



HAL
open science

Diagnostic dans les systèmes complexes

Samuel Nowakowski

► **To cite this version:**

Samuel Nowakowski. Diagnostic dans les systèmes complexes. Automatique / Robotique. Université Henri Poincaré - Nancy I, 1996. tel-00922030

HAL Id: tel-00922030

<https://theses.hal.science/tel-00922030>

Submitted on 23 Dec 2013

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

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



Centre de Recherche en Automatique de Nancy
CNRS URA 821



UFR Sciences Techniques Mathématiques
Informatique Automatique
École Doctorale IAE + M
DFD Automatique Electronique Electrotechnique

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

DIAGNOSTIC DANS LES SYSTÈMES COMPLEXES

par

Samuel NOWAKOWSKI

soutenu le 11 Janvier 1996

Président
Rapporteurs

Examineurs

Professeur Michel AUBRUN
Professeur Gérard GISSINGER
Professeur Igor NIKIFOROV
Professeur Mohamed DAROUACH
Professeur Gérard KRZAKALA
Professeur José RAGOT

The rabbit and the lion

In a forest, a fox bumps into a little rabbit and says, "Hi Junior, what are you up to?"

"I'm writing a dissertation on how rabbits eat foxes", said the rabbit. "Come now, friend rabbit, you that's impossible!".

"Well, follow me and I'll show you".

They both go into the rabbit's dwelling and after a while the rabbit emerges with a satisfied expression on his face.

Comes along a wolf. "Hello, what are you doing these days?"

"I'm writing the second chapter of my thesis, on how rabbits devour wolves."

"Are you crazy? Where is your academic honesty?"

"Come with me and I'll show you"

As before the rabbit comes out with a satisfied look on his face and a diploma in his paw.

Finally the camera pans into the rabbit's cave and, as everyone should have guessed by now, we see a meanlooking, huge lion sitting next to some bloody and furry remnants of the wolf and the fow.

The moral : It's not the contents of your thesis that are important - it's your PhD supervisor that really counts.

TABLE DES MATIÈRES

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISÉES	1
PREMIÈRE PARTIE	2
1. CURSUS	3
2. ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES	5
3. ACTIVITÉS DE RECHERCHE	6
3.1. Thèmes de recherche.....	6
3.1.1. Travaux méthodologiques.....	7
3.1.2. Applications.....	9
3.2. Résultats, publications (voir liste jointe)	11
3.3. Participation à des groupes de travail	11
3.4. Direction de recherche	11
3.4.1. Encadrement de DEA	11
3.4.2. Encadrement d'ingénieurs CNAM.....	11
3.4.3. Encadrement de Doctorants	12
4. RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES.....	13
4.1. Responsabilités liées à la recherche	13
4.2. Responsabilités liées à l'enseignement	13
LISTES DES TRAVAUX ET PUBLICATIONS.....	14
DEUXIÈME PARTIE	19
I. INTRODUCTION	21
I.1. Généralités	21
I.2. Un peu d'histoire	21
I.3. Quelques dates, quelques ouvrages marquants	24
I.4. Un petit tour d'horizon.....	26
I.5. Conclusion.....	31
II. DIAGNOSTIC DANS LES SYSTÈMES COMPLEXES.....	35
II.1. Concepts de base et systèmes d'état généralisés.....	35
II.2. Propriétés fondamentales.....	36
II.2.1. Générateur de résidus sensibles aux défauts de capteurs.....	36
II.2.2. Générateur de résidus sensibles aux défauts d'actionneurs	38
II.2.2.a. Existence du générateur de résidus.....	39
II.2.2.b. Distinguabilité entre les défauts.....	39
III.3. ÉTUDE DES SYSTÈMES STANDARD	43
III.1. Estimation simultanée de l'état et des paramètres.....	43
III.1.1. Formulation du problème	43
III.1.2. Estimation simultanée de l'état et des paramètres en mode normal.....	44
III.1.3. Estimation simultanée de l'état et des paramètres en présence de défaut.....	46
III.1.4. Conclusion.....	49
III.2. Application à un processus pilote - le pendule inverse.....	49

III.2.1.	Cas déterministe.....	49
III.2.2.	Cas stochastique.....	51
III.2.3.	Expérimentation sur le pendule.....	52
III.3.	Systèmes standard à paramètres stochastiques.....	53
III.3.1.	Position du problème.....	53
III.3.2.	Procédure de détection et de localisation.....	54
III.3.2.a.	Génération des résidus et détection.....	55
III.3.2.b.	Correction du défaut.....	55
III.4.	Conclusion.....	57
IV. ÉTUDE DES SYSTÈMES SINGULIERS.....		59
IV.1.	Approche par estimation d'état.....	59
IV.1.1.	Position du problème.....	59
IV.1.2.	Détection et localisation des défauts.....	60
IV.1.3.	Conclusion.....	64
IV.2.	Approche par estimation simultanée de l'état et des paramètres.....	64
IV.2.1.	Développements théoriques.....	64
IV.2.2.	Estimation simultanée de l'état et des paramètres en mode normal.....	66
IV.2.3.	Estimation simultanée de l'état et des paramètres en présence de défaut.....	67
IV.3.	Conclusion.....	70
IV.4.	Exploitation des techniques des systèmes singuliers pour le diagnostic.....	70
IV.5.	Conclusion.....	74
V. ÉTUDE DES SYSTÈMES BILINÉAIRES.....		76
V.1.	Position du problème.....	76
V.2.	Générateur de résidus exponentiels uniformes.....	77
V.3.	Générateur de résidus exponentiels non uniformes.....	79
V.3.	Filtre de détection appliqué aux systèmes bilinéaires.....	82
V.4.	Conclusion.....	82
VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		84
BIBLIOGRAPHIE.....		86

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISÉES

t	temps
s	paramètre de Laplace
ω	pulsation
z	opérateur de décalage
$f(t)$	fonction du temps
$F(s)$	transformée de Laplace de la fonction $f(t)$
$r(t)$	résidu pour la détection ; cas continu
r_k	résidu pour la détection ; cas discret
$x_k \in \mathfrak{R}^n$	vecteur état de dimension n
$u_k \in \mathfrak{R}^r$	vecteur des entrées connues de dimension r
$y_k \in \mathfrak{R}^p$	vecteur des sorties mesurées de dimension p
$w_k \in \mathfrak{R}^n$	vecteur bruits de système de dimension n ; bruit blanc gaussien
$v_k \in \mathfrak{R}^p$	vecteur bruits de mesure de dimension p ; bruit blanc gaussien
$e_k \in \mathfrak{R}^p$	séquence d'innovation de dimension p
$\hat{x}_{k+1/k+1}$	estimation de l'état à l'instant $k+1$
$\hat{x}_{k+1/k}$	prédiction de l'état
$P_{k+1/k+1}$	matrice de covariance de l'erreur d'estimation
$E(\dots)$	espérance mathématique
A^+	pseudo inverse de A
γ_k	séquence d'innovation généralisée
$\Phi_{i_k}^T$	vecteur variable contenant l'état inconnu du système
θ_{i_k}	vecteur des paramètres à estimer
θ_{i_0}	valeur initiale des paramètres
M_{i_0}	matrice de pondération
λ_i	facteur d'oubli
$0_{i \times j}$	matrice nulle de dimension $i \times j$
$I_{i \times j}$	matrice identité de dimension $i \times j$
$GS(z)$	matrice $G(z)$ mise sous forme de Smith
g_i	paramètres structuraux du système décomposé avec $\sum_{i=1}^p g_i = n$
n	ordre du système
$\text{rang}(A)$	rang de la matrice A
χ_k	variable du Chi2
$\text{Ker}(C)$	noyau de l'application représentée par la matrice C

PREMIÈRE PARTIE
CURRICULUM VITAE

Samuel NOWAKOWSKI

21 Chemin de Chaumont - Les Moitresses
88100 SAINT-DIÉ
Tél : 29-55-54-33

né le 02 Mai 1964 à Villerupt (54)
Nationalité française, libéré des obligations militaires
Marié, 2 enfants

Maître de Conférences 1ère Classe
Chef du Département "Informatique et Systèmes Industriels", IUT de Nancy-Brabois,
Université Henri Poincaré, Nancy 1
Chercheur du CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) CNRS URA 821

Axe de recherche : Diagnostic des systèmes complexes

1. CURSUS

1981 *Baccalauréat série C*
Lycée A. Mézières, Longwy

1984 *DEUG A, Structure de la matière*, mention bien (major)
Faculté des Sciences, Université de Nancy I

1986 *Maîtrise de Sciences et Techniques*, Automatique et Commande Numérique,
mention Assez Bien
Faculté des Sciences, Université de Nancy I

1987 *Diplôme d'Études Approfondies* option Métrologie, Automatique et Électrotechnique,
mention Assez Bien, Faculté des Sciences, Université de Nancy I

Stage de recherche effectué au Centre de Recherche en Automatique de
Nancy, au Laboratoire d'Automatique et de Recherche Appliquée

Sujet : Détection de défauts dans les séries temporelles. Application à
la détection de défauts sur site pilote.

1989 *Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I* option Automatique effectuée au Centre
de Recherche en Automatique de Nancy, au Laboratoire d'Automatique et de
Recherche Appliquée

Situation : Allocataire M.R.T. de Septembre 1987 à Juin 1989

Directeur de thèse : Professeur José RAGOT

Titre : Détection de défauts dans les séries temporelles

Mention : **Très honorable avec les félicitations du jury**

1989 *Service national*

effectué en tant que Volontaire Formateur en Informatique
Institut Régional de Formation pour Adultes à Metz

1990 *Maître de Conférences*

Département Génie Électrique et Informatique industrielle
I.U.T. de Nancy-Longwy

1992 *Membre du Conseil Scientifique*

Université Henri Poincaré, Nancy 1

Membre de Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

1993 *Co-habilitation à diriger des thèses*

Contrat d'encadrement doctoral et de recherche

1994 *Passage en 1ère classe des Maîtres de Conférences*

Chef du Département Informatique de l'IUT Nancy-Brabois, site de Saint-Dié

Membre de la Commission de Spécialistes 61ème section
Université Henri Poincaré, Nancy 1

1995 *Membre du bureau de l'assemblée des chefs de départements*
Informatique

Membre des Commissions de Spécialistes 61ème section
Université Henri Poincaré, Nancy 1
Université de Nancy II.

2. ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES

Le but de ce document n'étant pas de présenter en détail mes activités dans le domaine pédagogique, je ne donnerai donc que les points importants.

1987-1988 *vacataire*

DUT Génie Électrique et Informatique Industrielle, IUT de Nancy-Longwy
Préparation à l'agrégation de Physique Appliquée et de Génie Électrique,
Faculté des Sciences, Université de Nancy 1
3^{ème} année de l'École Nationale Supérieure de Géologie
Formation continue INPL / CESEV

Matières enseignées

Programmation Microprocesseur 68000			TP
Automatique Continue		TD	TP
Régulation, modélisation			

1990-1994 *Maître de conférences* au Département GEII, IUT de Nancy-Longwy

DUT Génie Électrique et Informatique Industrielle
Module de formation CNAM, Auto B2
Probatoire CNAM, Automatismes

Matières enseignées

Informatique industrielle	CM	TD	TP
Automatique continue linéaire	CM	TD	TP
Électronique			TP
Systèmes non linéaires	CM	TD	

1991-1993 *Directeur des études* au Département GEII, IUT de Nancy-Longwy

1994 à ce jour

Chef du Département ISI, IUT de Nancy-Brabois

Création et mise en place pédagogique et matérielle du Département
Informatique et Systèmes Industriels

Matières enseignées

Architecture des systèmes informatiques	CM		
Réseaux informatiques	CM		TP
Systèmes de Gestion de Bases de Données Relationnelles	CM		TP
Algorithmique et Langage C++	CM	TD	TP
Traitement de l'information	CM		TP

3. ACTIVITÉS DE RECHERCHE

3.1. Thèmes de recherche

Dès mon arrivée en troisième cycle universitaire, en Septembre 1986, mes travaux de recherche ont été tournés vers le développement de nouvelles méthodes de **Diagnostic des Systèmes Complexes**.

Sous la direction de Monsieur le Professeur J. RAGOT, mes recherches se sont principalement orientées vers les traitements statistiques des signaux exploitant de nouvelles approches liées aux mesures de distances et autres divergences ([6]*, [8], [9], [11], [23], [24], [25]) ce qui a mené à ma soutenance de thèse ([34]), le 13 Juin 1989, obtenue avec Mention Très Honorable et les félicitations du jury.

Nommé Maître de Conférences au Département Génie Électrique de Longwy de l'IUT de Nancy-Longwy le 1er Octobre 1990, je me suis intégré à l'Équipe du CRAN de Longwy dirigée par Messieurs les Professeurs G. KRZAKALA et M. DAROUACH. Là, la recherche s'exprimant principalement dans des domaines tels que la commande, la modélisation et l'étude des systèmes singuliers, j'ai donc adapté mes travaux à ce contexte afin de développer de nouvelles approches pour le diagnostic et d'élargir le champ de mes investigations ([1], [11], [13], [15], [16], [17], [19]).

Ainsi, je me suis intéressé aux systèmes singuliers et à leur exploitation dans le cadre du diagnostic robuste ([1], [11], [12]) ; parallèlement, toujours dans un souci de robustesse, j'ai étudié le cas de systèmes à paramètres et états inconnus ce qui m'a amené à développer de nouveaux algorithmes de diagnostic ([4], [12], [14]).

Mes travaux les plus récents exploitent les propriétés des systèmes décrits par des équations différentielles à coefficients stochastiques ce qui permet d'aborder la notion de robustesse face aux incertitudes de façon originale ([18], [19], [21]).

Enfin, je m'intéresse au développement de nouvelles approches de diagnostic sur des systèmes plus complexes, les systèmes dynamiques bilinéaires ([20]).

Chargé de mettre en place, pour la rentrée universitaire de Septembre 1994, le département Informatique et Systèmes Industriels de l'IUT de Nancy Brabois à Saint-Dié-des-Vosges, j'ai donc intégré l'équipe MATS du CRAN dirigée par Monsieur le Professeur T. CECCHIN. Mes travaux de recherches s'y sont poursuivis ce qui m'a permis d'être auteur ou coauteur de deux articles ([6], [22]) et de soumettre un certain nombre de travaux à des congrès internationaux.

* Les références renvoient à la liste de mes travaux jointe à ce document

3.1.1. Travaux méthodologiques

APPROCHE TRAITEMENT DE SIGNAL (thésard : G. ZALOYLO) ([6], [8], [9], [10], [23], [24], [25], [34])

Mon travail de thèse a consisté en une mise au point théorique et algorithmique d'outils mathématiques permettant la mise en évidence et la reconnaissance des éventuelles pannes qui peuvent survenir sur un système. Ainsi, par des calculs sur horizons multiples mis en correspondance par des indices de distance et des calculs d'entropies de l'information (distance de Chernoff, divergence de Kullback, ...), nous avons réussi à détecter et à reconnaître les types des défauts introduits dans un signal donné. Ces travaux m'ont permis de participer activement aux réunions de travail du groupement de recherche C.N.R.S. Automatisation Intégrée (groupe Diagnostic) animé par Monsieur le Professeur B. DUBUISSON et Monsieur le Professeur A. TITLI.

Dans ce cadre, j'ai pu mettre en pratique mes connaissances dans le domaine du traitement de signal au cours des études menées pour la réalisation d'un dispositif de détection et d'élimination des fines particules métalliques, magnétiques ou non, dont la présence au sein de matières premières finies ou semi-finies représente une pollution inacceptable. Cet appareil est composé de deux modules ; l'un principalement électronique sur lequel je n'interviendrai pas, l'autre comportant l'algorithme de détection : c'est dans ce cadre que mes travaux dans le domaine du traitement du signal sont intervenus. Nous avons donc testé un grand nombre d'approches afin de sélectionner celle qui alliait une grande robustesse face aux perturbations électriques, magnétiques et/ou mécaniques et une relative facilité d'intégration dans un système électronique de ce genre.

Parallèlement, j'ai cherché à étendre mes travaux et mes connaissances dans le domaine de diagnostic à des systèmes plus complexes. Ces systèmes pouvant être dits singuliers, à paramètres et états inconnus, bilinéaires, non linéaires, stochastiques à paramètres aléatoires, je me suis intéressé au développement de nouvelles approches et à l'adaptation de notions plus classiques pour le diagnostic de ces systèmes.

SYSTÈMES SINGULIERS (thésard : J.Y. KELLER) ([1], [5], [11], [12], [13], [16], [26], [29])

Les systèmes singuliers constituent une généralisation de la notion des systèmes d'état et peuvent être représentés de la façon suivante :

$$E\dot{x} = Ax$$

où x est l'état du système, E et A des matrices qui ne sont pas forcément carrées avec en plus la matrice E singulière ce qui ne nous permet pas d'avoir directement accès à l'état x du système. Ce genre de représentation est, malgré son apparence, relativement courante et permet, par exemple, de décrire le mouvement d'un robot à plusieurs degrés de liberté ou de représenter les équations de bilan d'un réseau de transport de matière.

Les travaux qui ont fait l'objet de cette thèse ont été initiés par les problèmes posés par la validation des données pour les systèmes statiques et dynamiques. Cette approche a été historiquement l'un des premiers axes de travail des équipes du CRAN, elle a mené à l'ensemble des pistes suivies dans le cadre du diagnostic. Donc sur la base d'une étude des problèmes d'équilibrage de bilans des systèmes statiques issus des lois de conservation de la matière et de l'énergie, il a été proposé un estimateur optimal, au sens du maximum de vraisemblance, de la variance des erreurs de mesure. Une unification des techniques de

détection de défauts est alors présentée ainsi qu'un algorithme d'estimation de l'état des systèmes statiques linéaires en présence de défauts multiples.

Les réseaux de transport de matières pouvant être décrits par un système d'état singulier, un algorithme d'estimation de l'état de ces systèmes est proposé et appliqué ensuite à la validation des données des systèmes décrits par des lois de conservation dynamiques et à la détection de défauts d'actionneurs. L'analyse de la séquence d'innovation généralisée ainsi trouvée permet le traitement des défauts.

Tous ces travaux ont mené à des publications qui sont parues soit dans des revues, soit des congrès internationaux (voir liste jointe). Toutes ces réflexions nous ont également amenés à l'idée d'exploiter cette représentation afin de réaliser une estimation découplée et simultanée de l'état non affecté par le défaut et de l'amplitude de ce défaut.

SYSTÈMES À PARAMÈTRES ET ÉTATS INCONNUS (thésard : M. BOUTAYEB) ([4], [6], [12], [14], [17], [26], [27], [28], [29])

Maintenant, qu'advient-il des performances des algorithmes développés lorsque les paramètres des systèmes surveillés (les coefficients des matrices A, E, ..) sont inconnus ou mal connus ? Les taux de fausses alarmes et de non détection augmentent et les résultats ne sont plus très fiables. Pour résoudre ces difficultés, je me donc suis intéressé au développement d'une technique de diagnostic pour les systèmes à paramètres et état inconnus. Elle est construite autour d'un algorithme robuste d'estimation simultanée de l'état et des paramètres appelé "Bootstrap" et les résultats obtenus sont vraiment intéressants ; ils ont permis de réaliser la détection, la localisation et la correction de défauts pour ce genre de systèmes. Cette approche a été appliquée à un pendule inversé (travaux du Working Group IAR) et a même été étendue aux systèmes singuliers.

La thèse de Monsieur BOUTAYEB s'inscrit pleinement dans les axes privilégiés de l'équipe : l'étude des systèmes singuliers et le diagnostic. Mais dans ce document, nous abordons les problèmes liés à l'identification des systèmes singuliers ; c'est dans ce but que sont présentés des algorithmes d'estimation de l'ordre, de l'état et des paramètres pour ces systèmes. Dans le cas rectangulaire, il y est développé une procédure d'estimation de l'état et des paramètres en utilisant une transformation régulière. Nous avons développé des approches pour l'estimation simultanée de l'état et des paramètres en présence de biais, pour des systèmes standard et singuliers. Ceci a nécessité l'analyse des différentes formes canoniques, des différents types d'algorithmes d'estimation.

Ces travaux, dans les cas standard et singulier, ont permis la mise au point d'un algorithme d'estimation simultanée de l'état, des paramètres et des défauts en présence de biais sur les capteurs et d'y adjoindre une procédure de correction dans le but de conserver une estimation correcte de toutes ces grandeurs.

SYSTÈMES BILINÉAIRES (thésard : C. MECHMECHE) ([20], [21])

La thèse de Monsieur MECHMECHE est issue d'un constat que nous avons fait, concernant l'inexistence de travaux dans le domaine du diagnostic appliqué aux systèmes bilinéaires. De plus, un des axes de recherche privilégié de l'équipe étant focalisé sur les observateurs à entrées inconnues, nous sommes tout naturellement venus aux observateurs à entrées inconnues pour les systèmes bilinéaires et leur application au diagnostic.

Ce domaine étant relativement peu exploité, il a fallu, dans un premier temps, étudier de façon détaillée les propriétés des systèmes bilinéaires ce qui a permis de les regrouper en deux catégories : les observateurs dont la dynamique de l'erreur de reconstruction est

indépendante des entrées (observateurs uniformes) et les observateurs pour lesquels la connaissance des bornes des entrées est nécessaire (observateurs non uniformes).

À partir de cela, nous nous sommes attachés à la définition d'observateurs à entrées inconnues en essayant de distinguer les cas importants :

- le cas où la dynamique de l'erreur de reconstruction peut se mettre sous la forme d'un système linéaire invariant,
- le cas où la dynamique de l'erreur se met sous la forme d'un système linéaire à paramètres variables,
- le cas où l'observateur est non uniforme, la stabilité étant liée aux bornes des entrées.

