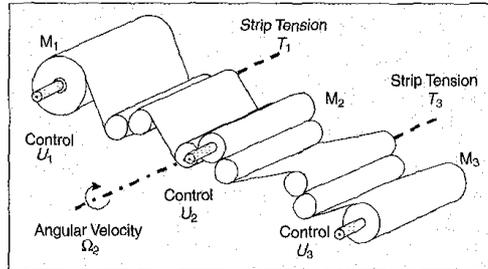


Figure 4. Winding machine.

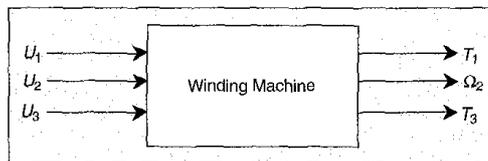


Figure 5. Inputs/outputs of the winding machine.

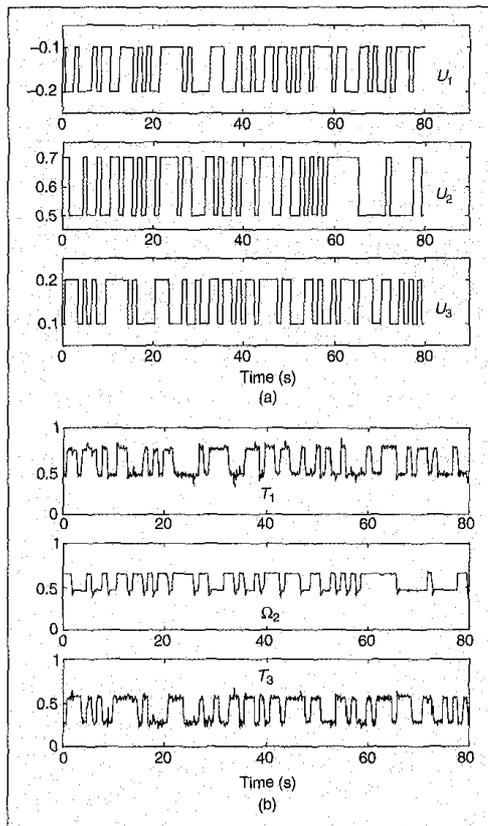


Figure 6. (a)Input/(b)output data set for parameter identification.

Table 2. Theoretical inference matrix.

$S(r)$	$S_{ref, no\ fault}$	S_{ref, fa_1}	S_{ref, fa_2}	S_{ref, fa_3}	S_{ref, fy_1}	S_{ref, fy_2}	S_{ref, fy_3}
$S(r_{u_1})$	0	0	1	1	1	1	1
$S(r_{u_2})$	0	1	0	1	1	1	1
$S(r_{u_3})$	0	1	1	0	1	1	1
$S(r_{y_1})$	0	1	1	1	0	1	1
$S(r_{y_2})$	0	1	1	1	1	0	1
$S(r_{y_3})$	0	1	1	1	1	1	0

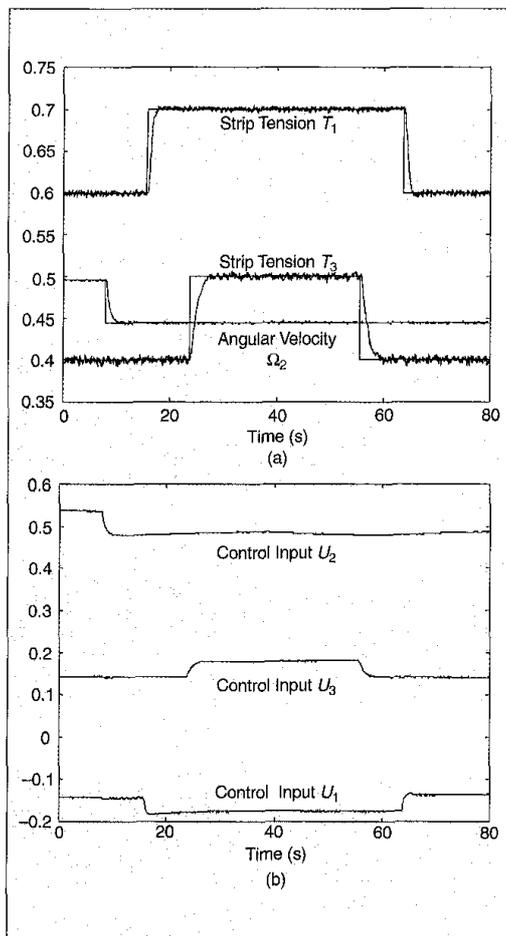


Figure 7. (a): Nominal tracked outputs; (b) nominal control inputs.

Indeed, with the model given by (31), the residual (32) can be expressed in terms of the state vector and the unknown inputs $f'(k)$ and $f^o(k)$:

$$r(k) = v^T \left\{ H_0 x(k-s) + H_2 \begin{bmatrix} f'(k-s) \\ \vdots \\ f'(k) \end{bmatrix} + H_3 \begin{bmatrix} f^o(k-s) \\ \vdots \\ f^o(k) \end{bmatrix} \right\}, \quad (35)$$

where

$$H_2 = \begin{bmatrix} F_y' & 0 & \dots & 0 \\ CF_x' & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{s-1}F_x' & \dots & CF_x' & F_y' \end{bmatrix}$$

and

$$H_3 = \begin{bmatrix} F_y^o & 0 & \dots & 0 \\ CF_x^o & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{s-1}F_x^o & \dots & CF_x^o & F_y^o \end{bmatrix} \quad (36)$$

Due to the parity space definition, the residual $r(k)$ is independent of the state vector but depends linearly on f' and the faults f^o via the matrices H_2 and H_3 , respectively. Since the purpose of the residual generator is to detect a fault, the following equations must be satisfied:

$$v^T H_2 = 0 \text{ and } v^T H_3 \neq 0. \quad (37)$$

However, the constraints (33) and (37) are generally very restrictive, and it is possible to compute a solution v only in an ideal case. Hence, the residual is practically nonzero even in the fault-free case. This problem could be overcome by replacing the vector v by Pv in the relation (37). In this case, $r(k)$ must be as small as possible if no fault occurs and

as large as possible otherwise. A natural criterion for achieving this goal is that v has to minimize the following performance index:

$$J = \frac{\|v^T P^T H_2\|_2^2}{\|v^T P^T H_3\|_2^2} \quad (38)$$

A procedure for solving this optimization problem is proposed using generalized singular-value decomposition (GSVD) [13], [20]. The main advantage of this tool is that it is numerically reliable and can easily handle the near-singularity case where the product $P^T H_3$ is almost rank deficient.

Residual Evaluation and Decision Making

Fault isolation requires the generation of a residual set sensitive to some faults and insensitive to others with respect to isolable structural conditions. Thus, several parity relations are then synthesized according to the dynamic

model of the plant (31). Subsequently, residual evaluation is based on the assumption that if a fault occurs, the statistical characteristic of a sensitive residual is modified. Consequently, it involves the use of statistical tests such as the Page Hinkley-test, the limit-checking test, the generalized likelihood ratio test, and the trend analysis test [4]. Here, each residual r_i produced by the i th parity relation may be used to detect a fault according to a statistical test. A symptom $S(r_i(k))$ associated with this residual is equal to zero in the fault-free case and is set to one when a fault is detected. An output vector of the statistical test, called the coherence vector $S(r(k))$, can then be built from the bank of m residual generators

$$S(r(k)) = [S(r_1(k)) \cdots S(r_m(k))]^T \quad (39)$$

Two different approaches must be developed according to the accuracy of the model and the amplitude of the per-

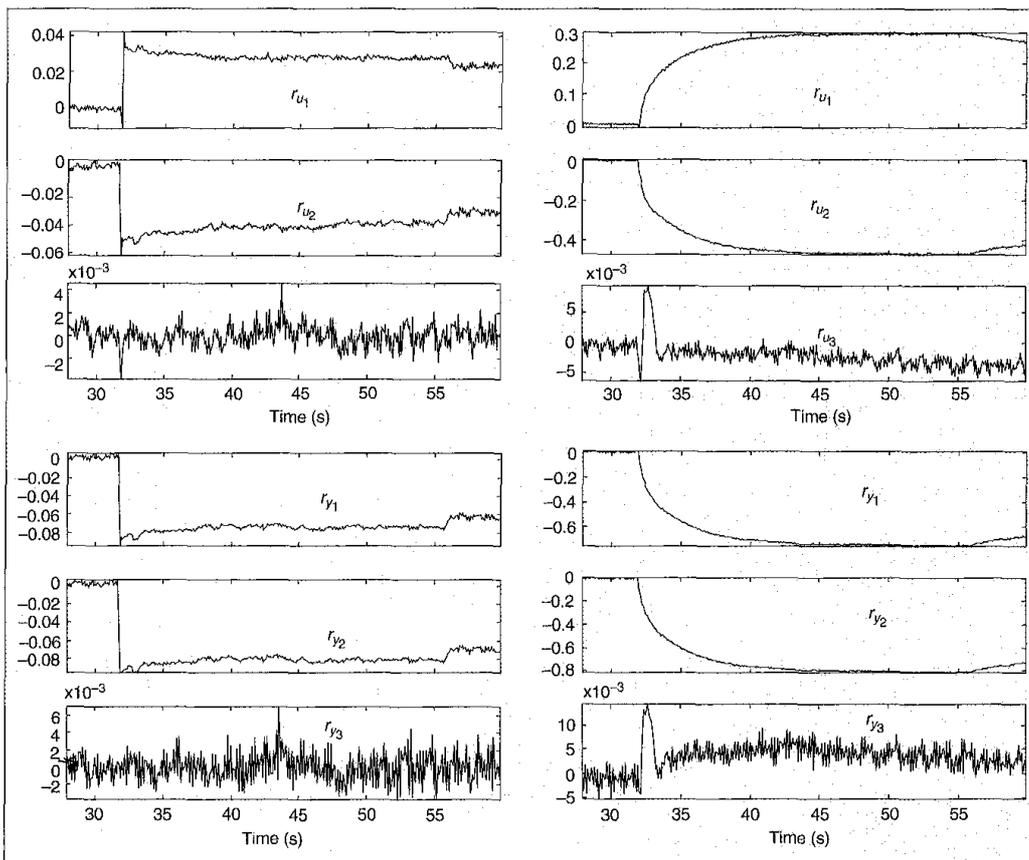


Figure 8. Residuals behavior for sensor fault (left column) and actuator fault (right column).

Table 3. Practical inference matrix.

$S(r)$	$S_{ref, no\ fault}$	$S_{ref, fu_1\ or\ fy_1}$	$S_{ref, fu_2\ or\ fy_2}$	$S_{ref, fu_3\ or\ fy_3}$
$S(r_{u_1})$	0	0	1	1
$S(r_{u_2})$	0	1	0	1
$S(r_{u_3})$	0	1	1	0
$S(r_{y_1})$	0	0	1	1
$S(r_{y_2})$	0	1	0	1
$S(r_{y_3})$	0	1	1	0

Table 4. Theoretical inference matrix.

$S(r^1)$	$S_{ref, no\ fault}^1$	$S_{ref, fu}^1$	S_{ref, fy_1}^1	S_{ref, fy_2}^1	S_{ref, fy_3}^1
$S(r_{y_1}^1)$	0	1	0	1	1
$S(r_{y_2}^1)$	0	1	1	0	1
$S(r_{y_3}^1)$	0	1	1	1	0

turbations. If the effects of the unstructured uncertainties are very weak, and if the model outputs are close to the real measurements, each residual is synthesized to be sensitive to only one fault, and the coherence vector is then compared to the fault signatures S_{ref, f_i} associated with the fault defining the inference matrix (Table 1a). In contrast to this ideal case, the residual generators are built to produce a signal sensitive to all faults except one, as represented on the inference matrix (Table 1b). In this case, they are more robust to uncertainties, which corrupt the residual value.

Decision making is then realized according to an elementary logic [28] that can be described as follows: an indicator $I(f_i)$ is equal to one if $S(r(k))$ is equal to the i th column of the incidence matrix (S_{ref, f_i}) and is equal to zero otherwise. The element associated with the indicator equal to one is then declared to be faulty.

Table 5. Global decision table.

		First Bank			
		$I(fu_1\ or\ fy_1)$	$I(fu_2\ or\ fy_2)$	$I(fu_3\ or\ fy_3)$	$I(no\ fault)$
Second Bank	$I^1(fy_1)$	$I_g(fy_1)$			
	$I^1(fy_2)$		$I_g(fy_2)$		
	$I^1(fy_3)$			$I_g(fy_3)$	
	$I^1(fu)$	$I_g(fu_1)$	$I_g(fu_2)$	$I_g(fu_3)$	
	$I^1(no\ fault)$				$I_g(no\ fault)$

General Scheme

The general concept of this approach is summarized by Fig. 3. The FDI module consists of residual generation, residual evaluation, and finally the decision as to which sensor or actuator is faulty. The fault estimation and compensation module starts the computation of the additive control law and is only able to reduce the fault effect on the system once the fault is detected and isolated. Obviously, the fault detection and isolation must be achieved as soon as possible to avoid huge losses in system performance or catastrophic consequences.

Application

Process Description

The method proposed in this article has been applied to a winding machine representing a subsystem of many industrial systems such as sheet and film processes [9], steel industries [22], and so on. The system is composed of three reels driven by dc motors (M_1 , M_2 , and M_3), gear reduction coupled with the reels, and a plastic strip (Fig. 4). Motor M_1 corresponds to the unwinding reel, M_3 is the rewinding reel, and M_2 is the traction reel. The angular velocity of motor M_2 (Ω_2) and the strip tensions between the reels (T_1 , T_3) are measured using a tachometer and tension-meters, respectively. Each motor is driven by a local controller. Torque control is achieved for motors M_1 and M_3 , while speed control is realized for motor M_2 [6]. For a multivariable control application, a dSPACE board associated with MATLAB/Simulink software is used.

The control inputs of the three motors are U_1 , U_2 , and U_3 . U_1 and U_3 correspond to the current set points I_1 and I_3 of the local controller. U_2 is the input voltage of motor M_2 . In winding processes, the main goal usually consists of controlling tensions T_1 and T_3 and the linear velocity of the strip. Here, the linear velocity is not available for measurement, but since the traction reel radius is constant, the linear velocity can be controlled by the angular velocity Ω_2 . Figure 5 illustrates a simplified multivariable block diagram of the winding machine.

System Identification

The system is considered to be linear around a given operating point, and the corresponding analytical model is obtained using an ARX structure. This model describes the dynamic behavior of the system in terms of input/output variations Δu and Δy around the operating point (u_0, y_0) . For simplicity of notation, (u, y) are used instead of $(\Delta u, \Delta y)$. The data set used for the parameter-identification step is composed of pseudo-random binary sequence signals applied to the system and their corresponding outputs. This data set is displayed in Fig. 6. The sampling interval is $T_s = 0.1$ s. The signals collected via the dSPACE board are given in the interval $[-1, 1]$, corresponding to $[-10\text{ V}, 10\text{ V}]$. Therefore, the linearized model of the winding machine around the operating point (u_0, y_0) is given by the following discrete state-space representation:

$$u_0 = [-0.15 \ 0.6 \ 0.15]^T \quad y_0 = [0.6 \ 0.55 \ 0.4]^T \quad (40)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (41)$$

with

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} T_1 \\ \Omega_2 \\ T_3 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0.4126 & 0 & -0.0196 \\ 0.0333 & 0.5207 & -0.0413 \\ -0.0101 & 0 & 0.2571 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} -1.7734 & 0.0696 & 0.0734 \\ 0.0928 & 0.4658 & 0.1051 \\ -0.0424 & -0.093 & 2.0752 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

C is the identity matrix I_3 . The system described by these matrices is completely observable and controllable.

Nominal Control Results

A nominal control law is first set up according to the tracking control design described earlier. The feedback control gain matrix K is computed using the LQI technique such that the following cost function is minimized:

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N (\tilde{x}^T(k)Q\tilde{x}(k) + u^T(k)Ru(k)) \\ u(k) &= -K\tilde{x}(k) = -[K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (42)$$

The weighting matrices Q and R are nonnegative symmetric and positive definite symmetric matrices, $Q = 0.05I_6$ and $R = 0.1I_3$, respectively. Fig. 7(a) and 7(b) show the dynamic responses of the tracked outputs and their corresponding control inputs for step changes in the reference inputs.

FDI Results

Actuator and Sensor Faults. Actuator and sensor faults have been created on the system to illustrate the theory de-

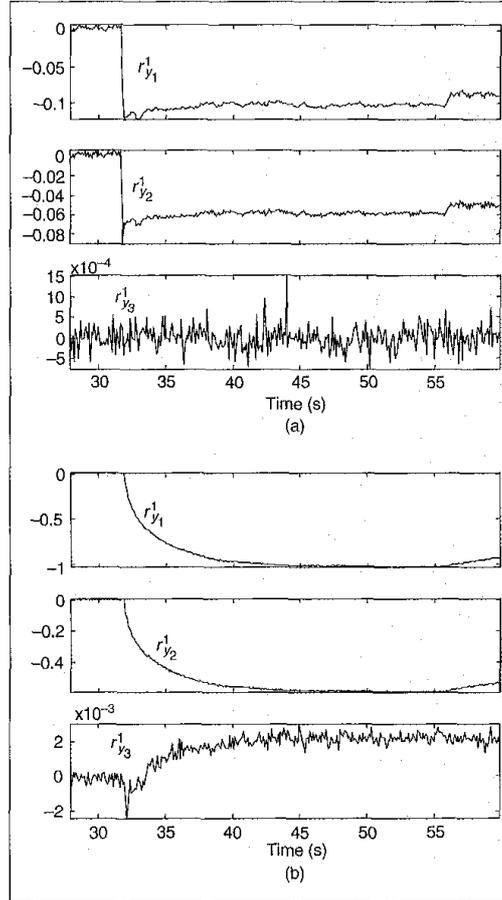


Figure 9. Residuals behavior for (a) sensor fault and (b) actuator fault.

veloped above. First, we consider an actuator fault, which corresponds to a loss in the i th actuator effectiveness. To do so without breaking the system, the i th control input U_i applied to the system is equal to the control input computed by the controller, multiplied by a constant coefficient k_i ($0 < k_i < 1$). In this application, the effectiveness of the third actuator M_3 is reduced by 70% ($k_3 = 0.3$) and appears at an instant 32 s. According to the actuator fault description given earlier, this fault corresponds to a coefficient $\alpha_3 = -0.7$ and appears abruptly on the system.

Then, in a similar way, a fault on the sensor measuring the strip tension T_3 has been created with the same experimental conditions

$$T_{3f}(k) = T_3(k) + \delta T_3(k), \quad (43)$$

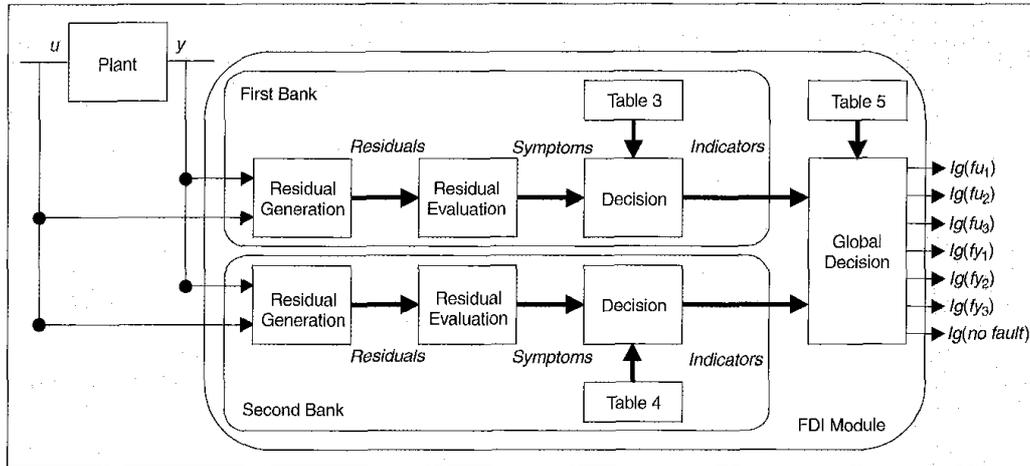


Figure 10. FDI architecture.

where T_3 is the real value of the strip tension and δT_3 is the fault magnitude that affects the sensor. Here, a constant bias $\delta T_3(k) = -0.1$ appears at an instant 32 s.

Fault Detection and Isolation. In this article, we assume that only a single fault (actuator or sensor fault) may occur at a given time. Hence, the unknown input f^o considered in (31) is a scalar.