Pour chacun de ces cas, nous avons énoncé les conditions d'existence et proposé des algorithmes simples de mise en oeuvre.

Enfin, à partir de ces développements, nous avons proposé des générateurs de résidus ainsi qu'une extension aux systèmes bilinéaires, du filtre de détection de White et Speyer bien connu dans le cas linéaire.

Ces travaux ont ouvert un vaste champ de développements possibles aussi bien dans le cadre de la synthèse d'observateurs mais également dans le domaine du diagnostic. À l'heure actuelle, deux articles ont été rédigés mais la richesse du travail va permettre la rédaction de nombreux autres.

SYSTÈMES À PARAMÈTRES STOCHASTIQUES ([18], [19])

Pour apporter une solution au problème de la robustesse, je m'intéresse aux systèmes stochastiques à paramètres aléatoires où la notion de robustesse est prise en compte en supposant les paramètres aléatoires dans un intervalle de variation donné. Les résultats sont très intéressants et là où les techniques traditionnelles ont échoué, l'utilisation d'algorithmes issus des techniques propres à l'étude de ce genre de systèmes, a donné des résultats prometteurs quant à l'augmentation de la robustesse des résidus et par conséquent du diagnostic pour les systèmes soumis à des perturbations de type aléatoire.

3.1.2. Applications

CONTRATS INDUSTRIELS

En 1989, j'ai participé à deux contrats d'étude et à l'élaboration des rapports de recherche correspondants : le premier entre le CRAN et la direction des études et de recherche d'E.D.F. ([30]) consacré à la mise au point d'une méthode robuste de détection de pannes de capteurs dans une centrale nucléaire.

Ces travaux s'inscrivaient dans une étude de grande envergure menée au sein de l'équipe de Monsieur le Professeur RAGOT concernant le développement et la mise au point de techniques de détection et de localisation de pannes dans une centrale nucléaire ; ce projet a servi de base à plusieurs thèses de doctorat ainsi que de mémoires d'ingénieurs CNAM.

Pour le second, j'ai été le responsable scientifique d'un contrat d'étude et de recherche établi entre le CRAN et la société SOLLAC ([31]). Le but de cette étude était le suivi en ligne et la détection de pannes sur une chaîne de laminage. L'approche méthodologique se plaçait au niveau du traitement des signaux obtenus à divers endroits stratégiques de la chaîne de

laminage. En mettant en rapport ces différentes informations, en exploitant des techniques de traitement à base d'entropie de l'information et de mesures de distances entre plusieurs types de signaux, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de pannes possibles sur cette chaîne. Ces travaux ont également servi d'introduction à des développements plus importants dans ce domaine.

En 1991, j'ai été responsable scientifique d'une étude menée par le CRAN avec la société UNIMÉTAL à Herserange. Cette étude s'est intégrée dans un projet de mise en place d'un outil superviseur du processus de production ([32]). Elle a eu pour principaux objectifs :

- l'identification des produits tout au long de la ligne de fabrication, le laminoir et l'atelier de parachèvement,
- l'optimisation de la marche du Train Universel en limitant les arrêts causés par des incidents ou par la saturation,
- l'optimisation de la découpe des barres et de leur chargement en vue de leur expédition.

Cette étude a été réalisée dans le cadre des travaux d'un ingénieur CNAM, Monsieur MARCHAND que j'ai dirigé pendant une année, d'Avril 1991 à Avril 1992.

PROCESSUS PILOTES

Afin de pouvoir tester les algorithmes développés, il nous a semblé intéressant d'avoir à notre disposition un processus pilote qui réunirait quelques unes des particularités d'un processus industriel. En effet, lors d'un travail en simulation sur ordinateur, nous négligeons une bonne partie des difficultés rencontrées sur un processus réel : dynamiques de certains organes mal connues, bruits parasites non gaussiens, etc.. Nous avons donc construit et mis au point un pilote de laboratoire regroupant un certain nombre d'organes (capteurs, pompes, ...) industriels : il s'agit d'un processus de "circulation de fluide" composé de trois cuves reliées entre elles par deux pompes ([7]).

Par ailleurs, en 1994, j'ai participé au démarrage d'un projet de conception, construction d'un robot de laboratoire comportant 2 axes de liberté, complètement ouvert, programmable à l'aide des logiciels MATLAB/SIMULINK et qui permettra de tester rapidement et simplement des algorithmes développés théoriquement.

3.2. Résultats, publications (voir liste jointe)

Revue internationale :	6
Revue nationale :	1
Congrès internationaux (avec actes) :	15
Communications (sans actes) :	7
Rapports de fin de contrat :	3

3.3. Participation à des groupes de travail

Afin de confronter mes travaux sur le diagnostic à ceux de chercheurs français et étrangers, j'ai tout naturellement pris part activement aux réunions des groupes de travail, locaux (GRADIAN*), nationaux (GR Automatisation Intégrée pôle Diagnostic) et internationaux (Working Group IAR** "Fault Diagnosis in dynamic systems"). J'y ai donc fait quelques communications :

GRADIAN : [24], [26], [29]
 GR Automatisation Intégrée pôle Diagnostic : [23]
 Working Group IAR "Fault Diagnosis in dynamic systems" : [27], [28]

3.4. Direction de recherche

Dans le cadre du suivi de recherches et de travaux de thèse, je bénéficie depuis :

Janvier 1993, d'une **co-habilitation à diriger des thèses**

Octobre 1993, d'un **contrat d'encadrement doctoral et de recherche**

3.4.1. Encadrement de DEA

E. MAGAROTTO
Titre du DEA Étude de méthodes de diagnostic utilisant l'approche fréquentielle
 Septembre 1994

D. KOENIG
Titre du DEA Étude des différentes approches de synthèse d'observateurs à entrées inconnues. Application au diagnostic de systèmes complexes. Septembre 1995

3.4.2. Encadrement d'ingénieurs CNAM

Parallèlement aux activités de recherche traditionnelles, je me suis investi dans une étude menée avec la société UNIMÉTAL ce qui m'a permis d'encadrer les travaux d'un ingénieur CNAM pendant une année.

* Groupe de Recherche en Automatique et DIAgnostic de Nancy

** IAR : Institute für Automation und Robotik, Structure franco-allemande regroupant les universités de Duisbourg, Karlsruhe, Mulhouse, Nancy, Strasbourg et Grenoble pour l'échange d'étudiants et l'élaboration de programmes de recherche communs.

D. MARCHAND

Contrat de Recherche avec la société UNIMÉTAL Optimisation du fonctionnement du Train Universel. Année 1991-1992

3.4.3. Encadrement de Doctorants

Mes activités d'encadrement de chercheurs ont débuté avec le suivi des travaux de thèse de Messieurs KELLER et BOUTAYEB dans le domaine du diagnostic des systèmes singuliers, standard, à paramètres et états inconnus. Ces encadrements se sont déroulés sous la responsabilité de Monsieur le Professeur DAROUACH.

J.Y. KELLER

Titre de la thèse Contribution à la validation de données des systèmes statiques et dynamiques
soutenue le 20 Septembre 1991

M. BOUTAYEB

Titre de la thèse Contribution à l'estimation de l'état des systèmes singuliers.
Application au diagnostic.
soutenue le 7 Février 1992

J'ai également participé à l'encadrement des travaux de thèse de Monsieur G. ZALOYLO dans le domaine de la détection de rupture de signaux pour la mise au point d'un capteur de fines particules métalliques.

G. ZALOYLO

Titre de la thèse Étude et conception d'un dispositif de détection de fines particules métalliques
soutenue le 7 Février 1992

Monsieur ZALOYLO et Monsieur BOUTAYEB sont actuellement Maîtres de Conférences 61ème section au département Génie Électrique et Informatique Industrielle de l'IUT de Longwy.

Monsieur KELLER est actuellement Maître de Conférences 61ème section au département Génie Thermique et Énergie de l'IUT de Longwy.

Co-habilité à diriger des thèses depuis 1993, j'ai encadré complètement les travaux de thèse de Monsieur MECHMECHE portant sur la synthèse d'observateurs à entrées à inconnues pour les systèmes bilinéaires.

C. MECHMECHE

Titre de la thèse Contribution à la synthèse des observateurs des systèmes bilinéaires à entrées inconnues. Application au diagnostic.
soutenue le 18 Décembre 1995.

4. RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES

Dès ma nomination en tant que Maître de Conférences, je me suis investi dans le domaine administratif aussi bien pour tout ce qui concerne le fonctionnement de la recherche que celui de l'enseignement.

4.1. Responsabilités liées à la recherche

Au cours de l'année universitaire 1992/1993, j'ai fait partie, comme *représentant de la recherche*, de la commission chargée de rédiger les statuts du nouvel IUT de plein exercice de Longwy.

Je suis élu dans le collège C, comme représentant du Centre de Recherche en Automatique de Nancy au *Conseil Scientifique* de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1.

J'ai fait partie du *Comité d'organisation* de la 2ème Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle qui a eu lieu à Nancy en Juin 1995.

Je suis membre des *Commissions de Spécialistes* de 61ème section à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1 et à l'Université de Nancy II.

Parallèlement à mise en place de l'IUT à Saint-Dié des Vosges, nous avons constitué une équipe de recherche afin de favoriser l'établissement d'enseignants-chercheurs sur le site. En effet, les délocalisations universitaires ne peuvent se permettre de placer la recherche sur un plan secondaire.

4.2. Responsabilités liées à l'enseignement

Je suis actuellement *Chef du Département* Informatique sur le site de Saint-Dié des Vosges de l'IUT de Nancy-Brabois. Ce département a ouvert ses portes en Septembre 1994 sur un nouveau site universitaire.

Le site de l'IUT à Saint-Dié des Vosges est un site universitaire complètement neuf par ses bâtiments et ses options pédagogiques ; le département est un département Informatique assorti de l'option "Informatique et Systèmes Industriels". Il peut être intéressant de rappeler que les premiers travaux envisageaient une spécialité nouvelle d'IUT intitulée "Environnement Informatique Pour l'Industrie", spécialité que nous avons conservée comme orientation dans les enseignements. Mon travail sur le site a donc commencé en Février 1994 par la définition du programme, la réflexion sur les achats en matériel, l'organisation de l'année universitaire à venir, la sélection des étudiants, la promotion et l'information, le recrutement des enseignants. Il a fallu mettre en place tous les cours, concevoir tous les travaux pratiques, assurer la cohérence de l'ensemble, à cela venant s'ajouter la gestion et l'administration du département et la recherche.

Nous avons débuté en Septembre 1994 à deux enseignants permanents, un Maître de Conférences et un agrégé de mathématiques ; puis un CTPE informatique générale et un ATER sont venus nous rejoindre en Octobre 1994 et Janvier 1995. Actuellement, l'équipe pédagogique du Département compte 7 enseignants permanents.

À la rentrée de Septembre 1995, nous avons deux groupes en 1ère année et un groupe de 2ème année, soit 70 étudiants. Notre première promotion sortira en Juin 1996.

Par ailleurs, je suis membre du *bureau de l'assemblée des Chefs de Département* Informatique d'IUT.

LISTES DES TRAVAUX ET PUBLICATIONS**REVUES INTERNATIONALES**

- [1] J.Y. Keller, S. Nowakowski, M Darouach
State estimation and failure detection in singular systems
Control Theory and Advanced Technology, Vol. 8, n°4, pp. 755-762, Dec. 1992
- [2] J.Y. Keller, S. Nowakowski, M Darouach
Comments on parity vector approach for detecting failures in dynamic systems
International Journal of System Science, Vol. 24, n°4, pp. 805-807, 1993
- [3] S. Nowakowski, M. Boutayeb, M. Darouach
A bias detection, isolation and correction method for systems with unknown parameters and states : an application to an inverted pendulum
Revue Européenne de Diagnostic, Vol. 4, n°1, pp. 93-107, Hermès, 1994
- [4] A. Kobi, S. Nowakowski, J. Ragot
Fault detection-isolation and control reconfiguration
Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 37, 1994
- [5] M. Darouach, M. Zasadzinski, A. Bassong-Onana, S. Nowakowski
Kalman filtering with unknown inputs via optimal state estimation of singular systems
International Journal of Systems Science, Vol. 26, n°10, pp. 2015-2028, 1995
- [6] S. Nowakowski, T. Cecchin
Three approaches of parameters estimation for fault detection, isolation and bias correction
Engineering Simulation special issues "Engineering Diagnostics" Part 1, Vol. 17, n°5, 1995

REVUES NATIONALES

- [7] S. Nowakowski, H. Vaezi-Néjad, G. Mourot
Méthode robuste de détection de défauts en ligne sur processus pilote
Revue d'Automatique et de Productique Appliquée, Vol. 1, pp. 21-29, 1988

CONGRÈS INTERNATIONAUX

- [8] S. Nowakowski, H. Vaezi-Néjad, G. Mourot
On-line failure detection using Kullback's divergence
IFAC Symposium AIPAC'89, Vol. 2, pp. 48-51, Nancy, July 1989
sélectionné dans I.F.A.C. Symposia Series n°5, pp. 77-81, Pergamon Press
1990
- [9] H. Vaezi-Néjad, S. Nowakowski, J. Ragot
Fault detection in sensory instruments
5th EUSIPCO Conference, Barcelone, September 1990
- [10] J. Ragot, D. Maquin, S. Nowakowski
Estimation of measurements error variances from N-linear process data
1st IFAC / IMACS Symposium SAFEPROCESS'91, pp. 103- 107, Baden-
Baden, September 1991
- [11] S. Nowakowski, M. Darouach, G. Krzakala
Analytical redundancy and residual generation for singular systems
2nd International Symposium on Implicit and Robust Systems, Varsovie, July
1991
- [12] M. Boutayeb, S. Nowakowski, M. Darouach
A bias detection, estimation and correction method for singular systems with
unknown parameters and state
ASCASP'92, Grenoble, July 1992
- [13] M. Zasadzinski, M. Darouach, S. Nowakowski
A transfer function approach to the linear discrete stationary optimal filtering for
singular systems
31st IEEE Conference C.D.C., pp. 979-980, Tucson, USA, December 1992
- [14] S. Nowakowski, M. Boutayeb, M. Darouach
A failure detection, localisation and correction method for systems with unknown
parameters and state. Application to an inverted pendulum.
International Conference on Fault Diagnosis "Tool'Diag 93", Vol. 3, pp. 957-
962, Toulouse, April 1993
- [15] A. Kobi, S. Nowakowski, J. Ragot
Fault-detection, isolation and control reconfiguration
2nd IMACS Conference MIM2'93, Vol. 1, pp. 250-255, Bruxelles, April 1993
- [16] A. Bassong-Onana, M. Darouach, S. Nowakowski, G. Krzakala
Two-stage optimal estimators for a class of differential/algebraic systems.
Application to the state estimation of dynamical systems with partially perfect
measurements.
1993 IEEE Conference ACC, pp. 2633-2634, San Francisco, June 1993
- [17] S. Nowakowski, M. Boutayeb, M. Darouach
A new failure detection and correction method for non linear systems
IEEE-SMC Conference, Vol. 3, pp. 424-428, Le Touquet, October 1993

-
- [18] S. Nowakowski, P. Pierrot, M. Darouach
A new approach for failure detection in uncertain systems
32nd IEEE Conference C.D.C., pp. 257-258, San Antonio, Texas, December
1993
- [19] S. Nowakowski, P. Pierrot, M. Darouach
A new approach for failure detection and correction in uncertain systems
2nd IFAC Symposium SAFEPROCESS'94, pp. 255-259, Helsinki, Finlande,
June 1994
- [20] C. Mechmeche, S. Nowakowski, M. Darouach
A failure detection and isolation procedure for bilinear systems based on a new
formulation of unknown inputs bilinear observers
2nd IFAC Symposium SAFEPROCESS'94, pp. 64-68, Helsinki, Finlande,
June 1994
- [21] S. Nowakowski, M. Boutayeb, M. Darouach
Exponential observer based fault detection and correction method applied to an
inverted pendulum
2nd IFAC Symposium SAFEPROCESS'94, pp. 574-577, Helsinki, Finlande,
June 1994
- [22] V. Bochev, S. Nowakowski
A stand alone educational system for Digital Signal Processing and Control
Texas Instrument 5th Annual TMS320 Educators Conference, Houston (USA),
10-11 August 1995

COMMUNICATIONS

- [23] Détection de changements dans les signaux par des détecteurs faisant appel à des calculs de distances
G.R. Automatique Intégrée, groupe Diagnostic, Paris, Septembre 1989
- [24] Présentation de méthodes de diagnostic
Conférence CRAN, groupe GRADIAN, Nancy, Mars 1990
- [25] Panneau d'information sur la détection de défauts de capteurs présenté au 19^{ème} Salon de la Mesure et de la Régulation, Parc des expositions, Metz, 26-30 Mai 1990
- [26] Une méthode pour la détection, la localisation et la reconfiguration dans des systèmes standard et singuliers dont les paramètres et l'état sont inconnus
Conférence CRAN, groupe GRADIAN, Nancy, Janvier 1992
- [27] A bias detection, isolation and correction method for systems with unknown parameters and states
Groupe IAR, "Failure Diagnosis in Dynamic Systems", Longwy, Mai 1992
- [28] A bias detection, isolation and correction method for a non-linear system : application to an inverted pendulum
Groupe I.A.R., "Failure Diagnosis in Dynamic Systems", Duisbourg (Allemagne), Novembre 1992
- [29] A bias detection, isolation and correction method for standard and singular systems with unknown parameters and states
Conférence CRAN / Juin 1993

RAPPORTS DE FIN DE CONTRAT

- [30] F. Kratz, A. Aïtouche, S. Nowakowski, D. Maquin, J. Ragot
Synthèse de méthodes de détection de pannes de capteurs
Étude EDF / CRAN, 1989
- [31] D. Maquin, J.M. Lebel, S. Nowakowski, J. Ragot
Analyse d'un système de suivi de capteurs dans l'atelier de finissage du train à
chaud
Étude SOLLAC Sacilor / CRAN, 1989
- [32] D. Marchand, S. Nowakowski, D. Mielcarek, J. Py
Optimisation de la découpe de poutrelles au Train Universel de Longwy
Étude Unimétal / CRAN, 1992

MÉMOIRES

- [33] **Détection de défauts dans les séries temporelles. Application à la
détection de défauts sur site pilote**
Rapport de D.E.A. option M.A.E., Université de NANCY I, Juin 1987
- [34] **Détection de défauts dans les séries temporelles**
Thèse de doctorat de l'université de NANCY I option automatique soutenue le 13
Juin 1989 et obtenue avec la **Mention Très Honorable et les Félicitations
du jury**

Jury :	Président :	Pr. José RAGOT
	Rapporteurs :	Pr. Claude HUMBERT
		Pr. René HUSSON
	Examineurs :	Pr. Michel AUBRUN
		Mr. Philippe BELLO (SOLLAC)
		Pr. Bernard DUBUISSON

DEUXIÈME PARTIE
PRÉSENTATION DES ACTIVITÉS DE
RECHERCHE

INTRODUCTION

I. INTRODUCTION

I.1. Généralités

L'objectif principal de nos recherches est centré sur le problème qui se pose lorsqu'il s'agit d'effectuer une surveillance fiable et performante d'un système automatisé - système automatisé qui sera plus ou moins important par sa taille, par le nombre de variables à commander ou à mesurer, par les contraintes liées à la sécurité, ... Nous nommerons **SYSTÈMES COMPLEXES**, tous les systèmes répondant à cette description. Enfin pour situer complètement le contexte de ce document, nous appellerons **DIAGNOSTIC**, toutes actions visant à la surveillance, la commande et la maîtrise des aléas de fonctionnement des **SYSTÈMES COMPLEXES**.

Le **DIAGNOSTIC**, et nous en donnerons une définition détaillée plus loin, s'appliquant à des **SYSTÈMES COMPLEXES AUTOMATISÉS**, il me paraît important de faire un rapide historique de l'évolution de l'automatique. C'est une science jeune qui a vu dans les dernières décennies d'importants développements théoriques et conceptuels mais qui s'est manifestée dès les temps antiques. De plus, le **DIAGNOSTIC** cherchant à accroître la fiabilité et les performances des systèmes automatisés, il nous faut être à même d'en maîtriser toutes les finesses.

Dans les développements actuels du **DIAGNOSTIC**, il ne nous est plus possible de négliger l'apport de connaissances venant de domaines tels que la commande, l'identification... En effet, il faut, maintenant, être en mesure de concevoir des structures intégrées associant dans un même ensemble les phases de détection de pannes, de localisation/caractérisation et d'action sur le système surveillé c'est-à-dire réactualisation de certains paramètres, distribution des tâches à effectuer sur les éléments encore valides, calcul de nouveaux correcteurs, tout ceci dans le but de conserver au système un niveau spécifié de performances.

Ces domaines sont définis de manière à prendre en compte les incertitudes, l'imperfection de certains réglages, les perturbations extérieures connues ou inconnues et bien d'autres variations encore.

De plus, il est nécessaire de prendre en compte les interactions entre les contraintes liées au diagnostic et celles liées au calcul des correcteurs. Généralement, ces interactions sont négligées et les algorithmes sont implantés indépendamment les uns des autres. Ainsi, un algorithme de diagnostic performant pour un système non corrigé peut devenir complètement inopérant lorsque l'algorithme de commande sera implanté et inversement. Une solution raisonnable serait donc de prendre en compte, a priori, toutes ces influences mutuelles de manière à concevoir une structure globale capable de donner satisfaction sur tous les plans.

I.2. Un peu d'histoire ...

L'évolution de l'automatique peut se résumer en quatre périodes : avant 1868, date à laquelle J.C. Maxwell a donné la première définition rigoureuse d'un système de commande, nous sommes dans l'*Antiquité* ; entre 1868 et 1900, nous sommes, comme le dit Friedland en 1986, au *Moyen âge* ; entre 1900 et 1969, ce sera la *période classique* et enfin à partir de 1969, les *temps modernes*.

Les premiers systèmes de commande de l'histoire de l'humanité furent conçus par les Grecs et les Arabes afin de disposer de gadgets religieux ou de moyens de mesurer l'écoulement du temps ceci par l'emploi de régulations de niveaux dans des réservoirs.

La révolution industrielle, avec le XVIIIème siècle, voit l'invention de systèmes utilisant les premiers concepts de la régulation : moteurs de bateaux (Newcomen, 1712), régulations de température (Réaumur 1754, Henry 1771, Bonnemain 1777), de pression (Papin 1707, Murray 1799), chronomètres de poche (Bréguet, 1793). Mais toutes ces réalisations ne faisaient appel à aucun formalisme mathématique.

Vers le milieu du XIXème siècle, par l'utilisation des équations différentielles, on dispose des moyens théoriques qui vont permettre de déterminer des domaines de stabilité et autres propriétés importantes, nous sommes dans les temps annonciateurs de l'automatique moderne (Routh 1877, Maxwell 1868, Vishnogradsky 1877, Lyapounov 1892).

La notion de fonction de transfert fit son apparition grâce aux travaux de Heaviside en 1898 ainsi, avec l'utilisation des travaux de Laplace (1749-1827), Fourier (1768-1830) et Cauchy (1789-1857), nous disposons d'outils qui vont permettre l'étude des systèmes dans le domaine fréquentiel. Black en 1927 montra alors les propriétés de la contre-réaction, c'est également l'époque où Nyquist (1932) introduisit son critère de stabilité et où Bode (1940) exprima les notions de marges de stabilité.

Mais les travaux de cette époque mettent au jour des problèmes difficiles à résoudre : par exemple, ces techniques ne permettent d'étudier que des systèmes linéaires invariants, mono-entrée, mono-sortie.

C'est alors que les recherches s'orientent vers des techniques exploitant le principe d'optimalité ceci par minimisation de critères énergétiques ; elles remettent au goût du jour l'étude des systèmes dans le domaine temporel - on considère comme plus concret de chercher, pour des systèmes conçus par l'homme, à minimiser des temps de transition, des énergies ou tout autre critère ou indice de performance. Toutes ces réflexions se sont formalisées avec les travaux de Kalman en 1960 amenant l'ère moderne de l'automatique :

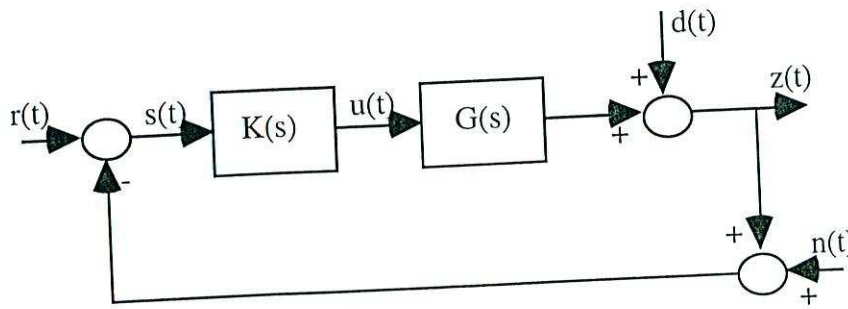
- le temporel valable aussi bien pour les systèmes linéaires que non linéaires ;
- l'algèbre linéaire et matricielle pour l'étude des systèmes multi-entrées multi-sorties ;
- la représentation d'état ;
- les moyens de calcul informatiques en plein développement.

Cependant, leur heure de gloire passée, on s'est vite rendu compte que ces approches modernes présentent des lacunes. Ainsi, les performances garanties obtenues par résolution d'équations matricielles signifient implicitement qu'il sera toujours possible d'obtenir un système de commande qui fonctionnera, en théorie, sans aucune connaissance pratique du problème. Alors que d'un autre côté, les techniques du domaine fréquentiel de la théorie classique de la commande laissent une place importante à ce savoir.

Un autre problème est lié au fait qu'un système moderne de commande sans aucun compensateur dynamique n'est, en aucun cas, capable de prendre en compte les perturbations, les dynamiques non modélisées, les bruits de mesure alors que les méthodes fréquentielles peuvent, ne serait ce qu'avec des notions élémentaires comme les marges de gain et de phase, donner des plages de fonctionnement, des intervalles tolérables de variations ou d'incertitudes.

C'est sur la base de ce genre de considérations que, dès les années 1970, l'école britannique, avec Rosenbrock en 1974, Mac Farlane et al en 1977, a cherché à étendre toutes les notions fréquentielles monovariabiles aux systèmes multivariabiles. Nous n'entrerons pas dans les détails des travaux qui font la une des revues d'automatique actuellement, ce n'est pas le propos de ce document, mais il nous semble intéressant de préciser quelques notions

élémentaires liées à la robustesse avant de revenir au DIAGNOSTIC DES SYSTÈMES COMPLEXES. Ainsi, prenons un système bouclé sous sa forme la plus générale :



où $G(s)$ représente la fonction de transfert du système, $K(s)$ la fonction de transfert du correcteur, $z(t) \in \mathfrak{R}^q$ la sortie du système, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ l'entrée de commande et $r(t) \in \mathfrak{R}^p$ l'entrée de référence.

Le signal $d(t)$ représente une perturbation agissant sur le système ; les bruits ou erreurs de mesure sont inclus dans $n(t)$. Ces deux vecteurs ont pour dimension q . On peut alors définir les grandeurs suivantes :

$$e(t) = r(t) - z(t) \text{ l'erreur de poursuite} \quad (1)$$

alors qu'en réalité, l'erreur est donnée par :

$$s(t) = r(t) - z(t) - n(t) = e(t) - n(t) \quad (2)$$

Nous pouvons définir les différents transferts reliant les grandeurs de la boucle fermée :

$$Z(s) = G(s)K(s)S(s) + D(s) \quad (3)$$

$$S(s) = R(s) - Z(s) - N(s) \quad (4)$$

$$E(s) = R(s) - Z(s) \quad (5)$$

Nous cherchons alors à exprimer :

$$Z(s) = (I + GK)^{-1} GK(R - N) + (I + GK)^{-1} D \quad (6)$$

$$E(s) = [I - (I + GK)^{-1} GK]R + (I + GK)^{-1} GKN - (I + GK)^{-1} D \quad (7)$$

Nous définissons la sensibilité du système $S(s) = (I + GK)^{-1}$ et $T(s) = (I + GK)^{-1} GK$ la sensibilité complémentaire telles que $S(s) + T(s) = I$, nous avons alors :

$$Z(s) = T(s)[R(s) - N(s)] + S(s)D(s) \quad (8)$$

$$E(s) = S(s)[R(s) - D(s)] + T(s)N(s) \quad (9)$$

Les performances de notre système sont principalement liées aux valeurs prises par les grandeurs suivantes :

$S(j\omega)D(j\omega)$ et $S(j\omega)[R(j\omega) - D(j\omega)]$ devront être négligeables dans les expressions (8) et (9) afin d'assurer un rejet de perturbation performant,

$T(j\omega)N(j\omega)$ doit être négligeable de manière à éliminer l'influence des bruits de capteurs.

La conception d'un système de diagnostic devra prendre en compte ce genre de remarques. Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, le diagnostic se doit de privilégier l'information en provenance des défauts éventuels survenant sur l'installation ; cette phase sera la *Génération de Résidus*. Puis à partir de ces résidus, il faudra *détecter* l'apparition d'un défaut et *localiser* l'organe défaillant. Grâce à ces informations, il nous faut alors redéfinir la loi de commande de manière à prendre en compte l'influence de ce défaut sur le fonctionnement du système et l'éliminer ou du moins en minimiser les effets. Nous avons dans ces quelques lignes donné les grandes étapes d'un diagnostic. À cela, s'ajoutera la notion de *robustesse* qui demandera à tout système de n'être sensible qu'à certaines catégories de pannes ou de perturbations.

Associée à cela, la complexité croissante des systèmes industriels rend de plus en plus difficile la prise en main des processus automatisés ; la fonction surveillance qui, jusqu'à une époque récente restait l'apanage de l'être humain, doit être transférée à des systèmes automatiques. Les temps de réaction devant être très courts, la complexité des ensembles surveillés croissant ceci associés à la notion de risques intolérables (industrie nucléaire, aéronautique) nécessitent l'implantation de tels systèmes automatiques dédiés au diagnostic. Nous pouvons dans le cadre de ce travail donner un bref rappel des ouvrages marquants traitant du problème de diagnostic.

I.3. Quelques dates, quelques ouvrages marquants ...

Longtemps considéré comme un domaine secondaire de l'automatique dont les applications étaient limitées aux industries à haut niveau de risque telles que l'aéronautique et l'industrie nucléaire, le diagnostic est devenu actuellement un sujet de recherche à part entière. Les travaux précurseurs du début des années 70 résumés par Willsky dans son survey de 1976 ont certes contribué à ce développement mais l'émergence de ce nouveau pôle d'intérêt doit beaucoup à la poussée industrielle : le diagnostic est désormais un passage obligé pour les industries modernes.

Pluridisciplinaire par définition, l'approche diagnostique rassemble, comme on l'a fait remarquer plus haut, des méthodes très diverses qui vont de l'analyse statistique à l'intelligence artificielle en passant par l'utilisation de modèles dynamiques, la physique qualitative, la reconnaissance de formes, les systèmes singuliers, stochastiques, ... ceci pour des applications maintenant extrêmement variées allant de la surveillance de systèmes industriels à l'analyse de signaux de toutes origines.

Au niveau de la recherche nationale, l'existence, déjà ancienne, du groupe "Diagnostic" au sein du pôle Automatisation Intégrée du G.R. "Automatique" et du groupe de travail GT 1+2 "Reconnaissance et ruptures" du GDR 134 "Traitement du signal et images" fait état d'un certain dynamisme français en la matière. D'autre part, en ce qui concerne la recherche internationale, l'intérêt pour le diagnostic s'est vu concrétisé par de nombreux congrès et workshop spécifiques. Le premier du genre fut sans doute le "Symposium on Technical Diagnostics" organisé par le comité technique "Technical diagnostics" de l'IMEKO en 1979.

En 1984, le soutien du CNRS permit la tenue à Paris, sous l'initiative de M. Basseville et A. Benveniste, d'une conférence intitulée "Detection of abrupt changes in

Signals and dynamical systems". On peut penser que cette conférence a eu un caractère fondateur dans le sens où elle a consacré le rapprochement de gens d'origines diverses (automaticiens, spécialistes de traitement de signal, statisticiens) mais concernés par la même problématique.

En 1986, sous l'égide de la CEE, grâce au programme Stimulation, le premier Workshop européen "on fault diagnosis, reliability and related knowledge-based approaches" a eu lieu à Rhodes et fut suivi, en 1987 à Manchester d'un second workshop. Dans la lignée de ces manifestations, le symposium IFAC "Advanced Information Processing in Automatic Control" à Nancy en 1989 a vu une forte connotation diagnostic. Enfin, depuis le symposium IFAC "Safeprocess", en 1991 à Baden-Baden, on peut vraiment considérer que le diagnostic constitue au niveau international, un thème à part entière. Tous les congrès d'automatique actuels même les plus importants CDC, ACC, IEEE, ont maintenant systématiquement des sessions "fault detection and diagnosis" et de plus en plus apparaissent des congrès spécialisés : IFAC symposium "On-line fault detection and supervision in the chemical process industries" (Delaware, 1992), Tooldiag (Toulouse, 1993)...

Par contre, hormis les actes de congrès et des articles de revues, le nombre d'ouvrages traitant du diagnostic reste malheureusement, pour le moment, relativement limité. Le plus ancien, écrit d'ailleurs en français, est celui de Pau (1975). Il traite du diagnostic par reconnaissance de formes. Ce même auteur présenta en 1981 une version anglaise modifiée de ses travaux.

En 1978, Himmelblau publia un ouvrage qui constitue une Somme à l'attention des ingénieurs de l'industrie chimique et pétrochimique. Ce livre est une bonne illustration de l'esprit pragmatique avec lequel les ingénieurs ont résolu bon nombre de problèmes liés au diagnostic.

Le troisième ouvrage publié sur le sujet, édité par M. Basseville et A. Benveniste, constitue une prolongation de la conférence de 1984 déjà mentionnée. Bien qu'il soit à forte connotation traitement du signal, ce livre témoigne d'une volonté d'établir une méthodologie cohérente du diagnostic dans les signaux et les systèmes.

En 1987, Viswanadham, Sarma et Singh ont proposé un ouvrage de portée plus générale que le thème qui nous intéresse puisqu'il concerne également la fiabilité des calculateurs et des systèmes de contrôle.

Plus récemment, Patton, Frank et Clark ont édité un ouvrage collectif qui peut être considéré comme un état de l'art sur l'approche par modèle bien qu'il explore d'autres domaines tels que l'intelligence artificielle.

En ce qui concerne les documents en langue française, on peut remarquer l'initiative de l'éditeur Hermès qui a simultanément lancé une série d'ouvrages "Diagnostic et Maintenance" qui comprend actuellement trois tomes concernant respectivement l'approche par modélisation (Brunet e.a. (1990)), la reconnaissance de formes (Dubuisson (1990)) et la validation de données (Ragot e.a. (1990)) et d'autre part la Revue Européenne de Diagnostic et de Sécurité de Fonctionnement.

Parmi les derniers ouvrages traitant du diagnostic et de la détection de ruptures, nous pouvons citer celui rédigé par Nikiforov et Basseville en 1994.

Donnons quelques travaux qui ont servi de références à bon nombre d'approches développées dans le cadre du diagnostic des systèmes complexes.

I.4. Un petit tour d'horizon...

Après avoir passé en revue les ouvrages marquants traitant du diagnostic, il est maintenant intéressant de faire un petit tour d'horizon des approches et techniques de diagnostic. Nous commencerons par une classification des différentes approches de diagnostic possibles :

- classification selon le processus étudié : signal issu d'un capteur, capteur lui-même, procédé continu, procédé manufacturier, composant d'un automatisme, système complexe, système biotechnologique, ...
- classification selon la connaissance de l'état normal du processus et des différents événements susceptibles de se produire. Ceci induit la notion de "modèle" du processus et des événements.
- classification selon le cahier des charges : quels types d'événements veut-on détecter ?
- classification selon la nature des informations : variables analogiques, variables logiques, tableaux de données, événements, rapports "humains" de diagnostic, éléments de bases de données, ... Chacune de ces sources d'information fait l'objet de méthodes de traitements spécifiques. Idéalement, pour résoudre un problème de diagnostic, il serait souhaitable d'utiliser toute l'information disponible.
- classification selon les méthodes : intelligence artificielle, flou, réseaux de neurones, reconnaissance de formes, physique qualitative, méthodes à base de modèles, traitement du signal, ...
- classification selon les outils employés : systèmes temps réel, systèmes à traitement différé, logiciel dédié, ...

La simple énumération des différentes clés possibles montre la difficulté de réaliser une taxinomie complète du diagnostic. Nous nous orienterons vers la classe regroupant les méthodes. Nous pouvons identifier quatre principales catégories de méthodes : les méthodes traditionnelles, les méthodes par systèmes experts, par reconnaissance de formes et les méthodes analytiques.

Les **méthodes traditionnelles** sont celles mises en oeuvre lorsque nous ne chercherons qu'à détecter et localiser des défauts sans chercher à avoir plus d'informations sur le type du défaut, ses conséquences et sans avoir connaissance des équations décrivant le système surveillé. Elles sont relativement simples à mettre en oeuvre et s'appuient plus sur des aspects matériels que sur des aspects analytiques. Parmi ces approches, nous pouvons citer :

la *redondance matérielle* qui permet de détecter un défaut sur un capteur en multipliant le nombre des capteurs du même type,
 les *seuils*, fixés a priori pour chaque grandeur surveillée ; la détection se faisant lorsque la valeur de la grandeur en question franchit le seuil fixé,
 le *dictionnaire de défauts*, constitué de l'ensemble des défauts susceptibles de survenir sur un système ; nous comparons alors les effets observés sur le système aux informations contenues dans ce dictionnaire.

Ces approches ont comme principal avantage une simplicité évidente de mise en oeuvre qu'il faut tempérer par le manque de robustesse, les problèmes de place lorsqu'il faut doubler ou tripler l'ensemble des capteurs d'une installation.

Les **méthodes par systèmes experts** semblent particulièrement indiquées lorsque les observations faites sur le systèmes sont de type symboliques. Les principe de fonctionnement d'un système expert s'articule autour de deux éléments principaux : une base de connaissance (base de faits et base de règles) et un moteur d'inférence. La base de connaissance contient la connaissance a priori sur le système. Les observations sont des faits qui sont à leur tour inclus dans la base de faits. À partir des faits, les règles établissent de nouveaux faits qui sont à leur tour inclus dans la base de faits. Le moteur d'inférence est l'organe de résolution du problème spécifié.

Cette approche s'est avérée séduisante pour le diagnostic car elle permet de manipuler un grand nombre de données non homogènes et dépendantes du contexte tout en rendant compte du raisonnement suivi.

Les **méthodes par reconnaissance de formes** sont des approches intermédiaires entre les techniques fondées sur l'utilisation d'un système expert et les techniques analytiques. Elles permettent de modéliser les modes de fonctionnement du système tout en permettant d'appréhender les connaissances a priori incomplète de ces modes. L'analyse du fonctionnement du système est alors faite à l'aide d'un historique (mesures et paramètres obtenus dans le passé) ce qui constitue l'ensemble d'apprentissage. Des classes sont alors constituées correspondant à des modes de fonctionnement identifiés. Lors de la phase d'exploitation, l'application de la règle de décision issue d'un choix de méthode de discrimination consiste à reconnaître à quelle classe doit être associée une nouvelle observation.

Les **méthodes analytiques** font appel aux modèles quantitatifs mathématiques (par exemple, les équations différentielles ou les fonctions de transfert) qui peuvent être utilisés pour mettre en correspondance tous les signaux mesurés sur le système. Ainsi, les méthodes de diagnostic utilisant l'approche par modèle peuvent être définies pour la détection, la localisation et la caractérisation de défauts en exploitant les mesures disponibles et l'information connue a priori délivrée par le modèle mathématique. Ces approches ont été fortement détaillées dans de nombreux articles de synthèse : Willsky en 1976, Mironovski en 1980, Walker en 1983, Isermann en 1984, Himmelblau en 1986, Basseville en 1988, Gertler en 1988, 1991, 1993, Frank en 1990, Patton en 1991 ; et dans quelques ouvrages : Himmelblau en 1978, Patton, Frank, Clark en 1989, Ragot, Darouach en 1990, Brunet, Jaume, Labarrère, Rault, Vergé en 1990, Nikiforov et Basseville en 1994.

Les défauts sont détectés par comparaison à un seuil (fixe ou variable) lié à une quantité appelée *résidu* généré soit :

- par la différence entre les mesures réelles effectuées sur le système et leur estimations obtenues à partir du modèle de référence,
- par la différence entre les paramètres réels du systèmes et les estimations obtenues,
- par la différence entre l'état réel du système et l'état estimé.

Un certain nombre de résidus peuvent alors être définis de manière à n'être sensibles qu'à certains types de défauts et pas aux autres ; la comparaison avec un seuil de détection permettra, dans certains cas, de localiser la panne. La figure suivante illustre de façon simple la procédure globale de diagnostic en y faisant figurer l'approche quantitative mais également des modules qualitatifs qui pourront intervenir principalement lors de la prise de décision finale.

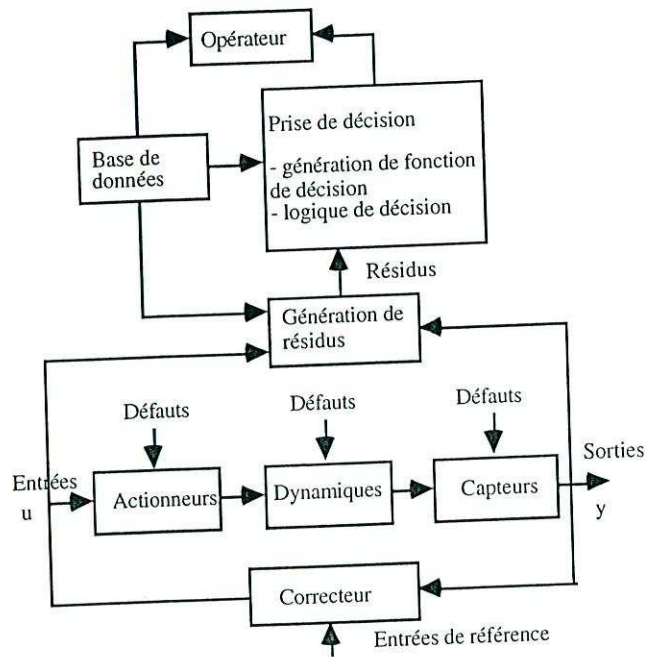


Figure 1. Diagnostic par modèle

1. Génération de résidus

Les entrées et les sorties du système sont intégrées dans un algorithme de calcul approprié afin de générer un résidu (généralement un vecteur appelé $r(t)$). Ce résidu doit être nul lorsque le système ne présente pas de défaut et non nul dans le cas contraire. La composante qui génère ce résidu est appelée *Générateur de résidus*.

2. Prise de décision

Les résidus étant examinés afin de déterminer la vraisemblance de l'apparition de défauts, une loi de décision est alors appliquée afin de mettre en évidence ce défaut. La décision peut seulement consister en un test de seuil ou peut consister en des méthodes statistiques telles que le rapport de vraisemblance généralisé, GLR (Willsky et Jones, 1976) ou test séquentiel du rapport de probabilité, SPRT (Speyer et White, 1984).

Le diagnostic exploite les méthodes d'estimations de l'état d'un système et de ses paramètres afin de générer des résidus. Ces résidus vont alors permettre de réaliser la détection, la localisation et le diagnostic des défauts.