In the case of an i th actuator fault, the system can be represented according to (31) by

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + B_i f^o(k) + [\bar{B}_i \ 0] f^c(k) \\ y(k) &= Cx(k) + [0 \ I] f^c(k), \end{aligned} \quad (44)$$

Table 6. Detection and isolation delays.		
	Fault Occurrence	Fault Isolation
Fault on sensor 3	32 s	32.4 s
Fault on actuator 3	32 s	32.6 s

Table 7. Tracking error norm.			
	Nominal	With FTC	Without FTC
$\|e_{r_1}\|_2$	0.3451	0.3453	0.3506
$\|e_{r_2}\|_2$	0.1187	0.1190	0.1196
$\|e_{r_3}\|_2$	0.4127	0.7913	1.4692

where B_i is the i th column of matrix B and \bar{B}_i is matrix B without the i th column.

In the same spirit, for a j th sensor fault, the system is described as

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + [B \ 0] f^c(k) \\ y(k) &= Cx(k) + E_j f^o(k) + [0 \ \bar{E}_j] f^c(k), \end{aligned} \quad (45)$$

where $E_j = [0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0]^T$ represents the j th sensor fault effect on the output vector and \bar{E}_j is the identity matrix without the j th column.

In this application, using the parity space approach, a bank of six residuals ($q + m$) can be set up; three of them (noted r_{u_i}) are generated using (44) and the others (noted r_{y_j}) using (45). The inference matrix, presented in Table 2, defines the various fault signatures associated with the bank of residuals.

$S(r_{\sigma_i})$ represents the symptom obtained from evaluation of the residual r_{σ_i} , and S_{σ_i, f^o} represents the fault signature associated with the i th actuator for $\sigma = u$ and the i th sensor for $\sigma = y$. The set of residuals obtained in the presence of the third sensor and actuator faults is illustrated by Fig. 8.

For the fault on sensor three, residuals r_{u_3} and r_{y_3} are close to zero, but normally, the residual r_{u_3} must not be of zero mean because, in the residual synthesis, $v^T H_3 \approx 0$ (37). Also note that these residuals are different from zero at the time the actuator fault occurs. These features do not correspond to the expected results. Thus, rather than implementing a complex isolation method able to avoid false alarms and missed detection, the residual evaluation is adapted to be insensitive to this behavior by using a Page-Hinkley test. Moreover, another residual bank is established to perform the complete isolation task as described later.

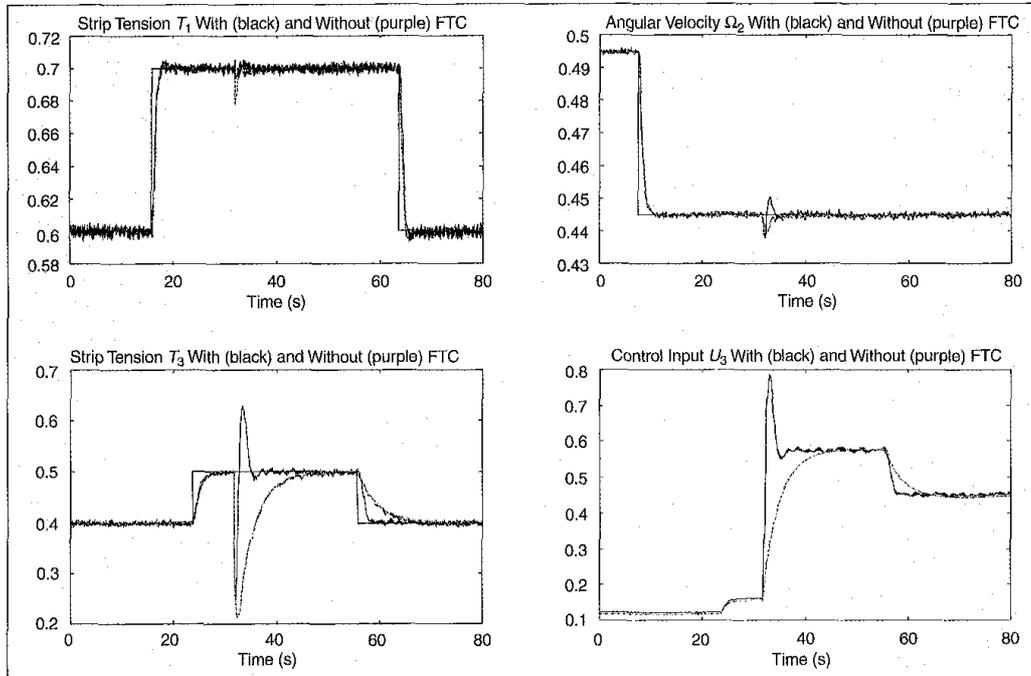


Figure 11. Time evolution of the system inputs/outputs.

The same experiments have been conducted on the other sensors and actuators and the same remarks can be noted; the fault signature for an i th sensor fault or i th actuator fault are identical. Therefore, based on an experimental data set, a practical inference matrix is built (see Table 3), where $S_{net,fa,or,fs}^i$ represents the fault signature associated with the i th actuator or with the i th sensor.

An elementary logic is used to localize and generate fault indicators associated with each fault signature. Then, to distinguish the i th faulty actuator from the i th faulty sensor, another bank of residuals is considered. It is based on the principle that an i th residual is driven by all inputs and outputs except the i th output. With this bank, it is possible to localize the faulty sensor or detect a possible faulty actuator (but without actuator isolation). Table 4 shows the associated inference matrix, where $S(r_{y_i}^1)$ represents the symptom obtained from the evaluation of the residual $r_{y_i}^1$ generated using all inputs and outputs $y_j (j \neq i)$. $S_{net,fa}^1$ represents the fault signature associated with the three actuators.

The set of residuals obtained in the presence of the third sensor and actuator faults is illustrated by Fig. 9. These residuals are evaluated using the Page-Hinkley test. The same experiments have been conducted on the other sensors and actuators, and the same conclusions can be established: these results correspond to

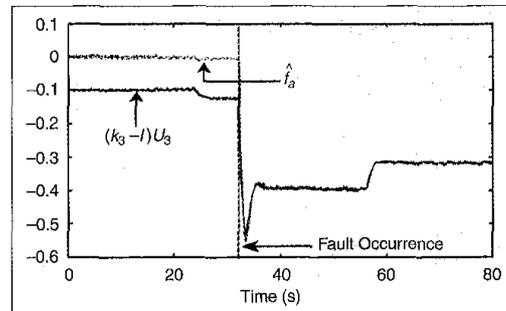


Figure 12. Actuator fault magnitude estimation.

those expected in the theoretical inference matrix (Table 4). An elementary logic is again used for the decision-making task.

These two banks are used in parallel, and a global decision based on the fault indicators of each bank is set up to localize the fault such that

- If the fault indicator $I(fu_i \text{ or } fy_i)$ issued from the first bank is active (equal to one) and the fault indicator $I^1(fy_i)$ issued from the second bank is active, then a global fault indicator $I_g(fy_i)$ is activated that corresponds to a fault on the i th sensor.

- If $I^1(fu)$ is active, then a global fault indicator $I_g(fu_i)$ is activated corresponding to a fault on the i th actuator (Table 5).

The FDI module represented by Fig. 10 has been implemented and has given good results in terms of detection and isolation delays as shown in Table 6.

Actuator Fault Compensation

Once the fault is isolated, the corresponding fault estimation and compensation module is switched on to reduce the fault's effect on the system.

Fig. 11 illustrates dynamic responses of the plant to step changes in the reference inputs around the operating point considered above. The figures clearly show the FTC method's ability to compensate for such faults. Indeed, since an actuator fault acts on the system as a perturbation, and due to the presence of the integral error in the controller, the system outputs again reach their nominal values even without fault compensation.

Fig. 11 shows that, without FTC, the strip tension T_3 (the output more affected by the fault) reaches its corresponding reference input about 18 s after the fault occurrence, whereas it takes only about 4 s using the FTC method. These

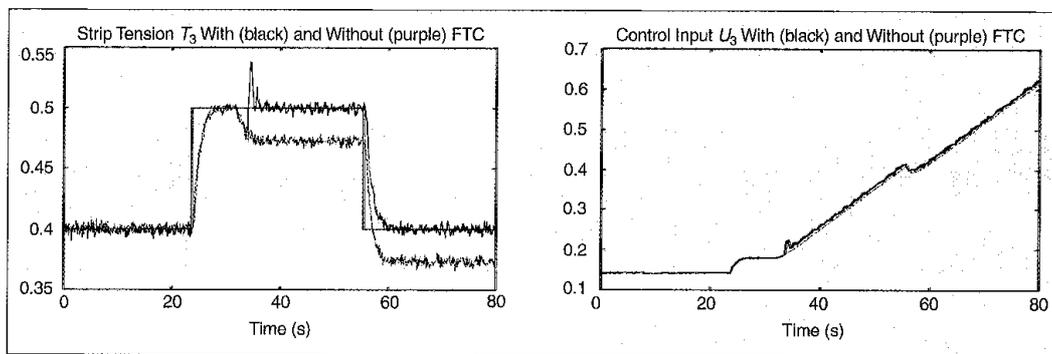


Figure 13. Time evolution of the system inputs/outputs.

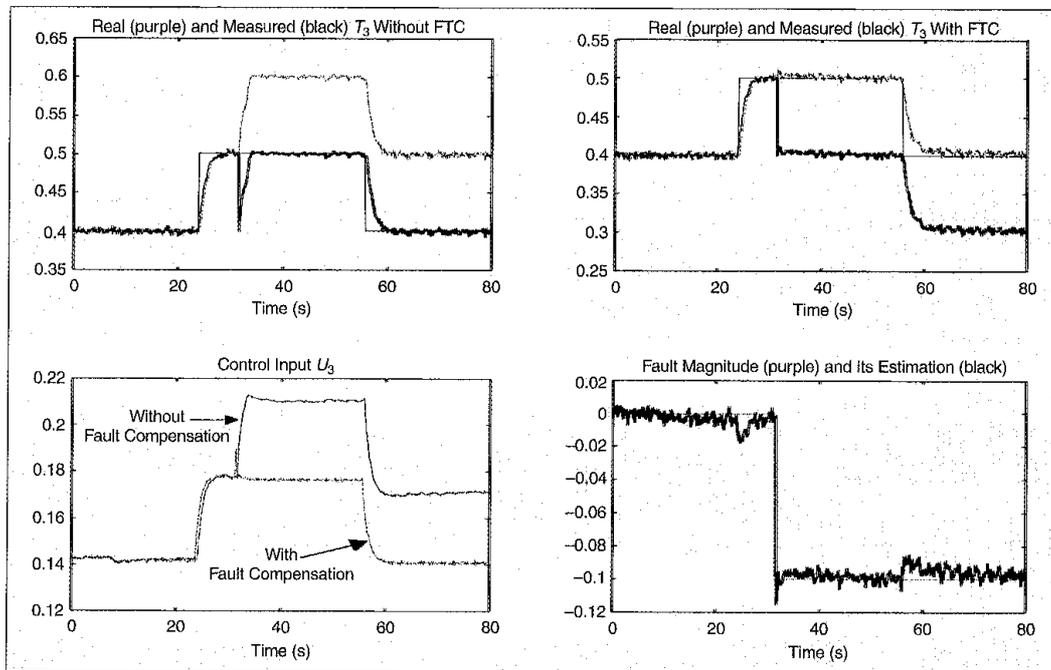


Figure 14. Time evolution of the system inputs/outputs.

results can be confirmed by examining the control input U_3 . Without the FTC method, it increases slowly due to the integral error trying to compensate for the fault effect. On the other hand, the FTC method makes this control input increase quickly and enables the rapid fault compensation.