Une définition précise et prudente des résidus facilitera le calcul des différents niveaux des seuils de détection et de localisation. Ces méthodes sont bien connues et ont fait l'objet de nombreux travaux dans la littérature (Frank en 1987, 1990, 1991, 1993, Isermann en 1984, Patton en 1989, 1991).

Chaque composante du vecteur de résidus $r(t) \in \mathfrak{R}^q$ générés par ces méthodes déterministes devra être indépendante des défauts autres que ceux pour lesquels elle est sensible et devra satisfaire la propriété suivante :

$$r(t) = 0 \text{ si et seulement si } f(t) = 0$$

où $f(t) \in \mathfrak{R}^q$ est le vecteur des défauts supposés agir de façon additive sur la dynamique du système. Chaque composante du vecteur $f(t)$ correspond à un défaut particulier agissant sur un élément particulier du système, les actionneurs, les capteurs ou les composantes du système lui-même. D'un point de vue pratique, il s'avérera plus intéressant de ne pas faire trop d'hypothèses sur le comportement du résidu, excepté le fait de supposer qu'il sera une fonction inconnue du temps.

Un système dynamique linéaire comportant un certain nombre de défauts potentiels peut être décrit par une relation entrée-sortie de la forme suivante :

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s)$$

où $y(s) \in \mathfrak{R}^q$ et $u(s) \in \mathfrak{R}^r$ sont les transformées de Laplace respectives des vecteurs d'entrées et de sorties. Pour les systèmes non linéaires, une linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement permettra également la génération des résidus (Frank en 1993, Nowakowski en 1993). La structure générale d'un générateur de résidus pourra être schématisée de la façon suivante :

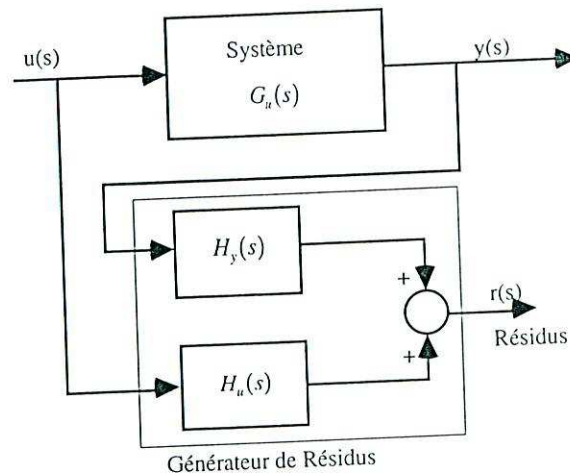


Figure 2. Structure générale d'un générateur de résidus

Cette structure peut se formaliser de la façon suivante :

$$\begin{aligned} r(s) &= \begin{bmatrix} H_u(s) & H_y(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(s) \\ y(s) \end{bmatrix} \\ &= H_u(s)u(s) + H_y(s)y(s) \end{aligned}$$

Les matrices de transfert $H_u(s)$ et $H_y(s)$ sont supposées réalisables, les systèmes étant linéaires et stables. Le résidu, en l'absence de défaut, doit être nul donc :

$$H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0$$

Nous avons ici une représentation généralisée de tous les générateurs de résidus dont la construction consistera simplement à trouver les matrices $H_u(s)$ et $H_y(s)$ satisfaisant cette

équation. À des valeurs différentes de $H_u(s)$ et $H_y(s)$ correspondront des résidus différents et leurs performances pourront être ajustées par une sélection appropriée de ces deux matrices de transfert.

Un défaut pourra être détecté en comparant le résidu à une fonction-seuil $D_F(r)$ avec le test donné par les relations ci-dessous. Si ce test est positif, nous pouvons supposer que l'occurrence d'un défaut est vraisemblable. Il peut également être vraisemblable que le test soit positif et qu'aucun défaut ne soit apparu ; ceci correspond au cas de fausse alarme. Ceci peut être la conséquence d'un défaut lié aux erreurs de modélisation ou à des perturbations inconnues agissant sur le résidu. Le test a la forme suivante :

$$\begin{cases} D_F(r) \leq T(t) \text{ pour } f(t) = 0 \\ D_F(r) > T(t) \text{ pour } f(t) \neq 0 \end{cases}$$

Il existe une grande variété de méthodes quantitatives de générations de résidus :

1. Approches par observateurs (Clark en 1976, Wünnenberg et Frank en 1989, Patton et Chen en 1991).

Un article de synthèse (Frank en 1993) développe les perspectives intéressantes pour l'application des observateurs au diagnostic. L'idée de base s'appuie sur l'estimation des sorties à partir d'un sous-ensemble des mesures par implantation d'observateurs d'ordre réduit. L'erreur d'estimation pondérée de façon appropriée servira alors de résidu. Ces méthodes sont par exemple :

- a. Observateur à entrées inconnues (Watanabe et Himmelblau en 1984, Massoumnia en 1986, Wünnenberg et Frank en 1989, Tsui en 1993)
- b. Placement de pôles pour un découplage des perturbations (Patton et Kangethe en 1989, Patton et Chen en 1991)
- c. Placement de pôles pour la localisation des défauts (White en 1986, White et Speyer en 1989)

L'approche par observateur d'état est devenue une approche très populaire liée à la facilité de construction, la robustesse des détections et localisations, la simplicité d'implantation sur ordinateur, la rapidité de réponse.

Un algorithme relativement proche est *Fault Detection Filter* (FDF) qui consiste en un observateur qui serait décrit dans un certain sens comme un filtre. Les gains sont alors choisis pour que le vecteur de résidus présentent une sensibilité aux défauts de capteurs ou d'actionneurs et ceci dans le domaine fréquentiel. De nombreux auteurs se sont penchés sur ce problème et ont formulé des architectures plus générales incluant le concept de robustesse. Nous pouvons citer, Wilbers et Speyer en 1989, Viswanadham et Schrichander en 1988, Massoumnia en 1986, Wünnenberg et Frank en 1987 et quelques autres encore.

2. Approches par relations de parité (Willsky, Jones, Chow, Potter et Suman en 1977).

Ces approches sont construites à la fois sur les notions de redondance directe, utilisant les relations algébriques statiques existant entre les signaux issus des capteurs et des actionneurs et les notions de redondance temporelle exploitant les dynamiques entre les entrées et les sorties. Le terme *parité* a été initialement utilisé dans le cadre des systèmes logiques numériques pour valider des "parity checks" afin de détecter toute erreur. Dans le contexte diagnostic, il a une signification similaire délivrant une indication sur la présence ou non d'un défaut dans le système.

Dans les premiers développements, les méthodes d'espace de parité furent appliquées à des schémas de redondance parallèle (Potter et Suman en 1977). Pour ce genre d'applications, le nombre de mesures doit être supérieur au nombre de variables à surveiller, les résidus pouvant être obtenus directement à partir des mesures redondantes. Des non conformités dans les mesures seront alors un moyen qui sera utilisé afin de détecter des défauts.

Cette technique a été exploitée avec succès dans des schémas de diagnostic de pannes dans des systèmes de navigation inertiels (Gai et al en 1978, Daly et al en 1979) où les relations entre les résultats issus des gyroscopes et des accéléromètres délivrent une forme de redondance.

Une extension intéressante des méthodes d'espace de parité est que, sous certaines conditions d'application, les résidus des équations de parité peuvent devenir identiques à ceux obtenus par l'approche observateurs. Cette propriété a été montrée par (Massoumnia en 1986, Wünnenberg en 1989) et une démonstration complète a été développée par Patton et Chen en 1991.

3. Approches par estimation de paramètres (Isermann en 1984, 1989, Nowakowski en 1993).

Ces approches utilisent le fait que des défauts sur les composantes des dynamiques d'un système peuvent être vus dans les paramètres physiques tels que frottements, masses, résistance, induction, capacité. Cette approche est utilisée pour détecter des défauts par estimation ou identification des paramètres du modèle.

I.5. Conclusion

En conclusion, nous pouvons proposer un schéma regroupant l'ensemble de la démarche incluant les phases analytiques et heuristiques du diagnostic.

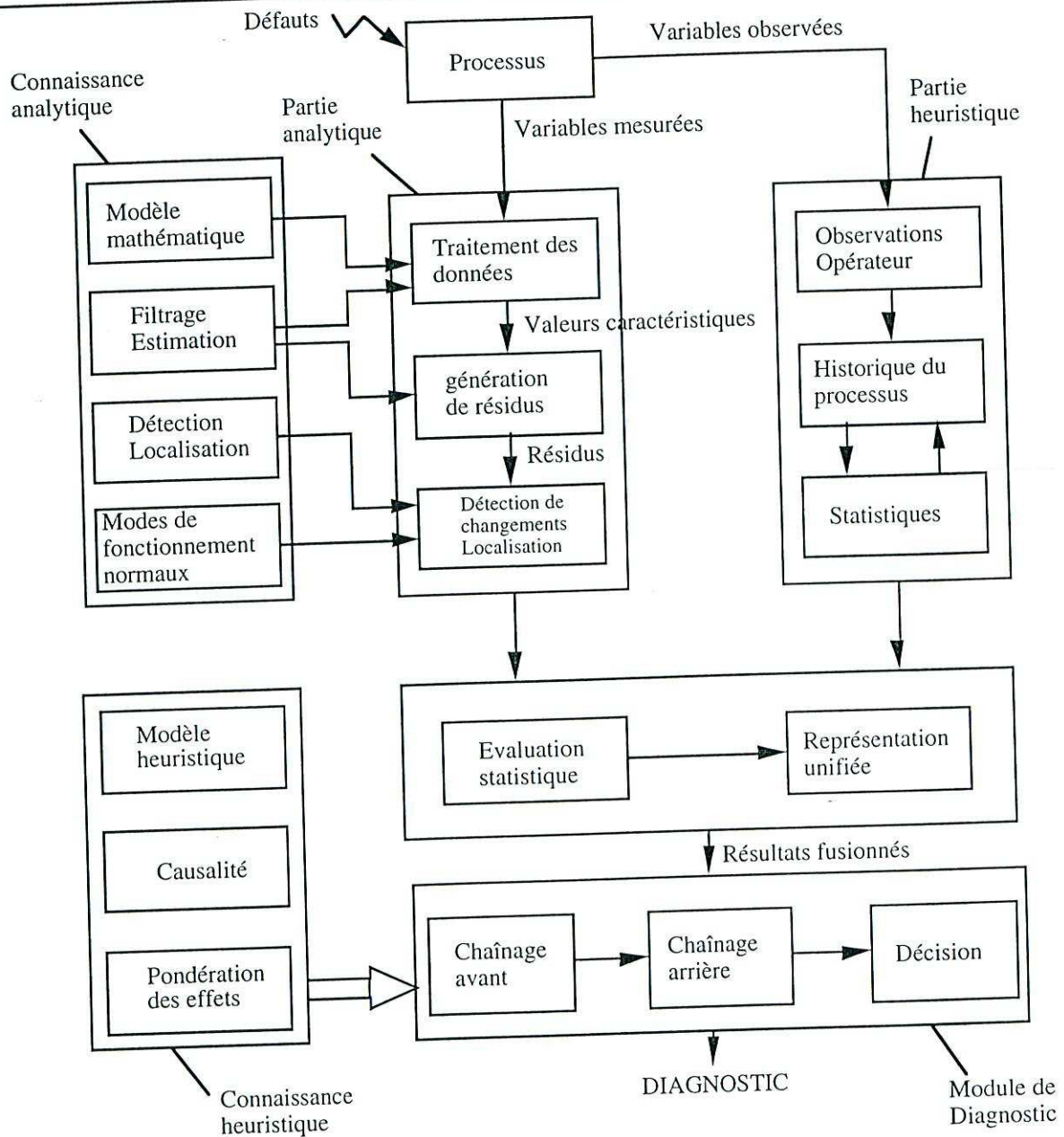


Figure 3. Schéma global de l'approche diagnostique

Nos travaux se placent résolument dans la partie analytique de ce schéma. Nous pouvons enfin donner un schéma général d'une architecture d'un système de détection-localisation exploitant l'aspect analytique :

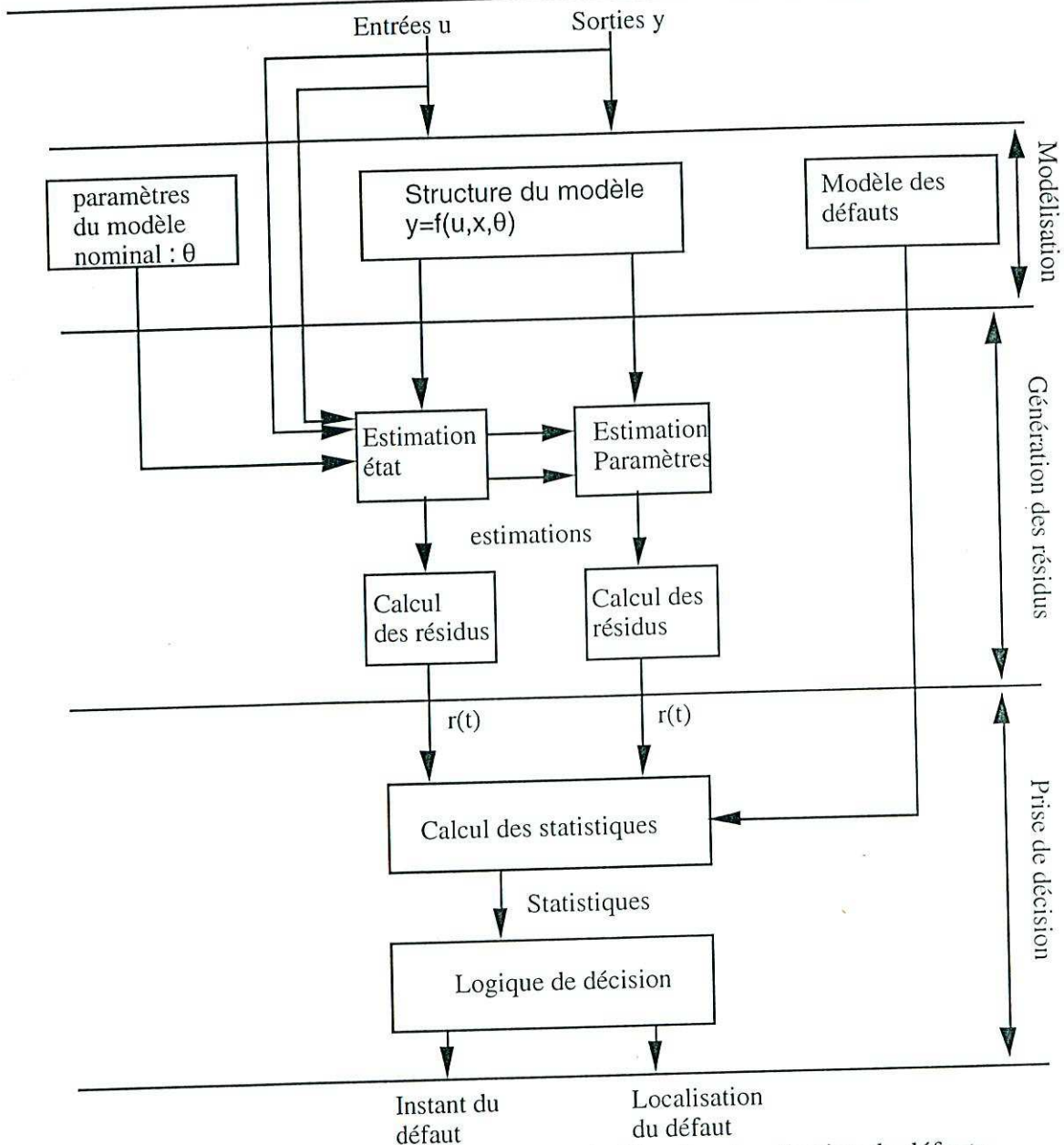


Figure 4. Architecture d'un système de détection-localisation de défauts

Dans cette figure sont rassemblés de manière plus précise, les points sur lesquels a porté l'ensemble des travaux décrit dans ce document.

Toutes ces approches possèdent des performances qui ont été évaluées dans certains cadres d'applications. Mais qu'advient-il de ces performances lorsque le système est soumis à des variations non modélisées, pas forcément nuisibles, des perturbations dues à l'environnement extérieur qu'il faudra soit éliminer, soit négliger afin de prendre la bonne décision lorsque la véritable panne surviendra. Cette propriété prend le nom de **ROBUSTESSE**, robustesse face aux incertitudes, aux perturbations ; propriété qui garantit un fonctionnement performant dans un domaine déterminé par des indices, des marges fixées par l'utilisateur.

Cette introduction terminée, nous aborderons les axes de recherches qui font l'objet de ce document. Après avoir présenté les grands principes de la détection de pannes en exploitant les travaux de Massoumia (1986) appliqués aux systèmes d'état généralisés, nous détaillerons les résultats obtenus en suivant comme fil directeur les valeurs prises par la matrice E du système d'état généralisé. Chacun des cas traités sera illustré par des exemples numériques (pour plus d'informations, le lecteur intéressé pourra se reporter aux articles cités en référence).

II. DIAGNOSTIC DANS LES SYSTÈMES COMPLEXES

Avant d'aborder les concepts de base du diagnostic, il peut être intéressant de livrer quelques réflexions concernant des concepts liés au diagnostic des systèmes complexes.

Quelles sont les informations qui permettent de dire qu'un système est en défaut ou pas ? Quelles sont les informations qui permettent de différencier un défaut de perturbations liées au fonctionnement normal d'un système ? Il est très difficile de répondre à ce genre de questions dans l'absolu ; comme nous l'avons vu dans l'introduction, nous sommes obligés de définir un certain nombre de règles concernant les propriétés du résidu, quelques règles quant à la sensibilité désirée. À partir de cela, c'est la connaissance que nous avons du système surveillé qui nous permettra d'affiner et satisfaire à certaines exigences physiques. Les travaux présentés dans ce document se placent en amont de la phase d'implantation. Nous cherchons ici à mettre en place des procédures qui pourront, suivant le cas réel rencontré, s'adapter aux contraintes d'une implantation en temps réel, dans un environnement très perturbé, ... Il est évident que selon le cas d'application, un défaut sur un type d'installation sera pour une autre une perturbation ; les conditions d'application et les contraintes de fiabilité ne seront pas forcément les mêmes que l'on se place sur une fusée ou sur une boucle de régulation de température dans une climatisation domestique.

II.1. Concepts de base et systèmes d'état généralisés

Pour présenter les concepts de base de la détection de pannes, nous utiliserons la représentation de système d'état généralisé. Ces systèmes s'écrivent sous la forme suivante :

$$E\dot{x} = Ax \quad (10)$$

où x est l'état du système, E et A des matrices qui ne sont pas forcément carrées avec en plus la matrice E singulière ce qui ne nous permet pas d'avoir directement accès à l'état x du système.

Ce genre de représentation est, malgré son apparence, relativement courante et permet, par exemple, de décrire le mouvement d'un robot à plusieurs degrés de liberté, de représenter les équations de bilan d'un réseau de transport de matière.

Rappelons quelques notions et résultats importants ...

Nous nous placerons dans le cas continu décrit par un ensemble d'équations différentielles de la forme :

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (11)$$

ou dans le cas discret, décrit par l'équation matricielle récurrente suivante :

$$Ex_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (12)$$

avec $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ le vecteur d'état, $u(t) \in \mathfrak{R}^r$ le vecteur des entrées, E une matrice singulière éventuellement rectangulaire ; A et B sont des matrices de dimensions appropriées (dans le cas discret, x_k et u_k ont les mêmes dimensions que $x(t)$ et $u(t)$).

II.2. Propriétés fondamentales

Dans cette partie, nous aborderons les systèmes généralisés de manière à présenter les différentes propriétés importantes du diagnostic. Pour cela, nous nous intéresserons aux travaux de Massoumnia (1986) qui permettent de formaliser rigoureusement la majeure partie des propriétés que doit satisfaire un système de diagnostic des systèmes complexes. De plus, cette approche utilise les notions de matrice de transfert qui constituent une manière élégante d'aborder ce problème. Soit le système représenté par les équations suivantes :

$$\begin{cases} Ex_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (13)$$

Introduisons l'opérateur z de décalage défini de la façon suivante $zx_k = x_{k+1}$ et nous pouvons écrire le système sous la forme suivante :

$$\begin{cases} zEx_k = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (14)$$

Nous générerons deux familles de résidus liés aux types de pannes les plus courantes pouvant survenir dans un système complexe : une concernant les Résidus sensibles aux défauts de capteurs et l'autre concernant les Résidus sensibles aux défauts d'actionneurs.

II.2.1. Générateur de résidus sensibles aux défauts de capteurs

Nous étudierons le cas le plus général où plusieurs défauts de capteurs sont susceptibles d'apparaître simultanément. Soit un sous ensemble f_k^F des défauts de capteurs, cherchons un générateur de résidus tel que toute occurrence d'un défaut de capteur se traduise par un résidu significativement non nul. Réécrivons la sortie du $j^{\text{ème}}$ capteur de la façon suivante :

$$y_k^F = C_F x_k + f_k^F \quad (15)$$

où y_k^F est l'ensemble des sorties en défaut et C_F la matrice construite avec les lignes correspondantes de C . Nous avons :

$$y_k^F = C_F (zE - A)^{-1} Bu_k + f_k^F \quad (16)$$

Définissons $D^{-1}(z)N(z)$, une factorisation co-première à gauche de la matrice $C_F(zE - A)^{-1}$ où les lignes de C_F sont linéairement indépendantes. Nous avons la forme suivante :

$$f_k^F = y_k^F - D^{-1}(z)N(z)Bu_k \quad (17)$$

Le résidu r_k^F peut être généré en filtrant f_k^F par tout système linéaire, satisfaisant des contraintes liées à la stabilité, tel que :

$$r_k^F = -\frac{R^T(z)D(z)}{P(z)} f_k^F \quad (18)$$

où le vecteur ligne de polynômes $R(z)$ doit être choisi de manière à garantir le fait que si le $i^{\text{ème}}$ capteur tombe en panne, le résidu r_k^F doit être non nul. De plus, le polynôme $P(z)$ doit être tel que la matrice donnée dans (15) soit propre. Nous obtenons alors par substitution dans l'équation (17) :

$$r_k^F = -\frac{R^T(z)N(z)}{P(z)} Bu_k + \frac{R^T(z)D(z)}{P(z)} y_k^F \quad (19)$$

En utilisant les résultats obtenus par Lou (1982), nous obtenons directement l'ensemble de toutes les relations de parité concernant les capteurs référencés par F. Ces relations sont obtenues en recherchant le vecteur polynomial $(R^T(z)N(z) \quad R^T(z)D(z))$ tel que l'équation suivante soit vérifiée :

$$(R^T(z)N(z) \quad R^T(z)D(z)) \begin{pmatrix} zE - A \\ C_F \end{pmatrix} = 0_F \quad (20)$$

Afin d'illustrer ces résultats, nous traiterons l'exemple élémentaire suivant :

Considérons les matrices E, A, B, C suivantes :

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 3 & 3 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Supposons que tous les capteurs sont susceptibles de tomber en panne en prenant $C_F = C$. Nous avons alors :

$$(zE - A)^{-1} = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} 4z - 3 & 1 - 2z \\ 3 - 2z & z - 1 \end{pmatrix}$$

Nous pouvons obtenir une factorisation co-première de $G(z) = (zE - A)^{-1}$ en mettant cette matrice sous sa forme de Smith $GS(z)$ où :

$$GS(z) = PG(z)Q \text{ où } P \text{ et } Q \text{ sont deux matrices unimodulaires}$$

avec

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} 1 - 2z & 1 \\ 3 - 4z & 2 \end{pmatrix} \text{ et } GS(z) = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & z^{-1} \end{pmatrix}$$

Choisissons alors une factorisation co-première à gauche de $GS(z)$, $DS^{-1}(z)NS(z)$, telle que :

$$DS^{-1}(z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } NS(z) = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & z^{-1} \end{pmatrix}$$

Calculons alors une factorisation co-première à gauche de $G(z)$ de la façon suivante :

$$G(z) = P^{-1}DS^{-1}(z)NS(z)Q^{-1}$$

avec $D^{-1}(z) = P^{-1}DS^{-1}(z)$ et $N(z) = NS(z)Q^{-1}$:

$$D(z) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } N(z) = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 4-3z^{-1} & z^{-1}-2 \end{pmatrix}$$

Nous pouvons choisir $R(z) = 1$ et $P(z) = z$ afin d'obtenir des matrices de transfert propres. Les résidus pour la détection et la localisation sont alors :

$$\begin{aligned} r_k^1 &= 2u_{k-1}^1 - u_{k-1}^2 - y_{k-1}^1 - y_{k-1}^2 \\ r_k^2 &= 4u_{k-1}^1 - 3u_{k-2}^1 - 2u_{k-1}^2 + u_{k-2}^2 - y_{k-1}^1 \end{aligned}$$

Par une logique de décision appropriée, il est possible de localiser quels capteurs sont en panne (les actionneurs étant supposés fiables).

II.2.2. Générateur de résidus sensibles aux défauts d'actionneurs

Considérons maintenant la génération de résidus sensibles aux défauts d'actionneurs en utilisant comme précédemment l'approche des matrices de transfert. Les capteurs étant, à leur tour, supposés fiables, ces résidus vont nous permettre d'identifier tout défaut d'actionneurs. Supposons que la dynamique du système et les effets des défauts sur les actionneurs peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$zEx_k = Ax_k + Bu_k + Lf_k \quad (21)$$

où f_k est une fonction inconnue arbitraire qui introduit les effets des défauts d'actionneurs sur le système et L , la matrice de distribution des défauts supposée connue. Si nous désirons surveiller tous les actionneurs, nous poserons $L = B$. Maintenant réécrivons les équations (21) et (14) telles que :

$$y_k = G_u(z)u_k + G_f(z)f_k \quad (22)$$

où $f_k = (f_k^1 \quad \dots \quad f_k^j)^T$ et $f_k^i \in \mathfrak{R}^i$

$G_u(z)$ et $G_f(z)$ sont supposées être des matrices rationnelles propres pour l'opérateur z (nous supposons que $G_u(z)$ est strictement propre pour éviter qu'un défaut intervienne instantanément sur le système). Afin de représenter l'effet des défauts d'actionneurs, nous prendrons $G_f(z) = G_u(z)$ où :

$$G_u(z) = C(zE - A)^{-1}B \quad (23)$$

et

$$G_f(z) = C(zE - A)^{-1}L \quad (24)$$

II.2.2.a. Existence du générateur de résidus

Afin de garantir les propriétés du résidu, le générateur devra satisfaire un certain nombre de conditions. Définissons le vecteur d'observation $z_k = y_k \oplus u_k \in \mathfrak{R}^{p+r}$ qui servira d'entrée au générateur de résidus caractérisé par sa fonction de transfert $H(z)$:

$$r_k = H(z)z_k = \begin{pmatrix} H_y(z) & H_u(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_k \\ u_k \end{pmatrix} \quad (25)$$

telle que les entrées u_k n'affectent pas le vecteur des résidus r_k et telle que le défaut f_k^i n'affecte que la $i^{\text{ème}}$ composante du vecteur des résidus. En d'autres termes, notre objectif sera de trouver une matrice de transfert $H(z)$ telle que :

$$H(z)G(z) = \begin{pmatrix} -T(z) & 0_{j \times n} \end{pmatrix}, \quad T(z) \in \mathfrak{R}^{k \times k} \quad (26)$$

$$G(z) = \begin{pmatrix} G_f(z) & G_u(z) \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (27)$$

Nous pouvons alors énoncer le théorème suivant (Massoumnia, 1986).

Théorème 1. En supposant que les défauts sont représentés par des scalaires, il existe un générateur de résidus si et seulement si la fonction de transfert associée est inversible à gauche.

Grâce à ce théorème et si nous appelons $G_f^{-g}(z)$, l'inverse à gauche de $G_f(z)$, nous avons :

$$f_k = G_f^{-g}(z)y_k - G_f^{-g}(z)G_u(z)u_k \quad (28)$$

Pour générer le résidu r_k , il faut filtrer $-f_k$ par un filtre diagonal ne comportant aucun élément nul. Il est clair que par une sélection appropriée des éléments de la diagonale de $T(z)$, il sera possible de fixer arbitrairement la dynamique des matrices de transfert $H_y(z)$ et $H_u(z)$ où :

$$H_y(z) = -T(z)G_f^{-g}(z) \quad (29)$$

$$H_u(z) = -T(z)G_f^{-g}(z)G_u(z) \quad (30)$$

Les conditions d'existence du générateur de résidus données, il nous faut maintenant pouvoir distinguer entre différents types de défauts.

II.2.2.b. Distinguable entre les défauts

Un générateur de résidus robustes doit satisfaire à un certain nombre de propriétés afin de pouvoir distinguer entre, par exemple, deux défauts f_k^1 et f_k^2 . En exploitant (22), nous avons la relation suivante :

$$y_k = G_u(z)u_k + G_{f_1}(z)f_k^1 + G_{f_2}(z)f_k^2 \quad (31)$$

Intuitivement, nous pouvons dire qu'un défaut f_k^1 est dit identifiable d'un autre défaut f_k^2 si :

$$\text{Im}(G_{f_1}(z)) \not\subset \text{Im}(G_{f_2}(z)) \quad (32)$$

Ce qui veut dire : afin d'assurer une bonne localisation d'un défaut, il faut qu'on puisse distinguer son influence de celle des entrées ainsi que celles des autres défauts éventuels. Ainsi, si nous définissons une famille $\{L_i \ 1 < i < j\}$ de scalaires, chacun associé à l'apparition d'un défaut, cette famille sera identifiable si et seulement si la matrice de transfert :

$$C(zE - A)^{-1} [L_1 \ \dots \ L_k] \text{ est inversible à gauche}$$

De plus, si nous voulons avoir une famille de défauts identifiables, nous prendrons la relation suivante où la dynamique du système est décrite par :

$$y_k = G_u(z)u_k + \sum_{i=1}^j G_{f_i}(z)f_k^i \quad (33)$$

où $G_{f_i}(z)$ caractérise l'effet d'un défaut f_k^i pour lequel nous voulons définir un générateur de résidus ; considérons deux défauts dont les matrices de transfert $G_{f_a}(z)$ et $G_{f_b}(z)$, cherchons $H(z)$ tel que l'effet f_k^a ne soit pas affecté par les effets liés à f_k^b où ($a \neq b$ and $1 < a, b < j$). $H(z)$ doit donc satisfaire les deux conditions suivantes :

La matrice de transfert de (u_k, f_k^i) vers r_k doit être nulle

La matrice de transfert de f_k^i vers r_k est inversible à gauche

Appliquons alors le théorème suivant (Massoumnia, 1986) :

Théorème 2. Nous pouvons générer des résidus respectant les propriétés liées à l'identifiabilité des défauts si et seulement si les conditions suivantes sont vérifiées :

$$\text{Im}(G_{f_a}(z)) \cap \text{Im}(G_{f_b}(z)) = \{0\} \quad (34)$$

et $G_{f_a}(z)$ est inversible à gauche.

Ce théorème garantit la bonne définition, au sens des propriétés liées à la détection et la localisation, des résidus.

Le dernier point à étudier concerne le choix des éléments diagonaux de la matrice de transfert $T(z)$. Ce choix sera particulièrement simple ; soit le numérateur de $T_i(z)$ le plus petit commun multiple du dénominateur des éléments de la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice $G_f^{-s}(z)$, prenons le dénominateur de $T_i(z)$ égal à tout polynôme stable de degré tel que la $i^{\text{ème}}$ ligne de $H_y(z)$ est propre. Illustrons ces résultats par l'exemple suivant.

Soit les mêmes matrices E, A, B, C que précédemment. Supposons que nous surveillons tous les actionneurs du système donc $L = B$ et $G_f(z) = G_u(z)$. Un simple calcul nous donne pour cet exemple :

$$G_u(z) = \frac{1}{z} \begin{pmatrix} 4z-3 & 1-2z \\ 3-2z & z-1 \end{pmatrix}$$

L'inverse à gauche de $G_u(z)$ est :

$$G_u^{-g}(z) = \begin{pmatrix} z-1 & 2z-1 \\ 2z-3 & 4z-3 \end{pmatrix}$$

Choisissons $T_i(z) = \frac{1}{z}$ et en utilisant les équations (29) et (30) :

$$H_y(z) = \begin{pmatrix} -1+z^{-1} & -2+z^{-1} \\ -2+3z^{-1} & -4+3z^{-1} \end{pmatrix} \text{ et } H_u(z) = \begin{pmatrix} z^{-1} & 0 \\ 0 & z^{-1} \end{pmatrix}$$

Nous obtenons les deux résidus suivants r_k^1 and r_k^2 :

$$\begin{aligned} r_k^1 &= -y_k^1 + y_{k-1}^1 - 2y_k^2 + y_{k-1}^2 + u_{k-1}^1 \\ r_k^2 &= -2y_k^1 + 3y_{k-1}^1 - 4y_k^2 + 3y_{k-1}^2 + u_{k-1}^2 \end{aligned}$$

Ainsi, r_k^1 n'est affecté que par le premier actionneur alors que r_k^2 ne l'est que par le second.

II.3. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux de la détection et la localisation de pannes dans des systèmes complexes. À partir de cela, nous avons travaillé dans plusieurs directions et le plan que nous choisirons sera directement relié à la valeur prise par la matrice E. Nos travaux se sont intéressés aux cas où E est égale à la matrice identité, (systèmes standard), où E est singulière, (systèmes singuliers). Pour chacun de ces cas, nous avons choisi des directions nouvelles :

- pour les systèmes standard, les travaux concernant le diagnostic ne manquent pas, mais nous nous sommes intéressés au cas des systèmes à paramètres et états inconnus puis aux systèmes à paramètres stochastiques ; pour ces deux types de systèmes, nous avons tenté de définir une procédure de détection, localisation et correction de pannes
- pour les systèmes singuliers, les travaux concernant le diagnostic sont beaucoup moins nombreux et nous avons donc développé des procédures de détection, localisation et correction de pannes en exploitant d'une part, la notion de séquence d'innovation généralisée et d'autre part, les résultats obtenus dans le cas standard sur les systèmes à paramètres et états inconnus. Enfin, nous utilisons le formalisme des systèmes singuliers afin de résoudre un problème d'estimation simultanée de l'état et des défauts dans le cadre d'un système non linéaire.

ÉTUDE DES SYSTÈMES STANDARD

III. ÉTUDE DES SYSTÈMES STANDARD

L'équation (1) décrit un système dit standard. Les travaux dans le domaine du diagnostic sont extrêmement nombreux et ceci dans bon nombre de directions. Pour s'en assurer, il suffit de se rapporter à la majeure partie des articles cités dans la bibliographie de ce document. Dans le but de nous en démarquer, nous nous intéressons dans cette partie au problème du diagnostic appliqué aux systèmes dont les paramètres sont inconnus ou mal connus. En effet, dans la plupart des systèmes physiques à surveiller, la connaissance que l'on possède, est souvent très partielle, ce qui ne doit pas nous empêcher de prendre des décisions fiables quant au fonctionnement.

III.1. Estimation simultanée de l'état et des paramètres

Le problème à résoudre concerne la génération de résidus dans le cas où nous ne disposons d'aucune information sur le système surveillé. Pour cela, nous exploiterons les propriétés d'un algorithme de type "Bootstrap" qui va nous permettre d'estimer simultanément l'état et les paramètres du système en mode normal. Lorsqu'un défaut surviendra, nous procéderons alors à l'estimation simultanée de l'état et des paramètres vrais (non influencés par les effets du défaut) ainsi que l'amplitude du biais de manière à l'éliminer. Nous donnerons les développements théoriques qui permettent à partir d'un système décrit par des équations d'état standard, de réaliser les étapes de détection, localisation et correction.

III.1.1. Formulation du problème

Nous considérons un système multivariable, invariant, stochastique, linéaire décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = \bar{A}\bar{x}_k + \bar{B}u_k + \bar{w}_k \\ y_k = \bar{C}\bar{x}_k + v_k \end{cases} \quad (35)$$

où l'état est représenté par le vecteur $\bar{x}_k \in \mathfrak{R}^n$, l'entrée par le vecteur $u_k \in \mathfrak{R}^r$ et la sortie par le vecteur $y_k \in \mathfrak{R}^p$. Les matrices \bar{A} , \bar{B} et \bar{C} sont des matrices réelles de dimensions appropriées. Les séquences \bar{w}_k et v_k sont des bruits blancs non corrélés de variances respectives W et V .

En supposant que le système ci-dessus est observable, en sélectionnant T lignes indépendantes de la matrice d'observabilité (\bar{A}, \bar{C}) comme base de l'espace d'état, le système sera transformé en sa forme canonique observable :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (36)$$

où l'application de cette transformation donne pour les matrices et les vecteurs $A = T\bar{A}T^{-1}$, $B = T\bar{B}$, $C = \bar{C}T^{-1}$, $x_k = T\bar{x}_k$, $w_k = T\bar{w}_k$. Les matrices A et C ont alors la forme canonique suivante :

$$A = (A_{ij}) \text{ avec } i \text{ et } j \text{ variant de } 1 \text{ jusqu'à } p$$

où $A_{ii} = \begin{pmatrix} 0 & I_{g_i-1} \\ a_{ii1} & a_{ii g_i} \end{pmatrix}$, $A_{ij} = \begin{pmatrix} & & 0 \\ a_{ij1} & \dots & a_{ij g_j} \end{pmatrix}$ et $x_k = \begin{pmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \\ \dots \\ x_{pk} \end{pmatrix}$

$$C = \begin{pmatrix} 10 & \dots & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & 10 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

où g_i pour $i = 1, \dots, p$, sont les paramètres structuraux supposés connus du système avec $\sum_{k=1}^p g_k = n$, n étant l'ordre du système. x_{ik} est le $i^{\text{ème}}$ sous-état relatif au $k^{\text{ème}}$ sous système. L'utilisation de cette forme canonique va nous permettre d'estimer l'état et les paramètres à l'aide de l'algorithme de type "bootstrap".

III.1.2. Estimation simultanée de l'état et des paramètres en mode normal

La forme canonique observable nous donne une relation directe entre les sorties du système et un vecteur de paramètres. Supposant l'état initial connu, nous pouvons utiliser un algorithme des moindres carrés pondérés pour l'estimation des paramètres du système. Ces paramètres seront alors directement exploités pour réaliser l'estimation de l'état à partir d'un filtre de Kalman. Nous pouvons détailler cette procédure :

Nous pouvons réécrire le système de départ en utilisant la formulation de Kailath (1971) :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + Ke_k \\ y_k = C\hat{x}_k + e_k \end{cases} \quad (37)$$

où K est le gain de Kalman et e_k la séquence d'innovation du filtre de moyenne nulle et de matrice de covariance E .

Nous pouvons exprimer la $i^{\text{ème}}$ sortie du système de la façon suivante en exploitant les propriétés de la forme canonique :

$$y_{i(k+g_i)} = \hat{x}_{i1(k+g_i)} + e_{i(k+g_i)} \quad (38)$$

avec $\hat{x}_{i1(k+g_i)}$ la première composante du vecteur $\hat{x}_{i(k+g_i)}$. Nous obtenons alors :

$$y_{i(k+g_i)} = \Phi_{i_k}^T \theta_{i_k} + e_{i(k+g_i)} \quad (38)$$

où $\Phi_{i_k}^T$ est un vecteur variable et θ_{i_k} le vecteur des paramètres donnés par les relations suivantes :

$$\Phi_{i_k}^T = \left(\hat{x}_k^T \quad u_{k+g_i-1}^T \quad \dots \quad u_k^T \quad e_{i_{(k+g_i-1)}}^T \quad \dots \quad e_k^T \right) \quad (39)$$

$$\theta_{i_k} = \left(A_i \quad B_{i1} \quad \dots \quad B_{i_{g_i}} \quad k_{i1} \quad \dots \quad k_{i_{g_i}} \right)^T \quad (40)$$

où $A_i = \left(a_{i_{11}} \quad \dots \quad a_{i_{1g_i}} \quad \dots \quad a_{i_{p1}} \quad \dots \quad a_{i_{pg_i}} \right)$ est la g_i ^{ème} ligne des sous matrices (A_{ij}) de A , ($j=1, \dots, p$), (B_{ij}) et (k_{ij}) sont les j ^{ème} lignes des sous matrices B_i et k_i des matrices B et K respectivement.

Il est facile de remarquer que le vecteur $\Phi_{i_k}^T$ n'est pas corrélé avec l'erreur résiduelle $e_{i_{(k+g_i)}}$, et que $E\left(e_{i_{(k+g_i)}}\right) = 0$; ainsi une estimation non biaisée du vecteur de paramètres peut être obtenue en appliquant un algorithme des moindres carrés pondérés.

Nous voyons que les paramètres de chaque sous système peuvent être estimés indépendamment les uns des autres. L'algorithme "Bootstrap" pour l'estimation de l'état et des paramètres est donné par les deux étapes suivantes.

Étape 1. Estimation des paramètres

Les paramètres du système peuvent être estimés récursivement en utilisant un estimateur des moindres carrés :

$$\begin{cases} e_{i_{(k+g_i)}} = y_{i_{(k+g_i)}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k} \\ \hat{\theta}_{i_{(k+1)}} = \hat{\theta}_{i_k} + M_{i_{(k+1)}} \Phi_{i_k} \left(y_{i_{(k+g_i)}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k} \right) \\ M_{i_{(k+1)}} = \left(\lambda_i M_{i_k}^{-1} + \Phi_{i_k} \Phi_{i_k}^T \right)^{-1} \\ \hat{\theta}_{i_0} = \theta_{i_0} \end{cases} \quad (41.a)$$

où λ_i est un facteur d'oubli satisfaisant $0 < \lambda_i < 1$; M_{i_0} et θ_{i_0} sont respectivement une matrice de pondération définie positive et l'estimation initiale donnée.

Étape 2. Estimation de l'état

Les estimations des matrices \hat{A} , \hat{B} et \hat{K} peuvent être directement construites à partir des coefficients du vecteur $\hat{\theta}_{i_k}$. Elles peuvent alors être exploitées pour calculer une estimation de l'état à l'aide du filtre de Kalman.

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{A} \hat{x}_k + \hat{B} u_k + \hat{K} e_k \quad (41.b)$$

Cette procédure se reproduit alors entre ces deux étapes sur le principe d'un algorithme de type "Bootstrap".

III.1.3. Estimation simultanée de l'état et des paramètres en présence de défaut

Quand un défaut apparaît sur le système, l'innovation donnée par $e_{i_{(k+s)}} = y_{i_{(k+s)}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k}$ montre un comportement différent de celui correspondant au cas sans défaut. Exploitant ces propriétés, nous calculerons un test de Page-Hinkley (Basseville, 1988) qui permettra de localiser le défaut ainsi qu'une estimation du temps d'apparition. À partir de cet instant, nous considérons le système dans un mode dit de défaut et nous prenons en compte cette modification en introduisant un terme représentatif du biais b_k .