The fault estimation given by the singular-value decomposition technique presented under "Actuator Fault Estimation" is shown by Fig. 12. It is equal to zero in the fault-free case and to $(k_3 - 1)U_3$ when the fault is isolated.

Moreover, looking at the dynamic behavior in Fig. 11, with a step change of the reference input at 56 s, where the fault is still present, we can see that without fault compensation, the time response is much greater than with the FTC method. The analysis of the tracking error norm also emphasizes the performances of the fault-tolerant control method compared to the nominal control in the presence of an actuator fault (Table 7). It is easy to see that the tracking error norm using the FTC method is smaller than that without fault compensation.

This method can also compensate for actuator ramp faults, which are usually due to material aging and often met in practice. The nominal control law cannot compensate for such faults, although they appear gradually on the system. In the beginning, their effect is not noticeable on the outputs, but as this slope increases, a nonzero static error appears. To illustrate this effect, an additive ramp fault on the third actuator has been created:

$$U_3(k) = U_3(k) - 0.01kT_3. \quad (46)$$

The effect of this fault on the strip tension T_3 appears immediately; the static error is 35% of the reference input step. Figure 13 shows that once the fault is isolated (almost 2 s after its occurrence), the FTC method is able to maintain these outputs at their reference input values as long as the control inputs remain within their physical limits (here these limits are -1 and 1). It is a way to avoid stopping the system immediately after the fault detection.

Sensor Fault Compensation

For the sensor fault considered in the section on actuator and sensor faults, the faulty measurement T_{3f} is an input of the controller. Although the goal is to maintain the real output T_3 at its reference input value, without fault compensation, the controller brings the faulty measurement T_{3f} back to this corresponding reference value due to the integral error. Hence, the real output is far from the desired value (see Fig. 14). But once the fault is identified by the FDI module, the sensor fault estimation is selected and the compensation control law u_{out} is computed and added to the nominal one to cancel the sensor fault effect on the system. The sensor fault magnitude δT_3 and its estimation are also illustrated. The small difference between the real fault magnitude and its estimation is due to modeling errors.

Conclusions

The general fault-tolerant control method described in this article addresses actuator and sensor faults, which often affect highly automated systems. These faults correspond to a loss of actuator effectiveness or fault sensor measurements. After describing these faults, a fault estimation and compensation method was proposed. In addition to providing information to operators concerning the system operating conditions, the fault diagnosis module is especially important in fault-tolerant control systems where one needs to know exactly which element is faulty to react safely.

The method's abilities to compensate for such faults were illustrated by applying it to a winding machine, which represents a subsystem of many industrial systems. The results show that once the fault is detected and isolated, it is easy to reduce its effect on the system, and process control is resumed with degraded performances close to nominal ones. Thus, stopping the system immediately can be avoided. However, the limits of this method are reached when there is the complete loss of an actuator. In this case, only a hardware redundancy is effective and could ensure performance reliability.

The method proposed here assumes the availability of the state variables for measurement. Future studies will focus on development of this method to overcome this assumption, which could be restrictive in practice.

References

- [1] C. Aubrun, D. Sauter, H. Noura, and M. Robert, "Fault diagnosis and reconfiguration of systems using fuzzy logic: Application to a thermal plant," *Int. J. System Sciences*, vol. 24, no. 10, pp. 1945-1954, 1993.
- [2] P. Ballé, M. Fisher, D. Fussel, O. Nelles, and R. Isermann, "Integrated control diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger," *IEEE Contr. Sys. Mag.*, vol. 18, no. 3, pp. 52-64, 1998.
- [3] M. Basseville, "Detecting changes in signals and systems—a survey," *Automatica*, vol. 24, pp. 309-326, 1988.
- [4] M. Basseville and I. Nikiforov, *Detection of Abrupt Changes, Theory and Application*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [5] A. Bassong-Onana, M. Darouach, and G. Krzakala, "Optimal estimation of state and inputs for stochastic dynamical systems with unknown inputs," *Tooldiag'93, Int. Conf. on Fault Diagnosis*, Toulouse, France, pp. 267-275, 1993.
- [6] T. Bastogne, H. Noura, P. Silille, and A. Richard, "Multivariable identification of a winding process by subspace methods for a tension control," *Cont. Eng. Pract.*, vol. 6, no. 9, pp. 1077-1088, 1998.
- [7] R.V. Beard, "Failure accommodation in linear systems through self-reorganization," Ph.D. dissertation, Dept. Aero. Astro, M.I.T., Cambridge, MA, 1971.
- [8] M. Bodson and J. Groszkiewicz, "Multivariable adaptive algorithms for reconfigurable flight control," *IEEE Trans. Cont. Sys. Tech.*, vol. 5, no. 2, pp. 217-229, 1997.
- [9] R.D. Braatz, B.A. Ogunnaike, and A.P. Featherstone, "Identification, estimation and control of sheet and film processes," in *Proc. 13th Triennial IFAC World Congress*, San Francisco, CA, 1996, pp. 319-324.
- [10] J. Chen, R.J. Patton, and Z. Chen, "An LMI approach to fault tolerant control of uncertain systems," *IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, Gaithersburg, MD, pp. 175-180, 1998.
- [11] E.Y. Chow and A.S. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. AC-29, pp. 603-614, 1984.
- [12] J. D'Azzo and C.H. Houpis, *Linear Control System Analysis and Design, Conventional and Modern* (McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering). New York: McGraw-Hill, 1995.
- [13] B. De Moor, J. Staar, and J. Vandewalle, "Oriented energy and oriented signal-to-signal ratio concepts in the analysis of vector sequences and time

- series," in *SVD and Signal Processing, Algorithms, Applications and Architectures*, North Holland: Elsevier, pp. 209-232, 1988.
- [14] P.M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy—a survey and some new results," *Automatica*, vol. 26, pp. 459-474, 1990.
- [15] P.M. Frank, "Advances in observer-based fault diagnosis," *Tooldiag'93, Int. Conf. on Fault Diagnosis*, Toulouse, France, vol. 3, pp. 817-836, 1993.
- [16] P.M. Frank, "Enhancement of robustness in observer-based fault detection," *Int. J. Control*, vol. 59, no. 4, pp. 955-983, 1994.
- [17] Z. Gao and P.J. Antsaklis, "Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control," *Int. J. Control*, vol. 53, no. 3, pp. 717-729, 1991.
- [18] Z. Gao and P.J. Antsaklis, "Reconfigurable control system design via perfect model following," *Int. J. Control*, vol. 56, no. 4, pp. 783-798, 1992.
- [19] J. Gertler and D. Singer, "A new structural framework for parity equations based failure detection and isolation," *Automatica*, vol. 26, pp. 381-388, 1990.
- [20] G. Golub and C. Von Loan, *Matrix Computations*. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ. Press, 1983.
- [21] F. Hamelin, D. Sauter, and D. Theilliol, "Some extensions to the parity space method for FDI using alternated Projection Subspaces," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, New Orleans, LA, 1995.
- [22] I. Hoshino, Y. Maekawa, T. Fujimoto, H. Kimura, and H. Kimura, "Observer-based multivariable control of the aluminum cold tandem mill," *Automatica*, vol. 24, no. 6, pp. 741-754, 1988.
- [23] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods – A survey," *Automatica*, vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [24] J. Jiang and Q. Zhao, "Fault tolerant control systems synthesis using imprecise fault identification and reconfigurable control," in *Proc. IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, Gaithersburg, MD, 1998, pp. 169-174.
- [25] H.L. Jones, "Failure detection in linear systems," Ph.D. dissertation, Dept. Aero. Astro, M.I.T., Cambridge, MA, 1973.
- [26] S.M. Joshi, "Design of failure accommodating multi loop LQG type controllers," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. 32, no. 8, 1987.
- [27] W.A. Kwong, K.M. Passino, E.G. Laukonen, and S. Yurkovich, "Expert supervision of fuzzy learning systems for fault tolerant aircraft control," *Proc. IEEE*, vol. 83, no. 3, 1995.
- [28] S. Leonhardt and M. Ayoubi, "Methods of fault diagnosis," *Cont. Eng. Pract.*, vol. 5, pp. 683-692, 1997.
- [29] D.P. Looze, J.L. Weiss, J.S. Fterno, and N.M. Barott, "An automatic redesign approach for restructurable control systems," *IEEE Cont. Sys. Mag.*, pp. 16-22, 1985.
- [30] X.C. Lou, A.S. Willsky, and G.C. Verghese, "Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems," *Automatica*, vol. 22, pp. 333-344, 1986.
- [31] W.D. Morse and K.A. Ossman, "Model following reconfigurable flight control system for the AFTI/F1-16," *J. Guidance*, vol. 13, no. 6, pp. 969-976, 1990.
- [32] G.A. Murad, I. Posthethwaite, and D.W. Gu, "A robust design approach to integrated controls and diagnostics," in *Proc. 13th IFAC World Congress*, San Francisco, CA, 1996, pp. 199-204.
- [33] C.N. Nett, J.A. Jacobson, and A.T. Miller, "An integrated approach to control and diagnostics: The four-parameter controller," in *Proc. IEEE American Control Conf.*, Atlanta, GA, 1988, pp. 824-835.
- [34] H. Noura, D. Sauter, and F. Hamelin, "Evaluation of a fault-tolerant control design for actuator faults," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, San Diego, CA, 1997.
- [35] Y. Ochi and K. Kanai, "Design of restructurable flight control systems using feedback linearization," *J. Guidance*, vol. 14, no. 5, pp. 903-911, 1991.
- [36] R.J. Patton, P.M. Frank, and R.N. Clark, *Fault Diagnosis in Dynamic Systems—Theory and Application*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- [37] R.J. Patton and J. Chen, "A review of parity space approaches to fault diagnosis," *IFAC SAFEPROCESS'91*, Baden-Baden, Germany, vol. 1, pp. 239-255, 1991.
- [38] R.J. Patton and J. Chen, "Robust fault detection using eigenstructure assignment: A tutorial considerations and some new results," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Brighton, UK, 1991, pp. 837-841.
- [39] R.J. Patton and J. Chen, "Optimal unknown input distribution matrix selection in robust fault diagnosis," *Automatica*, vol. 29, no. 4, pp. 837-841, 1993.
- [40] R.J. Patton, "Fault tolerant control: The 1997 situation (survey)," *IFAC SAFEPROCESS'97*, Hull, UK, August 26-28, vol. 2, pp. 1033-1055, 1997.
- [41] P.P. Polycarpou and A.J. Helmicki, "Automated fault detection and accommodation: A learning systems approach," *IEEE Trans. Sys., Man, Cybernet.*, vol. 25, pp. 1447-1458, 1995.
- [42] H.E. Rausch, "Autonomous control reconfiguration," *IEEE Cont. Sys. Mag.*, vol. 15, no. 6, pp. 37-49, 1995.
- [43] D. Sauter, F. Hamelin, and H. Noura, "Fault tolerant control in dynamic systems using convex optimization," in *Proc. IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conf.*, Gaithersburg, MD, 1998, pp. 187-192.
- [44] D. Sauter and F. Hamelin, "Frequency-domain optimization for robust fault detection and isolation in dynamic systems," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. 44, no. 4, pp. 878-883, 1999.
- [45] J. Stoustrup, M.J. Grimble, and H. Niemann, "Design of integrated systems for the control and detection of actuator/sensor faults," *Sensor Rev.*, vol. 17, no. 2, pp. 138-149, 1997.
- [46] D. Theilliol, H. Noura, and D. Sauter, "Fault-tolerant control method for actuator and component faults," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, Tampa, FL, 1998.
- [47] M.L. Tyler, "Optimal and robust design of integrated control and diagnostic modules," in *Proc. IEEE American Control Conf.*, 1994, pp. 2060-2064.
- [48] R.J. Veillette, J.V. Medanic, and W.R. Perkins, "Design of reliable control systems," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. 37, no. 3, pp. 290-304, 1992.
- [49] N. Viswanadham and R. Sridhander, "Fault detection using unknown-input observers," *Control Theory and Advanced Technology (MITA)*, vol. 3, pp. 91-101, 1987.
- [50] H. Wang and S. Daley, "Actuator fault diagnosis: An adaptive observer based technique," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. 41, pp. 1073-1078, 1996.
- [51] H. Wang, Z.J. Huang, and S. Daley, "On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis," *Automatica*, vol. 33, no. 2, pp. 217-227, 1997.
- [52] J.E. White and J.L. Speyer, "Detection filters design: Spectral theory and algorithms," *IEEE Trans. Automat. Cont.*, vol. 32, pp. 593-603, 1987.
- [53] A.S. Willsky, "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems," *Automatica*, vol. 12, pp. 601-611, 1976.
- [54] E. Wu, Y. Zhang, and K. Zhou, "Control effectiveness estimation using an adaptive Kalman estimator," in *Proc. IEEE ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference*, Gaithersburg, MD USA, 1998, pp. 181-186.
- [55] F.A. Zaid, P. Ionnaou, K. Gousman, and R. Rooney, "Accommodation of failures in the F16 aircraft using adaptive control," *IEEE Cont. Sys. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 73-84, 1991.
- [56] Q. Zhao and J. Jiang, "Reliable state feedback control system design against actuator failures," *Automatica*, vol. 34, no. 10, pp. 1267-1272, 1998.

Appendix

In the case where matrix B is not of full row rank (that is, the number of system inputs is less than the number of system states), the designer chooses to maintain as many priority outputs as control inputs to the detriment of other secondary outputs. To be as close as possible to the original system, these priority outputs are composed of the tracked outputs and other remaining outputs. This is achieved at the control law design stage using, if necessary, a transformation matrix T such that

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_p(k+1) \\ x_s(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{pp} & A_{ps} \\ A_{sp} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(k) \\ x_s(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ B_s \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} F_{ap} \\ F_{as} \end{bmatrix} f_a(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} y_p(k) \\ y_s(k) \end{bmatrix} = C_T \begin{bmatrix} x_p(k) \\ x_s(k) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (47)$$

where the index p represents the priority variables and s corresponds to the secondary variables. In this way, B_p is a nonsingular square matrix, the state feedback gain matrix K_1 is also decomposed into $K_1 = [K_p \quad K_s]$, and the control law is then given by

$$u(k) = -[K_p \quad K_s \quad K_z] \begin{bmatrix} x_p(k) \\ x_s(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + u_{ad}(k). \quad (48)$$

Substituting (48) in (47) yields:

$$x_p(k+1) = (A_{pp} - B_p K_p)x_p(k) - B_p K_z z(k) + (A_{ps} - B_p K_s)x_s(k) + F_{ap} f_a(k) + B_p u_{ad}(k) \quad (49a)$$

$$x_s(k+1) = (A_{ss} - B_s K_s)x_s(k) - B_s K_z z(k) + (A_{sp} - B_s K_p)x_p(k) + F_{as} f_a(k) + B_s u_{ad}(k). \quad (49b)$$

Here, the fault effect must be eliminated in the priority state variables x_p . Thus, from relation (49a), this can be achieved by solving the following relation:

$$(A_{ps} - B_p K_s)x_s(k) + F_{ap} f_a(k) + B_p u_{ad}(k) = 0. \quad (50)$$

In this decomposition, if x_s is not available for measurement, it can be computed from the output equation in (47), because here C_v is a full-column rank matrix. Then, using the fault estimation \hat{f}_a , the additive control law solution of (50) is

$$u_{ad}(k) = -B_p^{-1}[(A_{ps} - B_p K_s)x_s(k) + F_{ap} \hat{f}_a(k)]. \quad (51)$$

The main goal is to annihilate the fault on the priority outputs. This is realized by choosing the transformation matrix T such that

$$C_v = \begin{bmatrix} C_{v11} & 0 \\ C_{v21} & C_{v22} \end{bmatrix}$$

Although the secondary outputs are not compensated for, they must remain stable in the faulty case. Let us examine these secondary variables. Replacing (51) in (49b) leads to:

$$x_s(k+1) = (A_{ss} - B_s B_p^{-1} A_{ps})x_s(k) - B_s K_z z(k) + (A_{sp} - B_s K_p)x_p(k) + (F_{as} - B_s B_p^{-1} F_{ap})\hat{f}_a(k). \quad (52)$$

It is easy to see that the secondary variables are stable if and only if the eigenvalues of the matrix $(A_{ss} - B_s B_p^{-1} A_{ps})$ belong to the unit circle.

Hassan Noura was born in Ablah, Lebanon, in 1965. He received his Ph.D. in automatic control engineering from the Henri Poincaré University, Nancy, France, in 1993. He has been with the Research Center for Automatic Control of Nancy and has been an associate professor since 1994. His research interests include fault diagnosis and fault-tolerant control.

Dominique Sauter received his Ph.D. in 1991 from the University Henri Poincaré, Nancy, France. Since 1993, he has been a full professor at this university, where he teaches automatic control. He has been the director of the Institut Universitaire Professionnalisé in electrical engineering for two years. He is a member of the Research Center in Automatic Control of Nancy (CRAN), associated with the French National Center for Scientific Research (CNRS). He is also a member of the French German Institute on Automatics and Robotics (IAR), where he chairs a working group on intelligent control and fault diagnosis. His current research interests are focused on model-based fault diagnosis and fault tolerance with emphasis on industrial applications.

Frédéric Hamelin obtained his Ph.D. in automatic control from the Henri Poincaré University, Nancy, France, in 1995. He has been an associate professor at this university. His current research interests are robust fault diagnosis and fault-tolerant control.

Didier Theilliol earned his Ph.D. in control engineering from the Henri Poincaré University, Nancy, France, in 1993. He has been an associate professor at the Research Centre for Automatic Control of Nancy since 1994. Theilliol's research experience includes identification of nonlinear SISO systems with multilayer neural networks and decision support systems within the framework of its participation in a European project (Eureka Project EU 996 Maine Dialogs) for three years. Current research interests include robust fault diagnosis and fault-tolerant control.

[CI_43]

- M.A. Medina, **D. Theilliol**, D. Sauter.

“Simultaneous fault diagnosis and robust model selection in multiple linear models framework.” Dans *5e IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS*, Washington, District de Colombie, USA, Juin 2003, pp. 513-518..

**SIMULTANEOUS FAULT DIAGNOSIS AND
ROBUST MODEL SELECTION IN MULTIPLE
LINEAR MODELS FRAMEWORK**

M. Adam-Medina, D. Theilliol and D. Sauter

*Centre de Recherche en Automatique de Nancy
CNRS UMR 7039
B.P. 239, 54506, Vandoeuvre Cedex, France.
Phone: 33 383 684 462 - Fax: 33 383 684 461
email: medina@cran.uhp-nancy.fr*

Abstract: In this paper, the main goal is to design an approach that performs fault detection and isolation in non linear system. Fault diagnosis is established by regarding system as an interpolation of multiple linear time invariant stochastic models and not as a single global model. In multiple model framework, the purpose of the paper consist of generate a robust model selection of the "best" representative linear model. Fault diagnosis method presented here is based on a bank of decoupled Kalman filters. The proposed method allows detection, isolation and estimation of multiple faults which appear simultaneously or in a sequential way. Robust model selection is obtained by regarding the residual vector insensitive to faults. Performances of the method are tested on a simulation example. *Copyright@2003 IFAC.*

Keywords: Fault detection and isolation, nonlinear system, Kalman filter, multiple faults, multiple linear models.