Afin de détecter l'apparition d'un défaut, nous appliquons le test de Page-Hinkley au résidu obtenu pour chacun des capteurs :

$$\varepsilon_{i_{(k+n_i)}} = y_{i_{k+n_i}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k} \quad (42)$$

Lorsque la somme cumulée franchit le seuil de détection, le système est déclaré en mode défaut. Nous le réécrivons sous le système suivant :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ b_{k+1} = b_k \\ y_k = Cx_k + Hb_k + v_k \end{cases} \quad (43)$$

Les dimensions du vecteur biais b_k sont choisies relativement au nombre de composantes e_{i_k} qui auront franchi le seuil du test de Page-Hinkley. H est une matrice de sélection de rang plein. La correction du défaut se fera par élimination du biais b_k sur la sortie du système afin d'obtenir une estimation non biaisée de l'état et des paramètres.

Estimation du biais

La meilleure estimation de la i ème composante du vecteur de biais est donnée par la valeur moyenne de l'erreur résiduelle :

$$\hat{b}_{i_{(k+n_i)}} = E\left\{ \left(y_{i_{k+n_i}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k} \right) \right\} \quad (44)$$

ce qui nous permet d'avoir une sortie corrigée :

$$y_{i_{k+n_i}}^e = y_{i_{k+n_i}} - \hat{b}_{i_{(k+n_i)}} \quad (45)$$

Les paramètres et l'état du système sont alors estimés en utilisant les équations du cas sans défaut mais en remplaçant $y_{i_{k+n_i}}$ par $y_{i_{k+n_i}}^e$. Illustrons cet algorithme par l'exemple suivant.

Exemple numérique

Afin de fixer les idées, nous présenterons une application de cette technique sur le système suivant :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}_{k+1} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 & -0.3 & 0.5 & -0.4 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.6 & 0.5 & 0.12 & 0.8 & -0.7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}_k + \begin{pmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.4 & -0.36 \\ 0.7 & -0.6 \\ 0.2 & -0.5 \\ -0.1 & 0.2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}_k + w_k$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{pmatrix}_k + v_k$$

Les entrées sont des bruits blancs de moyenne nulle et de variance unité. Les valeurs initiales pour les différentes estimations sont prises égales à zéro. Le biais est introduit sur le système à partir de l'instant 1000 avec une amplitude de 1 : la figure 5 montre les mesures ainsi obtenues.

La figure 6 représente les séquences d'innovation obtenues. Par application d'un test de détection de saut de moyenne, nous localisons la séquence mise en cause et dans ce cas, nous choisirons la matrice C de distribution de la façon suivante :

$$H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Nous estimons alors l'amplitude de ce biais. La figure 8 montre alors les séquences d'innovation corrigées qui permettront d'obtenir une estimation correcte de l'état et des paramètres, les résultats finaux étant exposés dans les deux tableaux suivants.

$$X_{\text{norm}_k} = \| \text{valeur vraie}_k - \text{estimation de l'état}_k \|^2$$

$$\Theta_{\text{norm}_k} = \| \text{valeur vraie}_k - \text{estimation des paramètres}_k \|^2 / \| \text{valeurs vraies} \|^2$$

Paramètres	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₁₅	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₅
Valeurs	.2	-.3	.5	-.4	.9	-.6	.5	.12	.8	-.7
Estimations	.205	-.284	.509	-.412	.872	-.603	.505	.096	.816	-.705

Table 1 : Estimations finales des paramètres a_{ij} après 1900 échantillons

Paramètres	b_{11}	b_{12}	b_{21}	b_{22}	b_{31}	b_{32}	b_{41}	b_{42}	b_{51}	b_{52}
Valeurs	.1	0	.4	-.36	.7	-.6	.2	-.5	-.1	.2
Estimation	.084	-.013	.404	-.359	.693	-.595	.190	-.520	-.100	.201

Table 2 : Estimations finales des paramètres b_{ij} après 1900 échantillons

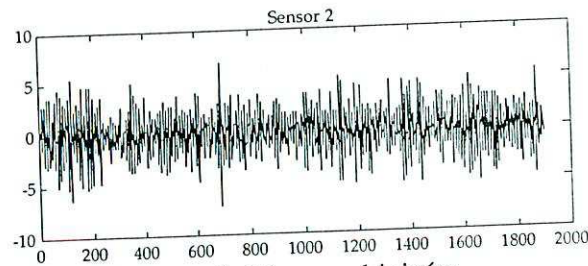
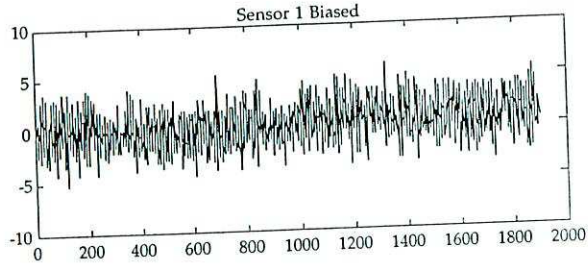


Figure 5. Mesures biaisées

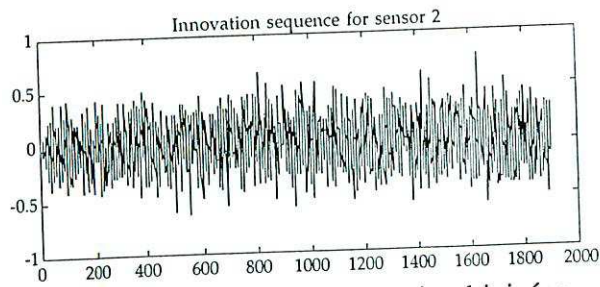
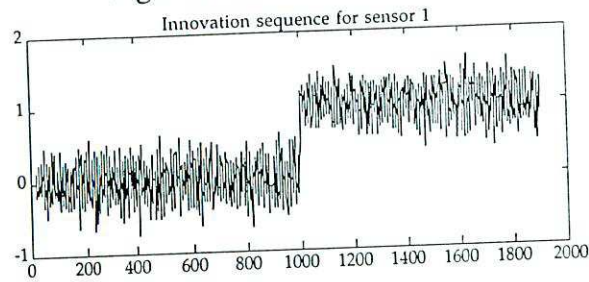


Figure 6. Séquences d'innovation biaisées

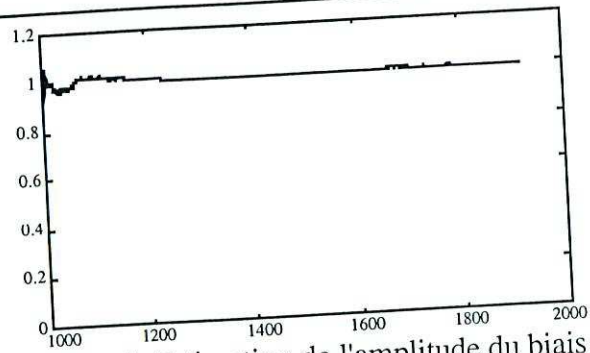


Figure 7. Estimation de l'amplitude du biais

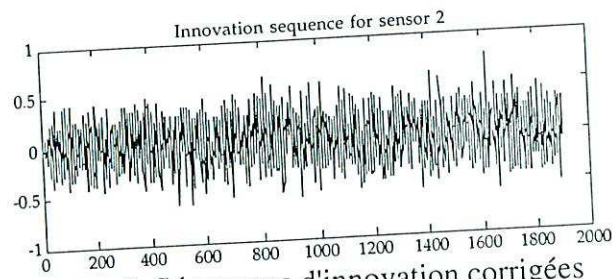
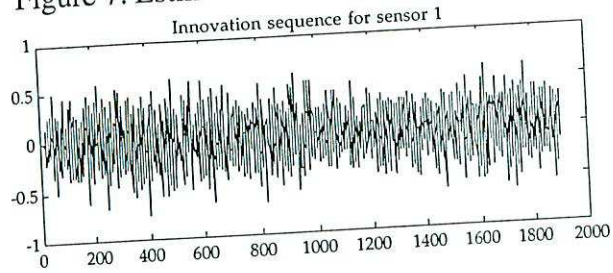


Figure 8. Séquences d'innovation corrigées

III.1.4. Conclusion

Cette approche étant numériquement fiable, nous avons tenté de l'appliquer à un processus pilote réel dans le but de valider physiquement ses performances. Le processus choisi est un pendule inverse qui a servi de base à des études comparatives faites sur différentes techniques de détection de pannes. Le pendule est celui de l'équipe du Professeur FRANK à Duisbourg, les valeurs des paramètres et les fichiers de données ayant été fournis par les chercheurs de cette équipe.

III.2. Application à un processus pilote - le pendule inverse

Dans un premier temps, nous appliquons cette procédure sur une simulation numérique du pendule, dans le cas déterministe puis dans le cas stochastique ; l'objectif étant de conserver le pendule en position verticale (pour plus d'informations techniques sur le pendule voir les articles cités en référence).

III.2.1. Cas déterministe

Nous étudierons les manifestations d'un biais simulé sur le capteur numéro 1 (déviation angulaire) à partir de l'instant 200. Les figures suivantes montrent le comportement du pendule en présence de ce défaut.

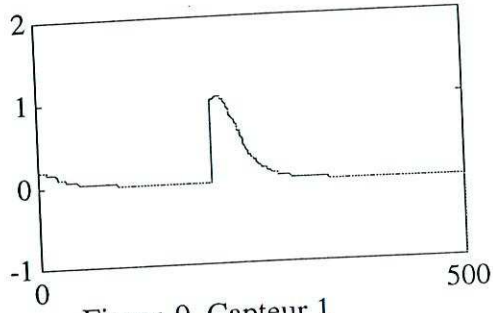


Figure 9. Capteur 1

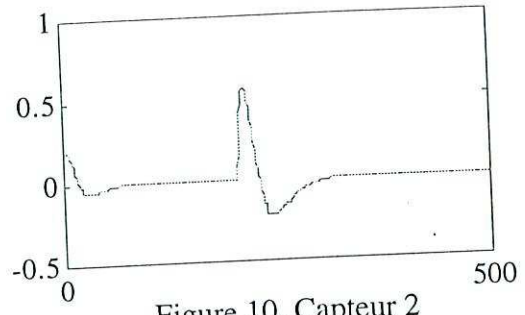


Figure 10. Capteur 2

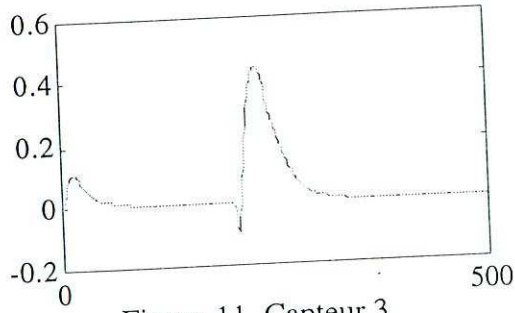


Figure 11. Capteur 3

Nous y appliquons notre procédure de détection, localisation et correction de défauts afin d'éliminer l'influence du défaut sur le capteur 1. Les trois figures suivantes montrent les sorties corrigées du système.

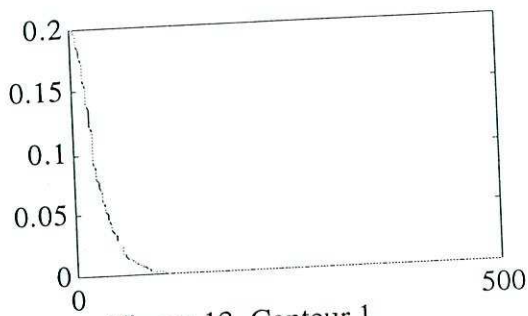


Figure 12. Capteur 1

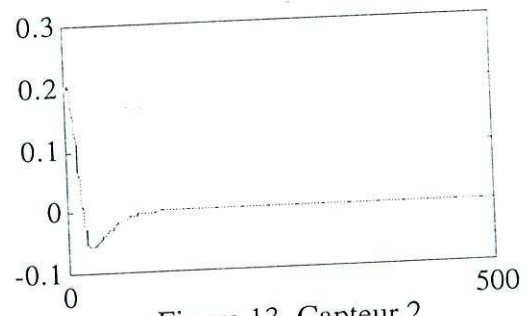


Figure 13. Capteur 2

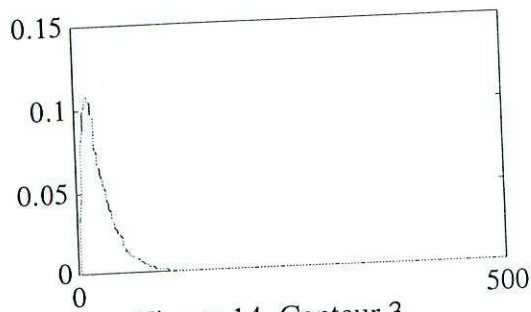


Figure 14. Capteur 3

Lorsque nous simulons une panne du capteur de déviation angulaire, nous sommes en mesure, en exploitant notre algorithme, de détecter, d'estimer le défaut et d'éliminer son influence.

III.2.2. Cas stochastique

Ici, nous nous intéresserons à un cas plus réaliste dans lequel nous introduisons des bruits aléatoires sur l'équation de mesure ; le capteur mis en question est celui mesurant la déviation angulaire du pendule. L'estimateur devient alors le filtre de Kalman. Nous montrons en premier lieu les mesures biaisées.

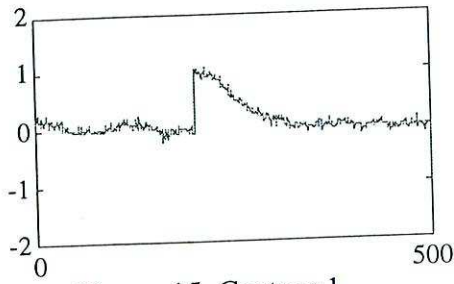


Figure 15. Capteur 1

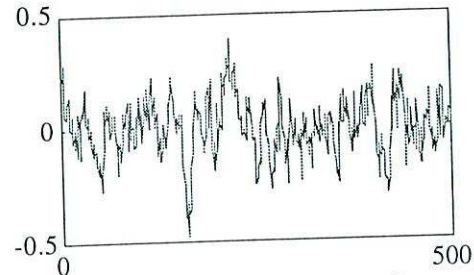


Figure 16. Capteur 2

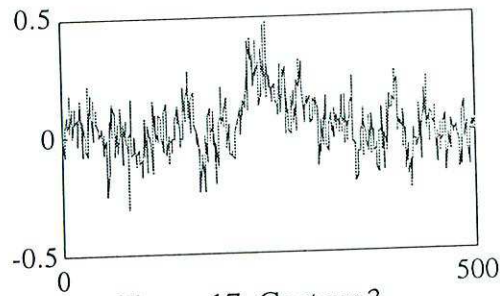


Figure 17. Capteur 3

L'application de notre procédure mène aux résultats corrigés présentés par les figures suivantes :

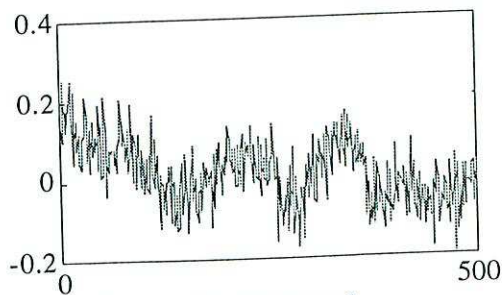


Figure 18. Capteur 1

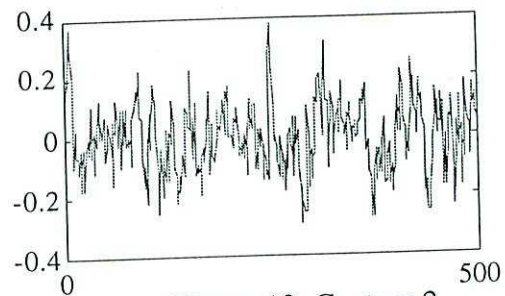


Figure 19. Capteur 2

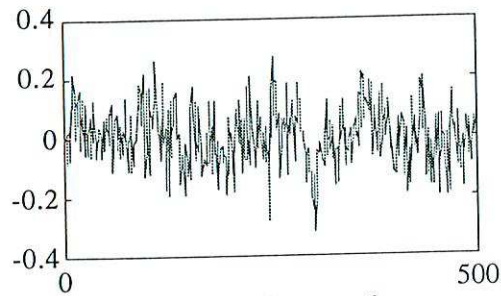


Figure 20. Capteur 3

Ces simulations numériques nous ont prouvé les performances de cette méthode. Dans le contexte des études faites au sein du groupe de travail "Failure detection in dynamic system" de l'IAR, nous avons exploité les données fournies par l'équipe de Duisbourg. Les résultats des différentes expérimentations réalisées dans des équipes du CRAN mais également de Mulhouse et Duisbourg ont mené à l'organisation de sessions invitées aux conférences internationales TOOL'DIAG 93 et SAFEPROCESS'94 ; tous ces résultats sont également synthétisés dans un numéro spécial de la Revue Européenne de Diagnostic et de sûreté de fonctionnement (Vol. 4, n°1, 1994).

III.2.3. Expérimentation sur le pendule

Dans ces données, quatre types de défauts de capteurs ont été produits ; les trois capteurs sont les suivants : un capteur de déviation angulaire, un capteur de position et un capteur de vitesse du chariot. Les défauts étudiés sont :

- défaut complet, mise à 0 Volt, F0
- défaut de 20%, mise à $0.8 \times$ valeur réelle, F20
- défaut de 50%, mise à $0.5 \times$ valeur réelle, F50
- défaut complet par saturation, mise à 9.9 Volts, F9

Par exemple, nous pouvons voir les conséquences d'un défaut complet sur le capteur de déviation angulaire sur les figures suivantes :

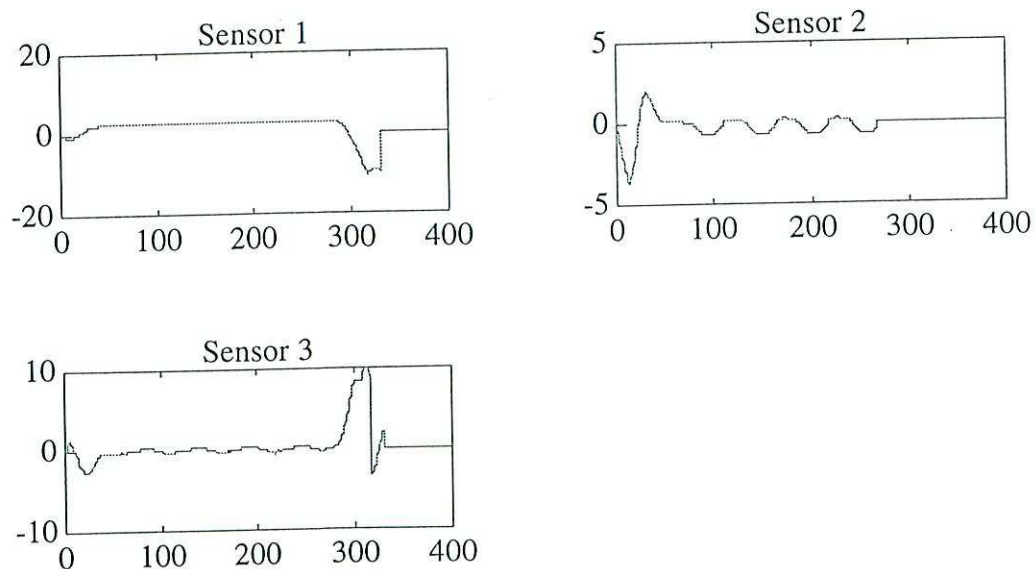


Figure 21. Défaut complet sur le capteur 1

Nous remarquons qu'un défaut de ce type fera chuter le pendule. Il pourrait donc être intéressant de définir une stratégie de diagnostic permettant d'éliminer les conséquences d'une telle rupture de capteur sur le comportement du système.

Suivant les différents cas mis en oeuvre, notre approche donne des résultats aux performances variables ([4]) ; il est évident que certains cas, tels que les défauts de l'actionneur, ne pourront être corrigés par une procédure logicielle.

III.3. Systèmes standard à paramètres stochastiques

Afin de prendre en compte les éventuelles incertitudes ou perturbations agissant sur le modèle d'un système, nous avons utilisé l'approche par équations différentielles stochastiques ; ce genre d'équations interviennent dans une grande variété de systèmes physiques, systèmes mécaniques comportant une charge variant aléatoirement, élimination du bruit dans les signaux de radars, et bien d'autres encore.

Grâce à une représentation du système comportant des paramètres stochastiques (Yaz, 1987) et au calcul de l'estimateur correspondant (Yaz, 1987) pour des systèmes linéaires comportant des défauts de type additif, nous étudierons le problème du diagnostic pour des systèmes linéaires invariants soumis à des perturbations de type aléatoire agissant sur les coefficients des matrices de la représentation d'état.

Nous exploitons les propriétés des estimateurs développés pour les systèmes à paramètres aléatoires afin de générer des résidus qui prendront en compte ces variations aléatoires. Cette approche, mise en comparaison avec des techniques classiques a donné des résultats très prometteurs.

III.3.1. Position du problème

Considérons un système stochastique décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + D_k w_{k+1} \\ y_k = C_{k-1} x_k + G_{k-1} v_{k-1} \end{cases} \quad (46)$$

où le vecteur d'état est $x_k \in \mathfrak{R}^n$, le vecteur de sortie $y_k \in \mathfrak{R}^p$, le vecteur d'entrée $u_k \in \mathfrak{R}^r$, le vecteur de bruit de système $w_k \in \mathfrak{R}^l$ et le vecteur de bruit de mesure $v_k \in \mathfrak{R}^s$.

Les hypothèses imposées sont les suivantes :

1. Le vecteur de bruit w_k est tel que $w_k \in N(0, I)$
2. Les matrices A_k , B_k et C_{k-1} sont supposées avoir des coefficients aléatoires finis
3. $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$ indépendant de w_k et x_0 est conditionnellement gaussien pour y_0 donné avec pour moyenne conditionnelle \hat{x}_0 et covariance conditionnelle P_0 .

Nous pouvons rappeler la propriété suivante : x est dit conditionnellement gaussien pour y donné s'il existe un vecteur aléatoire \hat{x} et une matrice aléatoire $P = P^T \geq 0$ telle que la fonction caractéristique conditionnelle de x pour y donné s'écrit :

$$E\left[e^{i\lambda^T x} | y\right] = \exp\left(i\lambda^T \hat{x} - \frac{1}{2} \lambda^T P \lambda\right) \quad (47)$$

pour tout vecteur constant λ . Dans ce cas :

$$\hat{x} = E[x|y] \text{ and } P = E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T | y] \quad (48)$$

De ces conditions, nous énoncerons le théorème suivant. Ce théorème donne les équations du filtre estimateur.

Théorème 3. Si l'état est conditionnellement gaussien connaissant $[y_0, y_1, \dots, y_k]$ de moyenne conditionnelle \hat{x} et de covariance conditionnelle P_k , il peut être estimé par les équations récurrentes suivantes :

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k + K_k [y_{k+1} - C_k A_k \hat{x}_k - C_k B_k u_k] \quad (49)$$

$$P_{k+1} = R_k - K_k [C_k R_k] \quad (50)$$

avec pour estimées initiales \hat{x}_0 et P_0 où :

$$K_k = [R_k C_k^T + I] [C_k R_k C_k^T]^+ \quad (51)$$

$$R_k = A_k P_k A_k^T + D_k D_k^T \text{ la matrice de covariance de l'erreur de prédiction.} \quad (52)$$

Remarque :

Nous devons introduire la pseudo inverse A^+ de la matrice A de dimensions $n \times m$. Si le rang de la matrice A est $s \leq \min(n, m)$ il existe une matrice B de dimensions $n \times s$ et une matrice C de dimensions $s \times m$ telles que :

$$A = BC$$

La matrice définie par :

$$A^+ = C^T (CC^T)^{-1} (B^T B)^{-1} B^T$$

est appelée la pseudo inverse de la matrice A .

III.3.2. Procédure de détection et de localisation

Nous nous intéresserons maintenant au problème de la détection localisation pour ce genre de systèmes. Nous décrirons l'influence des défauts de type additif $H_k f_k$ par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + D_k w_{k+1} \\ y_k = C_{k-1} x_k + G_{k-1} v_{k-1} + H_k f_k \end{cases} \quad (53)$$

Le vecteur des défauts est $f_k \in \mathcal{R}^f$, la dimension f est telle que $f \leq m$ et la matrice H_k est une matrice supposée connue et de dimension appropriée.

III.3.2.a. Génération des résidus et détection

La forme récurrente du générateur de résidus est alors donnée par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = [A_k - K_k C_k A_k] \hat{x}_k + [B_k - K_k C_k B_k] u_k + K_k y_{k+1} \\ r_{k+1} = y_{k+1} - C_k \hat{x}_{k+1} \end{cases} \quad (54)$$

Cette deuxième relation définit la séquence d'innovation que nous utiliserons comme résidu, cette séquence prenant en compte les variations sur les coefficients du système. La détection de l'occurrence d'un défaut se fera par application à ce résidu, d'un test de rupture.

III.3.2.b. Correction du défaut

Lorsqu'un défaut apparaît sur un capteur, la séquence d'innovation $r_{k+1} = y_{k+1} - C_k \hat{x}_{k+1}$ présente un comportement différent de celui obtenu lorsque tout se passe bien. Nous pouvons alors tenir compte de cette occurrence en modifiant le système initial de la façon suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + D_k w_{k+1} \\ f_{k+1} = f_k \\ y_k = C_{k-1} x_k + G_{k-1} v_{k-1} + H_k f_k \end{cases} \quad (56)$$

La dimension du vecteur de défaut étant choisie en fonction du nombre de résidus qui auront déclenché une alarme, la matrice H_k étant une matrice de rang plein colonne qui permettra la sélection des capteurs en défaut.

Nous estimerons l'amplitude du défaut en utilisant la relation suivante, puis nous corrigerons les mesures faites en l'éliminant :

$$\hat{f}_k^i = E\{(y_{k+1}^i - C_k^i \hat{x}_{k+1})\} \quad (57)$$

où $i \leq f$ indique la mesure mise en cause. Nous pouvons reconstruire la sortie non biaisée de système par la relation suivante

$$(y_k^i)_{unb} = y_k^i - \hat{f}_k^i \quad (58)$$

Exemple numérique

Illustrons les performances de cette approche sur un exemple élémentaire donné par les équations suivantes :

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} \alpha_k & 0 \\ 0 & \beta_k \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} w_k$$

$$y_k = [1 \ 0]x_k + v_{k-1}$$

où les coefficients α_k et β_k sont des coefficients dits incertains connus uniquement par leurs variations aléatoires dans un intervalle. Le coefficient α_k est défini de la façon suivante :

$$\alpha_k \in [0.5; 1]$$

et le coefficient β_k :

$$\beta_k \in [0.25; 0.75]$$

Ces deux coefficients varient aléatoirement entre ces deux limites.

Nous introduisons un défaut entre les instants 100 et 200 ; les mesures biaisées sont représentées par la figure suivante :

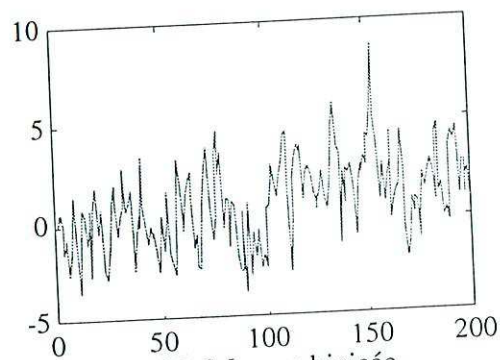


Figure 22. Mesure biaisée

Nous calculons ensuite le résidu qui sera utilisé pour la détection :

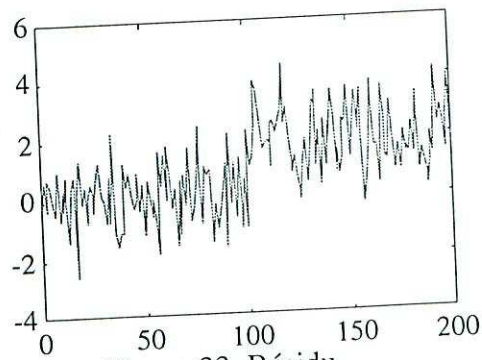


Figure 23. Résidu

Nous estimons par la suite l'amplitude du défaut donnée à la figure suivante :

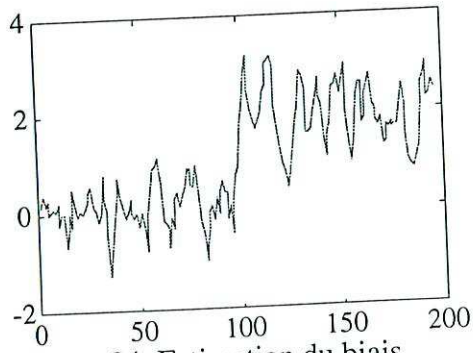


Figure 24. Estimation du biais

Nous corrigeons ensuite la mesure incriminée :

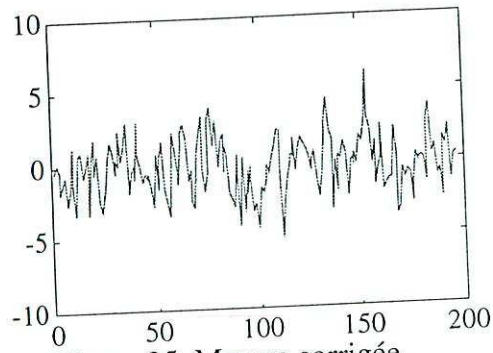


Figure 25. Mesure corrigée

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé des approches pour le diagnostic appliquées aux systèmes représentés par une équation d'état standard. Afin de répondre à certaines questions posées liées à la notion de robustesse des algorithmes à la méconnaissance d'un certain nombre des paramètres physiques des systèmes surveillés, nous avons abordé l'étude des systèmes à paramètres et états inconnus et des systèmes à paramètres stochastiques. Dans ce chapitre, les résultats obtenus aussi bien en simulation qu'en application réelle, nous ont montré les performances de ces approches et l'intérêt que nous pourrions leur porter dans le cadre de la robustesse.

ÉTUDE DES SYSTÈMES SINGULIERS

IV. ÉTUDE DES SYSTÈMES SINGULIERS

Les systèmes obtenus lorsque la matrice E n'est pas inversible sont dits singuliers. Ils trouvent leur application dans les réseaux électriques (Newcomb 1981, 1982), les systèmes de grande dimension (Lewis et al 1986, Rosenbrock et al 1974), l'économie (Luenberger et al 1977), la démographie (Campbell 1980), les systèmes singulièrement perturbés (Campbell 1980), les réseaux de neurones (De Claris et al 1984), la robotique (McClamroch 1986).

Les premiers travaux sur les systèmes singuliers sont ceux de Weierstrass en 1867 où est développée une théorie des diviseurs élémentaires pour l'étude du cas régulier (avec $\det(sE - A) \neq 0$). Cette analyse a été étendue au cas singulier (E et A rectangulaires ou $\det(sE - A) = 0$) par Kronecker en 1890 par l'introduction de la notion d'indices minimaux. Dans ce domaine, les travaux présentés par Gantmacher 1959 constituent une introduction sur la théorie des faisceaux de matrices réguliers et singuliers.

Le domaine fréquentiel, pour les systèmes singuliers, a été initialement étudié par Rosenbrock en 1970, Verghese et al. en 1981. Les autres approches principales sont temporelles et la plupart des résultats sont dus à Luenberger en 1978, 1979 et 1989 ; il donna respectivement le *double sweep method*, *shuffle algorithm*, *boundary recursion*¹.

Un autre développement important dans le domaine temporel utilise la *Drazin inverse* introduit par Campbell, Meyer et Rose en 1976 avec des applications dans Campbell 1980 et Dziurla et al en 1979.

Pour le diagnostic, très peu d'auteurs se sont intéressés aux systèmes décrits par des équations singulières ; elles permettent de décrire un certain nombre de procédés physiques souvent rencontrés dans l'industrie (robotique, les réseaux de distribution de matière, ...) mais permettent également de résoudre de façon très élégante des problèmes d'estimation robuste en présence d'entrées inconnues.

IV.1. Approche par estimation d'état

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'approche par estimation de l'état du système. Le système étant singulier, il nous faudra définir une séquence d'innovation généralisée qui servira de résidu pour la détection et la localisation.

IV.1.1. Position du problème

Soit le système singulier décrit par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} Ex_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (59)$$

$$x_k \in \mathfrak{R}^n, y_k \in \mathfrak{R}^m, u_k \in \mathfrak{R}^p$$

$E \in \mathfrak{R}^{q \times n}$, $A \in \mathfrak{R}^{q \times n}$, $B \in \mathfrak{R}^{q \times p}$ et $h \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ sont des matrices constantes. Les séquences w_k et v_k sont des bruits blancs de moyenne nulle et :

$$E \left\{ \begin{bmatrix} w_k \\ v_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_k^T & v_k^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & V \end{bmatrix} \delta_{k,j} \text{ avec } W > 0 \text{ et } V > 0$$

¹ Les noms anglais sont utilisés parce que plus familiers que toute traduction approximative.

En supposant que l'état initial x_0 est une variable aléatoire gaussienne de moyenne \bar{x}_0 et de variance P_0 . L'estimation optimale $\hat{x}_{k+1/k+1}$ de l'état x_{k+1} est donnée par le théorème suivant :

Théorème 4. L'estimation optimale $\hat{x}_{k+1/k+1}$ de l'état pour le système singulier donné ci-dessus satisfait l'équation récurrente suivante :

$$\hat{x}_{k+1/k+1} = P_{k+1/k+1} E^T (A P_{k/k} A^T + W)^{-1} (A \hat{x}_{k/k} + B u_k) + P_{k+1/k+1} C^T V^{-1} y_{k+1} \quad (60)$$

où $\hat{x}_{0/0} = \bar{x}_0$

$P_{k/k} = E \{ \varepsilon_{k/k} \varepsilon_{k/k}^T \}$ avec l'erreur d'estimation $\varepsilon_{k/k} = x_k - \hat{x}_{k/k}$

$P_{k/k}$ satisfait l'équation de Ricatti généralisée suivante :

$$P_{k+1/k+1} = \left[E^T (A P_{k/k} A^T + W)^{-1} E + C^T V^{-1} C \right]^{-1} \quad (61)$$

avec : $P_{0/0} = P_0$

À partir de ces résultats, nous abordons le problème de la génération d'une séquence d'innovation qui servira de résidu pour la détection et la localisation des défauts.

IV.1.2. Détection et localisation des défauts

La première phase exploite les notions classiques d'estimation d'état qui nous permettront de générer une séquence d'innovation. Dans le cas des systèmes standard, le problème est assez simple mais pour les systèmes singuliers ne disposant pas de l'estimation $\hat{x}_{k/k-1}$ mais de $E \hat{x}_{k/k-1}$, il nous faut généraliser cette notion de séquence d'innovation.

Comme nous pouvons supposer que la matrice C est de rang plein ligne, les mesures étant généralement prises indépendantes, nous pouvons toujours trouver une transformation S telle que :

$$\begin{aligned} ES\bar{x}_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k &= CS\bar{x}_k + v_k \\ &= [I \quad 0] \begin{bmatrix} \bar{x}_k^1 \\ \bar{x}_k^2 \end{bmatrix} + v_k \\ &= \bar{x}_k^1 + v_k \end{aligned}$$

$$\text{ou} \quad \begin{cases} E_1 \bar{x}_{k+1}^1 + E_2 \bar{x}_{k+1}^2 = Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k = \bar{x}_k^1 + v_k \end{cases} \quad (62)$$

où $\bar{x}_k^1 \in \mathfrak{R}^m$, $\bar{x}_k^2 \in \mathfrak{R}^{n-m}$, $E_1 \in \mathfrak{R}^{q \times m}$, $E_2 \in \mathfrak{R}^{q \times (n-m)}$. La condition nécessaire et suffisante de l'existence d'une solution $\text{rang} \begin{pmatrix} C \\ E \end{pmatrix} = n$ (Zasadzinski et al 1991) appliquée au système transformé devient :

$$\text{rang}(E_2) = n - m$$

Soit une matrice $N \in \mathfrak{R}^{[q-(n-m)] \times q}$ telle que :

$$NE_2 = 0 \quad (63)$$

Nous avons la relation suivante :

$$\text{rang}(N) = q - (n - m)$$

Nous pouvons réécrire le système de départ sous la forme suivante :

$$\begin{cases} NE_1 \bar{x}_{k+1}^1 = NAx_k + NBu_k + Nw_k \\ y_k = \bar{x}_k^1 + v_k \end{cases} \quad (64)$$

Ce que nous cherchions, la *séquence d'innovation généralisée*, peut alors s'exprimer de la façon suivante :

$$\gamma_{k+1} = NE_1 y_{k+1} - NBu_k - NA\hat{x}_{k/k} \quad (65)$$

Elle est de moyenne nulle et de matrice de covariance :

$$\Gamma_{k+1} = NAP_{k/k} A^T N^T + NWN^T + NE_1 VE_1^T N^T \quad (66)$$

Mehra et al (1971) ont utilisé la séquence d'innovation pour détecter des défauts d'instrumentation dans les systèmes dynamiques standard en utilisant des tests de blancheur, de moyenne et de covariance. Ici, nous proposons d'exploiter le test du Chi2 sur la variable :

$$\chi_k = \gamma_k^T \Gamma_k^{-1} \gamma_k \quad (67)$$

Si χ_k franchit le seuil de détection, le défaut sera mis en évidence. Les défauts de capteurs peuvent être modélisés de la façon suivante :

$$y_k = \bar{x}_k^1 + e_i a_k^i + v_k \quad (68)$$

où e_i est un vecteur colonne comportant un 1 dans sa i ème ligne et des zéros ailleurs ; a_k^i représente l'amplitude du défaut. Sous l'hypothèse de présence d'un défaut sur le i ème capteur, la séquence d'innovation généralisée devient :

$$\gamma_k = \rho_k + D_i a_k^i \quad (69)$$

où $D_i = (NE_1)_i$ représente la direction de panne de capteur donnée par la i ème colonne de la matrice NE_1 et $\{\rho_k\}$ est une séquence aléatoire blanche de moyenne nulle avec $E\{\rho_k \rho_k^T\} = \Gamma_k$. La localisation du défaut 1, par une procédure au sens du maximum de vraisemblance, peut être obtenue par la technique suivante :

$$l_k = \arg(\max(p_k^i)) \quad (70)$$

où $p_k^i = \frac{D_i^T \Gamma_k^{-1} \gamma_k}{[D_i^T \Gamma_k^{-1} D_i]^{1/2}}$ est la projection de γ_k sur la i ème direction de panne. La "localisabilité" des défauts est vérifiée si $p_k^i \neq p_k^j, \forall (i, j)$ et $i \neq j$. L'amplitude estimée du défaut est donnée par :

$$\hat{a}_k^s = \frac{D_{s_k}^T \Gamma_k^{-1} \gamma_k}{D_{s_k}^T \Gamma_k^{-1} D_{s_k}} \quad (71)$$

Pour illustrer les performances de cette technique, nous avons choisi l'exemple suivant où les matrices E, A, B et C ont les valeurs suivantes :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.3 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.25 & 0.1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.1 & -0.2 \\ 0.7 & 0 \\ 0.5 & 0.56 \\ -0.2 & 0.45 \\ 0.6 & -0.26 \\ -0.6 & 0.52 \\ 0.25 & 0.12 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La figure suivante montre le capteur mis en cause par l'apparition d'un défaut à partir de l'instant 40 :

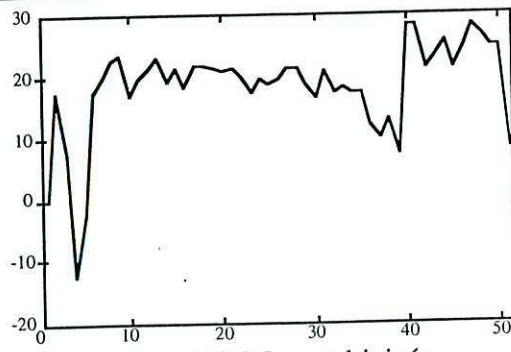


Figure 26. Mesure biaisée

Les séquences d'innovation généralisées γ_k avant et après l'apparition du défaut sont données par la figure suivante :

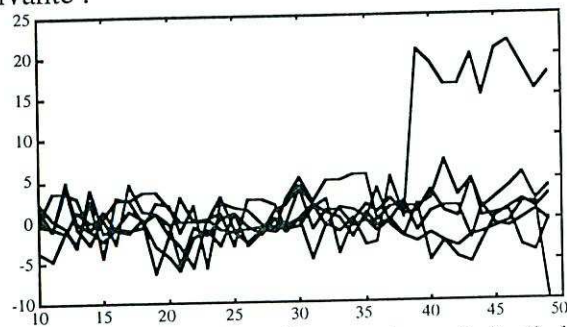


Figure 27. Séquences d'innovation généralisées

Les trois courbes suivantes représentent respectivement :

- le comportement de la variable χ_k avec le seuil de détection correspondant
- la localisation du défaut grâce à la variable l_k
- l'estimation de l'amplitude du défaut \hat{a}_k^s .

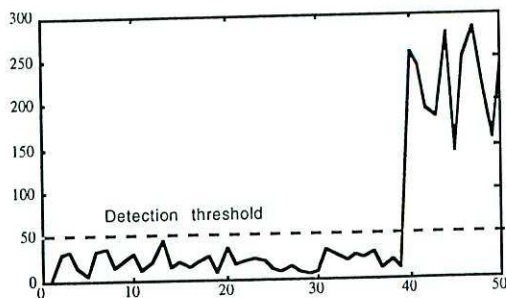


Figure 28. Variable du Chi2

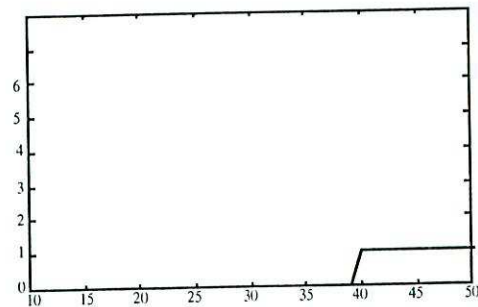


Figure 29. Courbe de localisation du défaut

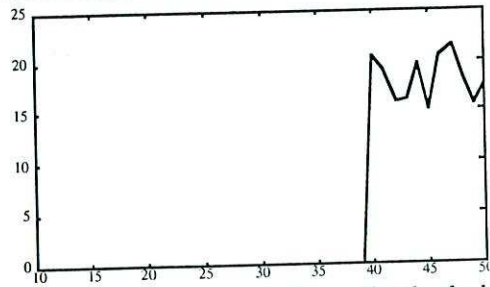


Figure 30. Estimation de l'amplitude du biais

IV.1.3. Conclusion

Dans cette première partie, nous avons étudié le problème du diagnostic des systèmes singuliers en cherchant à étendre les résultats bien connus du cas standard. Pour se faire, la principale difficulté à surmonter consiste en la définition de séquences d'innovation généralisées qui serviront alors de résidus porteur de l'information d'apparition du défaut.

IV.2. Approche par estimation simultanée de l'état et des paramètres

Les résultats obtenus dans le cas standard ont été étendus au cas où la matrice E est singulière. Nous exploitons dans ce cas toutes les techniques de décomposition propres à l'étude des systèmes singuliers.