1. INTRODUCTION

Fault detection and isolation (FDI) has been developed traditionally with model-based approaches using linear or linearized models. Several papers have been published; these works led to robust methods of parametric uncertainties and system modelling errors when noise is or is not present (CHEN and PATTON, 1999), (FRANK and DING, 1997) and (GERTLER, 1998). These diagnosis methods are based on residual generation. However, when the system operating range becomes wider, the linearized model is no longer able to represent the dynamic system. One solution is to use nonlinear (NL) methods. FDI problems have been resolved using NL observers. These observers have been proposed under analytical approach by (ALCORTA-GARCÍA and FRANK, 1997) and geometric approach by (De PERSIS and ISIDORI,

2000) which require a perfect knowledge of NL system. Generally, the system cannot be modeled by explicit mathematical models. In order to solve this problem, some methods based on neural networks have been proposed by (NARENDRA *et al.*, 1995). In the philosophy "divide and conquer", Takagi-Sugeno structure based on a fuzzy logic systems has been proposed to resolved FDI problems. (CHEN and PATTON, 1999) have proposed FDI scheme using linear observers and Takagi-Sugeno configuration for NL system representation in the deterministic case. This technique is based on the decomposition of the original system into a set of linear models. This structure is considered as multiple model (MM) approach (MURRAY-SMITH and JOHANSEN, 1997). In NL systems, the MM structure has been proposed for control domain. The robust control using one con-

troller has been presented in (BANERJEE *et al.*, 1995), the multi-control technique such as gain scheduling (LEITH and LEITHEAD, 2000) and adaptive or learning control based on neural network (NARENDRA *et al.*, 1995) have been developed. However, these methods have not been frequently used for FDI. The MM technique allows FDI when the NL system is modeled around one operating point (MAYBECK, 1999) or when the system is defined as a linear hybrid system (ZHANG and LI, 1998). In this paper, we consider the MM approach in the same context as in (CHEN and PATTON, 1999), using a statistical method developed in (MAYBECK, 1999). Our goal is to design a scheme which allows FDI and a robust model selection in the MM context. To achieve this purpose, a bank of decoupled Kalman filters based on an interpolated multiple model is developed. This bank is designed so that residual vectors can be separated in two parts: a residual vector insensitive to faults and a residual vector sensitive to faults. These residuals allow one to determine the best linear model and to detect, isolate and estimate faults. The paper is organised as follows: in the second section, the general problem of fault diagnosis and robust selection in nonlinear systems described by MM is developed. A solution based on the design of a bank of decoupled Kalman filters is then developed and justified. The third section is devoted to the illustration of the suggested method by considering an open loop nonlinear system in the presence of sensor faults. The last section is devoted to the conclusions and future search.

2. FAULT DIAGNOSIS IN NONLINEAR SYSTEMS

2.1 Problem statement

Dynamic systems such as nonlinear, linear time-invariant, linear time-variant, hybrid and piecewise can be represented by a decomposition of the full operating range into a number of possibly overlapping operating regimes (LEITH and LEITHEAD, 2000). For each regime, a simple local linear system is defined. Let us assume the following general faulty stochastic system and only additive fault assumptions as considered by :

$$\begin{cases} X(k+1) = A_j X(k) + B_j U(k) + \Delta_{X_j} + \omega_j(k) \\ \quad + F_{X_j} f(k) \\ Y(k) = C_j X(k) + D_j U(k) + \Delta_{Y_j} + \nu_j(k) \\ \quad + F_{Y_j} f(k) \end{cases} \quad (1)$$

where $X \in \mathfrak{R}^n$ represents the state vector, $U \in \mathfrak{R}^p$ is the input vector, $Y \in \mathfrak{R}^m$ is the measurement vector and $f \in \mathfrak{R}^q$ is the fault vector. Each linear model is defined around j^{th} operating point, noted $P_j \forall j = [1, 2, \dots, M]$, where M is the total number of operating points. Each operating point is defined by a pair of input/output signals (Y_{P_j}, U_{P_j}). Around the j^{th} operating point it is assumed that $\forall j, \text{rank}(C_j) = m$. The terms ω_j and ν_j are two independent zero mean white noises with variance-covariance matrices defined respectively by Q_j and

R_j . A_j, B_j, C_j and D_j are constant matrices with appropriate dimensions, F_{X_j} and F_{Y_j} are the distribution matrices of actuator faults and sensor faults respectively. Δ_{X_j} and Δ_{Y_j} are vectors depending on the j^{th} linear model.

The linear system (1) can be specified by the set of system matrices:

$$S_j = \begin{bmatrix} A_j & B_j & \Delta_{X_j} & F_{X_j} & \omega_j \\ C_j & D_j & \Delta_{Y_j} & F_{Y_j} & \nu_j \end{bmatrix}, \forall j = [1, 2, \dots, M] \quad (2)$$

Let $S(k)$ be a matrix sequence varying within a convex set (VARGA, 1996), defined as:

$$S(k) := \left\{ \sum_{j=1}^M \varphi_j(k) S_j : \varphi_j(k) \geq 0, \sum_{j=1}^M \varphi_j(k) = 1 \right\} \quad (3)$$

In the MM framework, $S(k)$ characterizes at each sample the NL system. Consequently, the dynamic behavior of NL system can be defined by a convex combination of a LTI model set, noted \mathfrak{S} ($\mathfrak{S} := \{[S_1, S_2, \dots, S_M]\}$).

Without loss of generality, according to (PARK *et al.*, 1994), in the presence of sensor and actuator faults, the system may be represented by a linear system in the presence of actuator faults. This system is defined by the set of system matrices as:

$$S_j = \begin{bmatrix} A_j & B_j & \Delta_{X_j} & F_j & \omega_j \\ C_j & D_j & \Delta_{Y_j} & \nu_j & \end{bmatrix}, \forall j = [1, 2, \dots, M] \quad (4)$$

where F_j is the fault distribution matrix with $\forall j, \text{rank}(F_j) = q$. In order to achieve multi-control and FDI, a Kalman filter is designed. Under assumption that the NL system evolves around the i^{th} operating point, the Kalman filter is described by:

$$\begin{cases} \hat{X}_i(k+1) = A_i \hat{X}_i(k) + B_i U(k) + \Delta_{X_i} \\ \quad + K_i(k)(Y(k) - \hat{Y}_i(k)) \\ \hat{Y}_i(k) = C_i \hat{X}_i(k) + D_i U(k) + \Delta_{Y_i} \end{cases} \quad (5)$$

where $\hat{X}_i \in \mathfrak{R}^n$ denotes the estimated state vector and $\hat{Y}_i \in \mathfrak{R}^m$ is the output estimation obtained from the linear filter based on the i^{th} linear model. $K_i \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ is the Kalman filter gain matrix. Supposing that NL system is represented by a linear model around the i^{th} operating point equivalent to that used by the filter, i.e. $j = i$, the estimated error vector ε_i ($\varepsilon_i(k) = X(k) - \hat{X}_i(k)$) and the output residual vector r_i ($r_i(k) = Y(k) - \hat{Y}_i(k)$) are calculated from equations (4) and (5):

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(k+1) &= (A_i - K_i(k)C_i)\varepsilon_i(k) \\ &\quad + F_j f(k) - K_i(k)\nu_j(k) + \omega_j(k) \end{aligned} \quad (6)$$

$$r_i(k) = C_i \varepsilon_i(k) + \nu_j(k) \quad (7)$$

In fault free case and for notation purposes, the estimated error vector is written as $\bar{\varepsilon}_i$ and the output residual vector is noted \bar{r}_i . Knowing that the system dynamics is specified in exactly M operating points on all the operating range, a bank of Kalman filters defined by the finite set \mathfrak{S} of linear models is established. In the fault free case, the use

of a bank of Kalman filters results in a bank of residuals allowing the selection of the model that is more representative of the NL system dynamic. The residual, generated by the i^{th} filter, is supposed to have Gaussian distribution properties with zero-mean value (noted \mathcal{N}). This residual allows one to evaluate the validity of each linear model. Indeed, (BANERJEE *et al.*, 1995) has considered the residual vector in order to determine the validity probabilities of each linear model, by taking into account the previous measurement according to Bayes probability theory. The valid model is the model that has the greatest probability. The residuals of the filter, considered around the corresponding operating point, follow a Gaussian distribution law. Then, assuming stationarity of residuals, a probability distribution function, written as $\varphi_i(k)$, is defined by:

$$\varphi_i(k) = \frac{\exp\{-0.5 \times r_i(k) \times (\Theta_i(k))^{-1} \times r_i^T(k)\}}{[(2\pi)^m \times \det(\Theta_i(k))]^{1/2}} \quad (8)$$

where $\Theta_i \in \mathbb{R}^m$ is the covariance matrix of the residuals $r_i(k)$. Based on the probability distribution function, a mode probability, noted $\bar{\vartheta}(r_i(k))$, can be computed by the Bayes theorem $\forall i \in [1 \dots M]$ as:

$$\bar{\vartheta}(r_i(k+1)) = \frac{\varphi_i(k) \times \bar{\vartheta}(r_i(k))}{\sum_{h=1}^M \varphi_h(k) \times \bar{\vartheta}(r_h(k))} \quad (9)$$

Therefore, the probability estimation algorithm can get locked onto one model so that the probability converges to one, while that associated to the other model converges to zero. The i^{th} linear model validity is computed using (9).

In the faulty case, the following assessment can be established:

$$\forall f, j = i, \begin{cases} r_i(k) \sim \mathcal{N} & \text{if } f = 0 \\ r_i(k) \not\sim \mathcal{N} & \text{if } f \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

In the MM framework, the construction of a bank of Kalman filters defined from \mathfrak{S} , is considered in order to establish fault detection on all the operating range of the system. The use of such bank of Kalman filters leads us to obtain the estimated error and the output residual vectors for which $j \neq i$. This difference between the representation system to be considered and the filters used model leads, equation (6) and (7) to:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(k+1) &= (A_i - K_i(k)C_i)\varepsilon_i(k) + F_j f(k) \\ -K_i(k)\nu_j(k) + \omega_j(k) + (\Delta\Delta_{X_j}^i - K_i(k)\Delta\Delta_{Y_j}^i)\xi_j^i(k) \end{aligned} \quad (11)$$

and,

$$r_i(k) = C_i\varepsilon_i(k) + \nu_j(k) + \Delta\Delta_{Y_j}^i \xi_j^i(k) \quad (12)$$

where $\xi_j^i \in \mathbb{R}^{(n+p+1) \times 1}$ corresponds to the uncertainties magnitude between NL system represented by the j^{th} linear system and the i^{th} linear model used for the Kalman filters computation. $\Delta\Delta_{X_j}^i \in \mathbb{R}^{n \times (n+p+1)}$ and $\Delta\Delta_{Y_j}^i \in \mathbb{R}^{m \times (n+p+1)}$ are the distribution matrices of uncertainties associated with the state system equation and the output equation respectively. Equations (11) and (12) show that residual is sensitive to modelling errors (i.e. a change in

the operating point) and at the same time to faults. The use of Kalman filters leads to the following residual properties ($\forall i \in [1, \dots, M]$):

$$\begin{aligned} r_i(k) &\sim \mathcal{N}, & \text{if } f = 0, i = j \\ r_i(k) &\not\sim \mathcal{N}, & \text{if } f = 0, i \neq j \\ r_i(k) &\not\sim \mathcal{N}, & \text{if } f \neq 0, \forall i \end{aligned} \quad (13)$$

With these assumptions, direct application of NL system using Kalman filters based on a MM framework can be considered, but at the cost of certain degradations in performance. In faulty cases, FDI cannot be done correctly since the residual vector is corrupted by two pieces of information at the same time: operating point exchanges and fault occurrences. The probabilistic Bayes method cannot define the best representative model. Further more the statistical methods do not allow us to detect and isolate the fault adequately. The study on FDI on all the operating points described by MM can now be considered. In that respect (GERTLER, 1998) suggests an FDI method based on the definition of a global parity vector, this vector is used to achieve the fault diagnosis and not the selection of the most representative model. In this paper, contrary to Gertler, we are interested in knowing which linear model is more representative at each time both in fault free and faulty cases. These considerations yield a new residual generator definition allowing the decoupling of fault effects and modelling errors. This new residual generator gives a first signal insensitive to faults, but sensitive to modelling errors and a second signal sensitive to faults. The new residual generator is expressed as:

$$\tilde{r}_i(k) = \begin{bmatrix} \Sigma \\ \Xi \end{bmatrix} r_i(k) \quad (14)$$

where Σ and Ξ are terms introduced in order to decouple the residuals with appropriate dimensions and $\tilde{r}_i(k)$ is the new residual vector. This consideration led us to study detection filters generating residuals decoupled from faults like (KELLER, 1999), which we have generalized in the multiple model context.

2.2 Robust selection and fault diagnosis system.

Under the hypothesis that a fault occurs at time k_d ($k > k_d$), and that operating point switches at time k_e ($k > k_e$), the residual vector of the i^{th} filter is expressed as:

$$\begin{aligned} r_i(k) &= \bar{r}_i(k) + \Delta\Delta_{X_j}^i \xi_j^i(k) \\ &+ \rho(k, k_d)[f(k_d) f(k_d + 1) \dots f(k - 1)] \\ &+ \beta(k, k_e)[\xi_j^i(k_e) \xi_j^i(k_e + 1) \dots \xi_j^i(k - 1)] \end{aligned} \quad (15)$$

with

$$\rho(k, k_d) = C_i \begin{bmatrix} \Gamma_i^{k_d+1}(k) F_j \\ \Gamma_i^{k_d+2}(k) F_j \\ \dots \\ F_j \end{bmatrix} \quad (16)$$

and

$$\beta(k, k_e) = C_i \begin{bmatrix} \Gamma_i^{k_e+1}(k)(\Delta\Delta_{X_j}^i - K_i(k_e)\Delta\Delta_{Y_j}^i) \\ \Gamma_i^{k_e+2}(k)(\Delta\Delta_{X_j}^i - K_i(k_e+1)\Delta\Delta_{Y_j}^i) \\ \dots \\ (\Delta\Delta_{X_j}^i - K_i(k-1)\Delta\Delta_{Y_j}^i) \end{bmatrix} \quad (17)$$

where

$$\Gamma_i^{(k_d, k_e)}(k) = \prod_{\tau=(k_d, k_e)}^{k-1} L_i(\tau) \quad (18)$$

$$L_i(k) = (A_i - K_i(k)C_i) \quad (19)$$

Equation (15) allows us to confirm that residual is affected by both fault effects and modelling errors. We wish to generate residuals insensitive to fault effects but sensitive only to modelling errors, that is:

$$(A_i - K_i(k)C_i)F_j = 0 \quad (20)$$

Supposing that condition (20) is fulfilled and the number of fault is strictly lower than the number of outputs (i.e., $\forall i, \text{rank}(C_i F_j) = q < m$), a solution was proposed by (KELLER, 1999) which defined a Kalman filter gain as:

$$K_i = \omega_i \Xi_i + \bar{K}_i \Sigma_i \quad (21)$$

with $\Xi_i = (C_i F_j)^+$, $\omega_i = A_i F_j$, $\Sigma_i = \alpha_i (I_m - C_i F_j \Xi_i)$ and $\alpha_i \in \mathbb{R}^{(m-q) \times m}$ is an arbitrary constant matrix defined so that the matrix Σ_i is of full row rank. Taking into account (20), the residual defined in (15) becomes:

$$r_i(k) = \bar{r}_i(k) + \Delta\Delta_{X_j}^i \xi_j^i(k) + C_i F_j [f(k-1)] + \beta(k, k_e) [\xi_j^i(k_e) \xi_j^i(k_e+1) \dots \xi_j^i(k-1)] \quad (22)$$

In the context of this study, the Kalman filter should minimize the trace of the variance-covariance matrix of the estimation error. This minimization is carried out under the existence and stability conditions presented and studied in (KELLER, 1999). According to the equation (21), each detection filter, defined in the equation (5), is described by:

$$\begin{cases} \hat{X}_i(k+1) = A_i \hat{X}_i(k) + B_i U(k) + \Delta_{X_i} \\ \quad + (\omega_i \Xi_i + \bar{K}_i \Sigma_i)(Y(k) - \hat{Y}_i(k)) \\ \hat{Y}_i(k) = C_i \hat{X}_i(k) + D_i U(k) + \Delta_{Y_i} \end{cases} \quad (23)$$

where

$$\bar{K}_i(k) = \bar{A}_i \bar{P}_i(k) \bar{C}_i^T \times (\bar{C}_i \bar{P}_i(k) \bar{C}_i^T + \bar{V}_i)^{-1} \quad (24)$$

$$\bar{P}_i(k+1) = (\bar{A}_i - \bar{K}_i(k) \bar{C}_i) \bar{P}_i(k) (\bar{A}_i - \bar{K}_i(k) \bar{C}_i)^T + \bar{K}_i(k) \bar{V}_i \bar{K}_i^T(k) + \bar{Q}_i \quad (25)$$

with $\bar{A}_i = (A_i - \omega_i \Xi_i C_i)$, $\bar{C}_i = \Sigma_i C_i$, $\bar{V}_i = \Sigma_i R_i \Sigma_i^T$ and $\bar{Q}_i = Q_i + \omega_i \Xi_i R_i \Xi_i^T \omega_i^T$.

According to (21) and the previous matrices properties, the residual vector $\tilde{r}_i(k)$ can be obtained as suggested in (14):

$$\begin{bmatrix} \Sigma_i(Y(k) - \hat{Y}_i(k)) \\ \Xi_i(Y(k) - \hat{Y}_i(k)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_i r_i(k) \\ \Xi_i r_i(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_i(k) \\ \Omega_i(k) \end{bmatrix} = \tilde{r}_i(k) \quad (26)$$

where $\gamma_i(k) \in \mathbb{R}^{m-q}$ is the residual vector decoupled to fault and $\Omega_i(k) \in \mathbb{R}^q$ is the residual vector sensitive to fault. Due to the matrix properties

$\Sigma_i C_i F_j = 0$ and $\Xi_i C_i F_j = I$, each filter residual defined by equation (15) may be developed according to equation (26), into fault insensitive and fault sensitive vectors respectively expressed as:

$$\begin{aligned} \Omega_i(k) &= f(k-1) + \Xi_i(\bar{r}_i + \Delta\Delta_{X_j}^i \xi_j^i(k)) \\ &+ \Xi_i \beta(k, k_e) [\xi_j^i(k_e) \xi_j^i(k_e+1) \dots \xi_j^i(k-1)] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \gamma_i(k) &= \Sigma_i(\bar{r}_i + \Delta\Delta_{X_j}^i \xi_j^i(k)) \\ &+ \Sigma_i \beta(k, k_e) [\xi_j^i(k_e) \xi_j^i(k_e+1) \dots \xi_j^i(k-1)] \end{aligned} \quad (28)$$

Equations (27) and (28) indicate that a bank of Kalman filters, decoupling residuals from faults, provides a solution to fault distinguishability problem in MM approach. Following these assumptions, when NL system operates around the j^{th} operating point, the new residual $\gamma_i(k)$ insensitive to fault has the following properties:

$$\forall f \begin{cases} \gamma_i(k) \sim \mathcal{N} \text{ if } i = j \\ \gamma_i(k) \not\sim \mathcal{N} \text{ if } i \neq j \end{cases} \quad (29)$$

Considering that residual $\gamma_i(k)$ around j^{th} operating point follows a Gaussian distribution, in the same way as (Banerjee et al., 1995) the residuals vector can then be used to compute the probability distribution as:

$$\wp_i(k) = \frac{\exp\{-0.5 \gamma_i(k) \Theta_i^{-1}(k) \gamma_i^T(k)\}}{[(2\pi)^{(m-q)} \det(\Theta_i(k))]^{1/2}} \quad (30)$$

where $\Theta_i(k) \in \mathbb{R}^{m-q}$ defines the covariance matrix of the residuals $\gamma_i(k)$, equal to $(\bar{C}_i \bar{P}_i(k) \bar{C}_i^T + \bar{V}_i)$. The mode probability decoupled from faults is expressed as:

$$\bar{\wp}(\gamma_i(k+1)) = \frac{(\wp_i(k) \times \bar{\wp}(\gamma_i(k)))}{\sum_{h=1}^M \wp_h(k) \times \bar{\wp}(\gamma_i(k))} \quad (31)$$

The probability algorithm allows to obtain the i^{th} linear model describing the system behavior in both fault free and faulty cases. The mode probabilities allow us to determine the operating point around which NL system is evolving. These probabilities are used to isolate the operating point and consequently define a robust model selector. The robust model selector is used to describe the plant behavior as an interpolation of multiple linear models.

Table 1 presents the system behavior in fault free case ($f = 0$) and faulty case ($f \neq 0$) when the plant is described by a finite set \mathfrak{S} of linear systems. This

Table 1. Fault signature table

N L S	m_j	$f = 0$				$f \neq 0$			
		1	2	j	M	1	...	M	
F I L T E R S	1	Ω	0	$\neq 0$	...	$\neq 0$	$\neq 0$	...	$\neq 0$
		γ	0	$\neq 0$	...	$\neq 0$	0	...	$\neq 0$
	2	Ω	$\neq 0$	0	...	$\neq 0$	$\neq 0$	...	$\neq 0$
		γ	$\neq 0$	0	...	$\neq 0$	$\neq 0$	...	$\neq 0$
	i	...	...	...	...	...	...	...	...
M	Ω	$\neq 0$	$\neq 0$	...	0	$\neq 0$	...	$\neq 0$	
	γ	$\neq 0$	$\neq 0$	...	0	$\neq 0$	...	0	

table presents residual vectors $\Omega(k)$ and $\gamma(k)$ for each i^{th} designed filter. These residuals which follow a Gaussian law can be evaluated by various statistical

tests (BASSEVILLE and NIKIFOROV, 1993). Finally, an elementary logical decision can be defined in order to detect and isolate faults. In fault estimation context, it should be noted that this bank of decoupled Kalman filters makes possible the estimation of fault magnitude corresponding to the selected filter by the robust selector model. From heuristic point of view, fault estimation result from the convex combination of $\gamma_i(k)$: $\Omega_G(k) = \sum_{i=1}^M \delta(\gamma_i(k)) \Omega_i(k)$. Considering that plant behavior is represented by interpolation of a finite set \mathfrak{S} of linear models, FDI can be achieved through the evaluation of residuals sensitive to the faults. In this context, models uncertainties are considered as faults to which the filter must be sensitive. This bank can fulfill the double function of FDI and estimation as well as a robust selector of the best linear model, representing the system. The description of the above approach is now carried out with an academic NL system simulation.

3. SIMULATION EXAMPLE

3.1 System presentation

The proposed method is applied to an open loop discrete NL system issued directly from academic example. This system, single-input/multi-output, is composed of a set of three stochastic linear discrete systems with the same dimensions: $X \in \mathbb{R}^4$, $U \in \mathbb{R}^1$, and $Y \in \mathbb{R}^3$. The j^{th} linear system represents the system behavior around the j^{th} operating point depending directly on the magnitudes of the inputs defined in table 2. To simplify the implementation,

Table 2. Definition of the operating points.

Operating point (P_j)	$j = 1$ $U \in [0; 3[$	$j = 2$ $U \in [3; 6[$	$j = 3$ $U \in [6; 9[$
Y_{P_j}	3.2-5.0 2.58	5.82-8.54 4.88	9.88-15.62 8.34
U_{P_j}	2	4	7
Eigenvalues of A_j	0.15 0.37 0.60 0.22	0.01 0.02 0.04 0.01	0.20 0.50 0.80 0.30

other matrices are the same for each model: $\forall j$,

$$B_j = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad C_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_j = [0 \ 0 \ 0]^T,$$

$Q_j = \text{diag}([0.9 \ 0 \ 0.5 \ 0.3])^T$ and $R_j = I_{3 \times 3}$. According to (3) and table 2 the NL system is computed directly by

$$\varphi_j(U) = \begin{cases} 1 & \text{if } U \in P_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (32)$$

The simulation example considered is developed in a multiple sensor faults case ($f \in \mathbb{R}^2$) with a system input U chosen as successive steps with smooth transitions. At first, a bank of three classical Kalman filters is proposed. It was developed to show the problem related first, to FDI and second, to selection of the true model, when residual vector is corrupted by two pieces of information: operating point evolution and fault occurrence. In the same context, a bank of three decoupled Kalman filters is considered as the solution

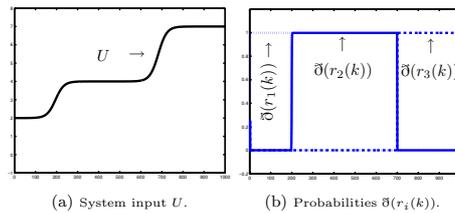


Fig. 1. System input and model selector evolution in fault free case.

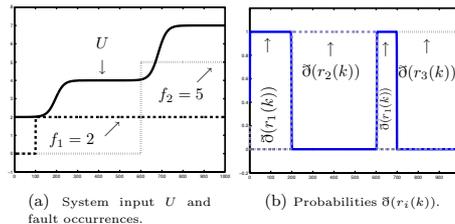


Fig. 2. System input and model selector evolution in faulty case.

to problems presented for FDI and selector model in a classical Kalman filter of MM frameworks. In this bank, each decoupled filter is designed in accordance with the assumptions presented in the previous section. The rank condition ($\forall i, \text{rank}(C_i F_j) < 3$) is thus satisfied. Considering these conditions, sensor faults can be detected, isolated and estimated. In order to design the decoupled filter with sensor faults, an augmented state space must be carried out by considering sensor faults as actuator faults.

3.2 Simulation results

In order to evaluate the method, we consider that a fault on the first sensor appears at time $k_d = 100$ with a constant magnitude equal to 2 and a second fault on the second sensor appears at time $k_d = 600$ with a constant magnitude equal to 5 ($f \in \mathbb{R}^2$). Both faults are defined for equation (1), where $F_{Y_j} = [1 \ 0 \ 0, 0 \ 1 \ 0]^T$ is the fault distribution matrix. The results presented here were achieved by considering a bank of classical Kalman filters. In figure 1a, the system input U is shown. The behavior of model selectors shows their performance with respect to the system input in figure 1b, in fault free case. Faults and system input vectors are shown in figure 2a. In figure 2b, we can observe that in the faulty case, the model selector does not select the appropriate model. The reason for this is that the residual vector is not robust to faults. For the considered decoupled Kalman filters, the parameters of the gain matrix K_i are selected in order to build a residual decoupled from the faults with $\gamma_i(k) \in \mathbb{R}^1$ and $\Omega_i(k) \in \mathbb{R}^2$. The results using a bank of decoupled Kalman filters, when two faults appear and when the operating point changes are presented in figure 3. The residual $\gamma_i(k)$ which is insensitive to faults, for the three filters, is plotted in figure

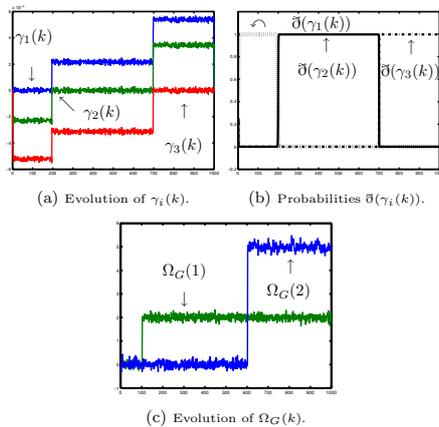


Fig. 3. Behavior of insensitive residual, fault sensitive residual and robust model selector.

3a. We can observe that according to the system input, the residual corresponding to the true model has zero-mean. The residual $\gamma_i(k)$ is used to show the evolution of the mode probabilities $\bar{\theta}(\gamma_i(k))$, as illustrated in figure 3b. The results obtained show a robust selector which is insensitive to faults. The same figure shows the transition from model "1" to model "2" and after to model "3" without the probabilities being affected by fault occurrences. Finally, the global fault sensitive residual vector $\Omega_G(k)$ is shown in figure 3c. It is obtained from sensitive residual vectors $\Omega_i(k) \in \mathfrak{R}^2$ using the modes probabilities. In this figure, we can observe the system behavior of the global residual when abrupt changes corresponding to two faults appear. These results illustrated in figure 3c, make it possible to detect and isolate faults. One can also notice the accurate magnitude estimation of both faults. The approach suggested in this study enables one to detect, isolate and estimate the fault occurrence as well as to select the best linear model, in the framework of multiple models.

4. CONCLUSION

A fault diagnosis method of nonlinear systems represented by a finite set of linear time invariant models has been presented. It is based on a bank of decoupled Kalman filters. The filters are built to allow detection, isolation and magnitude estimation of multiple faults appearing in a simultaneous or sequential way. A robust model selector is designed to identify the most representative linear model of the nonlinear system in both the fault free and faulty cases. The model selection is based on residual vectors insensitive to faults, which means that the modelling error distribution matrix must be completely different from the fault distribution matrix. The considered nonlinear system has illustrated the advantages of this method without being able to show its limits. As for example at the transition from one linear model

to another in a practical context. The closed loop nonlinear systems diagnosis, the robustness of the model selector in the transition zone, and the stability between the different filters are to be considered in future research.

REFERENCES

- ALCORTA-GARCÍA, E. and P. FRANK (1997). Deterministic nonlinear observer-based approaches to faults diagnosis: a survey. *Control Engineering Practice* **5**(5), 663–670.
- BANERJEE, A., Y. ARKUN, R. PEARSON and B. OGUNNAIKE (1995). h_∞ control of nonlinear processes using multiple linear models. In: *3rd ECC*. Italy, pp. 2671–2676.
- BASSEVILLE, M. and I. NIKIFOROV (1993). *Detection of Abrupt Changes, Theory and Application*. Prentice Hall.
- CHEN, J. and R. J. PATTON (1999). *Robust Model-Based Fault Diagnosis For Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers.
- De PERSIS, C. and A. ISIDORI (2000). A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation. In: *SAFEPROCESS*. Hongrie, pp. 209–214.
- FRANK, P. M. and X. DING (1997). Survey of robust residual generation and evaluation methods in observed-based fault detection systems. *Journal of Process Control*, **7**(6), 403–424.
- GERTLER, J. J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker.
- KELLER, J. (1999). Fault isolation filter design for linear stochastic system. *Automatica*, **35**, 1701–1706.
- LEITH, D. and W. LEITHEAD (2000). Survey of gain-scheduling analysis and design. *International Journal of Control* **73**(11), 1001–1025.
- MAYBECK, P. (1999). Multiple model adaptive algorithms for detecting and compensating sensor and actuator/surface failure in aircraft flight control systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **9**, 1050–1070.
- MURRAY-SMITH, R. and T. JOHANSEN (1997). *Multiple Model Approaches to Modelling and Control*. Taylor and Francis.
- NARENDRA, K., J. BALAKRISHNAN and M. KERMAL (1995). Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning. *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 37–51.
- PARK, J., G. RIZZONI and W.B. RIBBENS (1994). On the representation of sensor faults in fault detection filters. *Automatica* **30**(11), 1793–1795.
- VARGA, A. (1996). Optimal output feedback control: a multi-model approach. In: *IEEE Symposium on Computer-Aided Control System Design*. Dearborn, Mi, pp. 327–332.
- ZHANG, Y. and RONG LI (1998). Detection and diagnosis of sensor and actuator failures using imm estimator. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **34**(4), 1293–1313.