IV.2.1. Développements théoriques

Soit un système singulier représenté par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} Ex_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (72)$$

où $x_k \in \mathfrak{R}^n$, $u_k \in \mathfrak{R}^r$ et $y_k \in \mathfrak{R}^p$ représentent classiquement les vecteurs d'état, des entrées et des sorties. E, A, B et C sont des matrices réelles inconnues de dimensions appropriées ; E est une matrice carrée singulière. Les séquences w_k et v_k sont supposées être des bruits blancs non corrélés de variances respectives W et V.

Sous l'hypothèse de régularité énoncée par Gantmacher (1959), il existe deux matrices non singulières Q et P telles que le système précédent est équivalent à la formulation suivante :

$$\begin{cases} \bar{x}_{1,k+1} = \bar{A}_1 \bar{x}_{1,k} + \bar{B}_1 u_k + \bar{w}_{1,k} \\ \bar{N} \bar{x}_{2,k+1} = \bar{x}_{2,k} + \bar{B}_2 u_k + \bar{w}_{2,k} \\ y_k = \bar{C}_1 \bar{x}_{1,k} + \bar{C}_2 \bar{x}_{2,k} + \bar{v}_k \end{cases} \quad (73)$$

où :

$$QEP = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & \bar{N} \end{pmatrix}, \quad QAP = \begin{pmatrix} \bar{A}_1 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}, \quad QB = \begin{pmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{pmatrix}, \quad CP = (\bar{C}_1 \quad \bar{C}_2), \quad \bar{x}_k = P \begin{pmatrix} \bar{x}_{1,k} \\ \bar{x}_{2,k} \end{pmatrix}$$

\bar{N} est une matrice nilpotente.

En supposant que ce système est observable, nous obtenons une extension de la forme canonique de Luenberger. En sélectionnant des lignes indépendantes T_1 et T_2 des matrices d'observabilité (\bar{A}_1, \bar{C}_1) et (\bar{N}, \bar{C}_2) comme bases de l'espace d'état, nous pouvons alors transformer le système de départ en une forme canonique de l'espace d'état :

$$\begin{cases} x_{1_{k+1}} = A_1 x_{1_k} + B_1 u_k + w_{1_k} \\ Nx_{2_{k+1}} = x_{2_k} + B_2 u_k + w_{2_k} \\ y_k = C_1 x_{1_k} + C_2 x_{2_k} + v_k \end{cases} \quad (74)$$

avec :

$$A_1 = T_1 \bar{A}_1 T_1^{-1}, \quad N = T_2 \bar{N} T_2^{-1}, \quad B_1 = T_1 \bar{B}_1, \quad B_2 = T_2 \bar{B}_2, \quad C_1 = \bar{C}_1 T_1^{-1}, \quad C_2 = \bar{C}_2 T_2^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} x_{1_k} \\ x_{2_k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & T_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x}_{1_k} \\ \bar{x}_{2_k} \end{pmatrix}$$

où : N , A_1 , C_1 et C_2 ont les formes canoniques suivantes :

$$A_1 = (A_{ij}), \quad N = (N_{ij}) \quad \text{avec } i, j = 1, \dots, p$$

et

$$A_{ii} = \begin{pmatrix} 0 & & I_{n_i-1} \\ a_{i\bar{i}_1} & \dots & a_{i\bar{i}_{n_i}} \end{pmatrix} A_{ij} = \begin{pmatrix} & 0 & \\ a_{ij_1} & \dots & a_{ij_{n_j}} \end{pmatrix} N_{ii} = \begin{pmatrix} 0 & & I_{m_i-1} \\ 1_{i\bar{i}_1} & \dots & 1_{i\bar{i}_{m_i}} \end{pmatrix}$$

$$N_{ij} = \begin{pmatrix} & 0 & \\ 1_{ij_1} & \dots & 1_{ij_{m_j}} \end{pmatrix}$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

où n_i et m_j , pour $i, j = 1, \dots, p$ sont les paramètres structuraux des sous systèmes (A_1, B_1, C_1) , (N, B_2, C_2) supposés connus pouvant être estimés à partir des

séquences d'entrée et de sortie (Boutayeb, Darouach 1992) avec $\sum_{k=1}^p n_k = n_A$, $\sum_{k=1}^p m_k = m_N$.
 $n_A + m_N$ est égal à l'ordre du système.

La forme canonique nous permet d'estimer simultanément l'état et les paramètres par un algorithme de type "Bootstrap" comme dans le cas des systèmes standard (Darouach, Boutayeb 1991).

IV.2.2. Estimation simultanée de l'état et des paramètres en mode normal

D'abord, nous rappellerons les équations du Filtre de Kalman Généralisé développé par Zasadzinski, Mehdi et Darouach (1991) :

$$x_{k+1/k+1} = P_{k+1/k+1} E^T (W + A P_{k/k} A^T)^{-1} (A x_{k/k} + B u_k) + P_{k+1/k+1} C^T V^{-1} y_{k+1} \quad (75)$$

où :

$P_{k/k}$ est la matrice de covariance de l'erreur d'estimation qui vaut :

$$P_{k/k} = E \left\{ (x_k - x_{k/k})(x_k - x_{k/k})^T \right\}$$

Elle satisfait l'équation de Riccati généralisée suivante :

$$P_{k+1/k+1} = \left(E^T (W + A P_{k/k} A^T)^{-1} E + C^T V^{-1} C \right)^{-1} \quad (76)$$

avec $P_{0/0} = P_0$ et $x_{0/0} = x_0$.

Nous pouvons alors écrire le système précédent sous forme d'innovation :

$$\begin{cases} E \hat{x}_{k+1/k+1} = A \hat{x}_{k/k} + B u_k + K_{k+1} e_{k+1} \\ y_k = C \hat{x}_{k/k} + e_k \end{cases} \quad (77)$$

où $K_{k+1} = E P_{k+1} C^T V^{-1}$ est la matrice de gain généralisée et e_k est la séquence d'innovation du filtre.

Les matrices E, A, B et C étant sous forme canonique, la ième sortie du système s'écrit de la façon suivante :

$$y_{i(k+n_i)} = \hat{x}_{1_{i(k+n_i)}} + \hat{x}_{2_{i(k+n_i)}} + e_{i(k+n_i)} \quad (78)$$

Nous avons :

$$y_{i(k+n_i)} = \Phi_{i_k}^T \theta_{i_k} + \varepsilon_{i(k+n_i+n_i)} \quad (79)$$

où $\Phi_{i_k}^T$ est le vecteur de régression et θ_{i_k} est le vecteur des paramètres :

$$\Phi_{i_k}^T = \left(\hat{x}_{1_k}^T, u_{k+n_i-1}^T, \dots, u_k^T, \hat{x}_{2_{k+n_i+m_i}}^T, -u_{k+n_i}^T, \dots, -u_{k+n_i+m_i-1}^T \right) \quad (80)$$

$$\theta_{i_k} = \left(A_i, b_{i_1}^1, \dots, b_{i_{n_i}}^1, N_i, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_{m_i}}^2 \right)^T \quad (81)$$

et

$$\varepsilon_{i_{(k+n_i+m_i)}} = (1 + k_{2_{i1}}) e_{i_{(k+n_i)}} + \dots + k_{2_{i_{m_i}}} e_{i_{(k+n_i+m_i-1)}} + k_{1_{i1}} e_{i_{(k+n_i-1)}} + \dots + k_{1_{i_{n_i}}} e_{i_k} \quad (82)$$

où $A_i = \left(a_{i_{11}} \dots a_{i_{1n_i}} \dots a_{i_{n_i 1}} \dots a_{i_{n_i n_i}} \right)$ est la i ème ligne de la sous matrice (A_{ij}) de A_1 , ($j=1, \dots, p$),
 $N_i = \left(l_{i_{11}} \dots l_{i_{1m_i}} \dots l_{i_{m_i 1}} \dots l_{i_{m_i m_i}} \right)$ est la i ème ligne des sous matrices (N_{ij}) de N , ($j=1, \dots, p$), $b_{1_{ij}}$,
 $b_{2_{ij}}$, $k_{1_{ij}}$ et $k_{2_{ij}}$ sont respectivement les j ème lignes des sous matrices B_{1i} et B_{2i} de B_1 et B_2
 (nous retrouvons la même chose pour K).

Nous remarquons que $\Phi_{i_k}^T$ n'est pas corrélé avec l'erreur résiduelle $\varepsilon_{i_{(k+n_i+m_i)}}$ et
 $E \left\{ \varepsilon_{i_{(k+n_i+m_i)}} \right\} = 0$. Une estimation non biaisée du vecteur des paramètres θ_{i_k} peut être obtenue
 en utilisant un algorithme des moindres carrés pondérés. Nous estimons indépendamment les
 paramètres de chacun des sous systèmes.

Étape 1. Estimation des paramètres

Les paramètres peuvent être estimés en exploitant l'algorithme suivant :

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{i_{k+1}} = \hat{\theta}_{i_k} + M_{i_{k+1}} \Phi_{i_k} \left(y_{i_{k+n_i}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k} \right) \\ M_{i_{k+1}} = \left(\lambda_i M_{i_k}^{-1} + \Phi_{i_k} \Phi_{i_k}^T \right)^{-1} \\ \hat{\theta}_{i_0} = \theta_{i_0} \end{cases} \quad \text{pour } i = 1, \dots, p \quad (83)$$

où λ_i est un facteur d'oubli satisfaisant la condition $0 < \lambda_i < 1$, M_{i_0} et θ_{i_0} étant respectivement
 une matrice de pondération définie positive et une estimation initiale donnée.

Étape 2. Estimation de l'état

L'estimation des coefficients des matrices du système \hat{N} , \hat{A} et \hat{B} peut directement être
 obtenue à partir du vecteur $\hat{\theta}_i$ pour $i=1, \dots, p$. Ces matrices sont alors utilisées pour estimer
 l'état du système à l'aide du filtre de Kalman généralisé. Ces deux phases sont alors liées par
 l'algorithme "Bootstrap".

IV.2.3. Estimation simultanée de l'état et des paramètres en présence de défaut

L'innovation donnée par $e_{i_{(k+g_i)}} = y_{i_{(k+g_i)}} - \Phi_{i_k}^T \hat{\theta}_{i_k}$ montre un comportement différent de
 celui correspondant au cas sans défaut. Dès qu'un défaut est détecté, nous considérons le
 système dans un mode dit de défaut et nous prenons en compte cette modification en
 introduisant un terme représentatif du biais b_k . Nous le réécrivons sous le système suivant :

$$\begin{cases} Ex_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ b_{k+1} = b_k \\ y_k = Cx_k + Hb_k + v_k \end{cases} \quad (84)$$

Toute la procédure correspond alors à ce qui se passe dans le cas standard. Pour illustrer cette méthode, nous présentons l'exemple numérique suivant.

Exemple numérique

Soit le système singulier du 7ème ordre comportant deux entrées et deux sorties suivant :

$$\begin{cases} x_{1_{k+1}} = A_1 x_{1_k} + B_1 u_k + w_{1_k} \\ Nx_{2_{k+1}} = x_{2_k} + B_2 u_k + w_{2_k} \\ y_k = C_1 x_{1_k} + C_2 x_{2_k} + v_k \end{cases}$$

où :

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0.3 & 0.2 & 0.4 \\ -0.25 & 0.1 & 0.5 \end{pmatrix}, \quad N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1.4849 & 0.0064 & -0.6237 & -0.8455 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.9376 & -1.2905 & 0.3938 & -0.0064 \end{pmatrix}$$

$$C = (C_1 \quad C_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B^T = \begin{pmatrix} -0.1 & 0.7 & 0.5 & 0.3530 & -0.0240 & 0.2635 & -0.6655 \\ -0.2 & 0 & 0.56 & -0.2007 & -0.1266 & -0.3818 & 0.5040 \end{pmatrix}$$

$$E\{w_k\} = E\{v_k\} = 0$$

$$p = n_1 = m_1 = m_2 = 2, n_2 = 1$$

Les vecteurs d'entrée sont des séquences de bruit blanc de moyenne nulle et de variance unité. Les estimations initiales des paramètres et de l'état sont égales à zéro. L'écart-type des séquences w_k et v_k est pris égal à 0.01I. $P(0)$ et $M(0)$ valent $800I$, où I représente la matrice identité de dimension appropriée.

Le biais est superposé au signal issu du capteur numéro 1 à partir de l'instant d'échantillonnage 500 avec une amplitude égale à 1. Par une statistique de décision, on détecte le défaut sur le capteur 1 et on choisit la matrice H telle que :

$$H = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

On montre l'estimation du biais et la sortie du capteur 1 corrigée. Les estimations des paramètres et de l'état sont alors obtenues et nous avons les taux de convergence des erreurs d'estimation. Les estimations finales sont données dans les tableaux joints.

$$X_{\text{norm}_k} = \| \text{valeur vraie}_k - \text{estimation}_k \|^2$$

$$\Theta_{\text{norm}_k} = \| \text{valeur vraie}_k - \text{estimation}_k \|^2 / \| \text{valeur vraie}_k \|^2$$

Paramètres	a_{111}	a_{112}	a_{121}	a_{211}	a_{212}	a_{221}
Valeurs vraies	-.3	.2	.4	-.25	.1	.5
Valeurs estimées	-.300	.204	.397	-.245	.113	.485

Paramètres	l_{111}	l_{112}	l_{121}	l_{122}	l_{211}	l_{212}	l_{221}	l_{222}
Valeurs vraies	-1.4849	.0064	-.6237	-.8237	.8376	-1.2905	.3938	-.0064
Valeurs estimées	-.515	-.006	-.161	.147	.959	-.974	.336	-.007

Paramètres	b_{111}	b_{121}	b_{131}	b_{141}	b_{151}	b_{161}	b_{171}
Valeurs vraies	-.1	.7	.5	.3530	-.0240	.2635	-.6655
Valeurs estimées	-.098	.702	.499	.348	-.0264	.252	-.642

Paramètres	b_{212}	b_{222}	b_{232}	b_{242}	b_{252}	b_{262}	b_{272}
Valeurs vraies	-.2	0	.56	-.2007	-.1266	-.3818	.5040
Valeurs estimées	-.202	.001	.561	-.203	-.130	-.392	.527

Table 1 : Estimations finales après 5000 échantillons

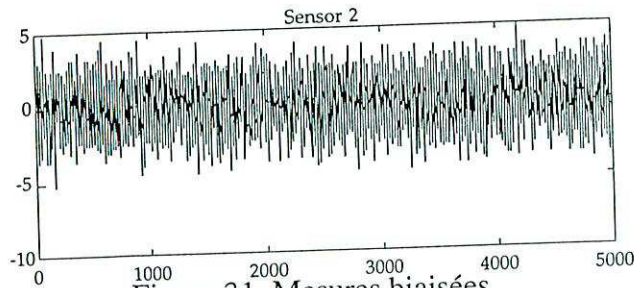
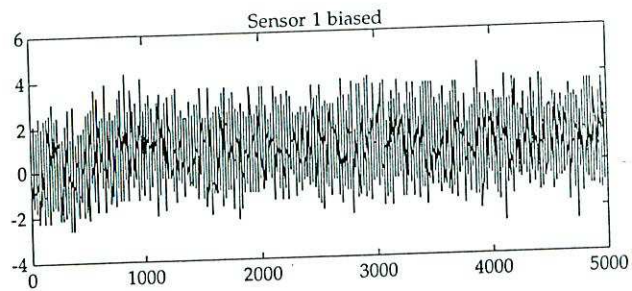


Figure 31. Mesures biaisées

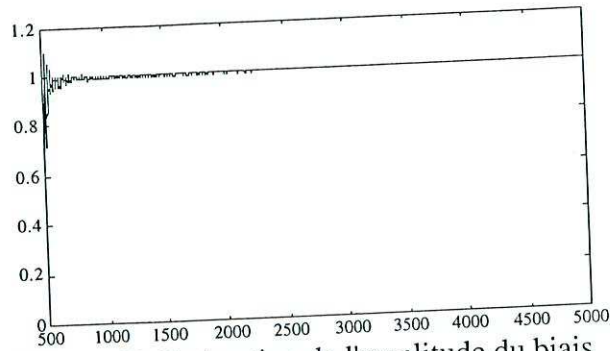


Figure 32. Estimation de l'amplitude du biais

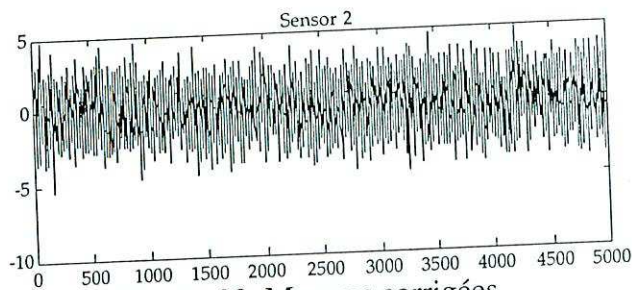
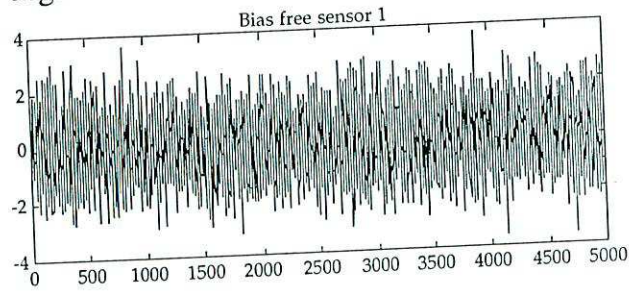


Figure 33. Mesures corrigées

IV.3. Conclusion

Cette approche, comme dans le cas standard, permet l'estimation simultanée de l'état, des paramètres et du défaut. Ces résultats sont intéressants par l'approche théorique qu'ils demandent mais seraient difficilement exploitables pour des applications sur des systèmes physiques.

IV.4. Exploitation des techniques des systèmes singuliers pour le diagnostic

Les propriétés des systèmes singuliers et leur structure offrent des possibilités intéressantes pour le diagnostic et l'estimation de grandeurs indésirables survenant sur le système. Ces résultats intéressants ont été les conséquences de travaux récents dans le domaine de l'estimation de l'état des systèmes singuliers (Boutayeb 1992, Bassong Onana et al 1993). Cette approche part des considérations suivantes : soit un système linéaire dynamique standard affecté par des entrées inconnues pouvant représenter des défauts décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + F\alpha_k + w_k \\ y_k = Cx_k + G\beta_k + v_k \end{cases} \quad (85)$$

où $x_k \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$, $u_k \in \mathfrak{R}^{r \times 1}$ et $y_k \in \mathfrak{R}^{p \times 1}$ représentent respectivement l'état, le vecteur des entrées connues et le vecteur des mesures tandis que les deux vecteurs $\alpha_k \in \mathfrak{R}^{d \times 1}$ et $\beta_k \in \mathfrak{R}^{p \times 1}$ sont les deux vecteurs d'entrées inconnues ; les matrices A, B, F, G et C sont de dimensions appropriées.

L'astuce consiste à réécrire le système de départ sous une forme singulière donnée par les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} E\bar{x}_{k+1} = \bar{A}\bar{x}_k + Bu_k + w_k \\ y_k = \bar{C}\bar{x}_k + v_k \end{cases} \quad (86)$$

où les nouvelles grandeurs utilisées ont les formes suivantes :

$$\bar{A} = [A \quad 0 \quad 0], \quad E = [I_n \quad 0 \quad -F], \quad \bar{C} = [H \quad G \quad 0]$$

et l'état augmenté comportant l'état non biaisé et les deux vecteurs des

$$\text{défauts } \bar{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \beta_k \\ \alpha_{k-1} \end{bmatrix}$$

Nous pouvons prouver l'existence d'une solution pour l'estimation de l'état augmenté si la condition donnée par le théorème suivant est vérifiée.

Théorème 5. La résolution du problème de l'estimation simultanée des différentes

composantes de l'état augmenté $\bar{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \beta_k \\ \alpha_{k-1} \end{bmatrix}$ est possible lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$\text{rang}([G \quad HF]) = d + p \quad (87)$$

(pour le lecteur intéressé, la démonstration de ce théorème est donnée par Bassong Onana et al 1993)

Cette condition vérifiée, il nous sera toujours possible de procéder à la transformation d'un système standard soumis à des défauts en une forme singulière qui nous permettra de réaliser l'estimation simultanée de l'état et de ces défauts. Ceci peut alors constituer la base d'une procédure de correction de l'influence des défauts sur un système.

Nous appliquons cette méthode au système constitué par un pendule inverse. Ce système étant non linéaire, nous écrivons les équations du pendule sous la forme suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1} = g(x_k) + w_k \\ y_k = Cx_k + v_k \end{cases} \quad (88)$$

Nous réécrivons ce système sous forme singulière afin de permettre l'estimation simultanée de l'état non biaisé et des défauts. Nous avons alors :

$$Ex_{k+1} = \bar{A}x_k \quad (89)$$

où la matrice \bar{A} est obtenue à partir de la fonction non linéaire : $g(x_k)$.

Nous avons besoin d'introduire la matrice jacobienne Γ construite à partir de la fonction $g(x_k)$. La matrice Γ prendra la place de la matrice A dans toutes les expressions permettant l'estimation de l'état du système. L'estimateur est donné par :

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= P_{k+1}E^T(W + \Gamma P_k \Gamma^T)^{-1} \Gamma \hat{x}_k + P_{k+1} \bar{C}^T V^{-1} y_{k+1} \\ P_{k+1} &= \left(E^T (W + \Gamma P_k \Gamma^T)^{-1} E + \bar{C}^T V^{-1} \bar{C} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (90)$$

où les matrices V et W correspondent aux hypothèses classiques concernant les propriétés des différents bruits.

La simulation du pendule inverse a été réalisée avec les valeurs réelles des paramètres. Après discrétisation avec une période d'échantillonnage de $T = 0.03$ secondes et le calcul de la matrice jacobienne en utilisant le logiciel MAPLE V, nous appliquons la procédure décrite. La figure suivante représente les trois mesures faites sur le système lorsqu'aucun défaut n'est présent sur le système.

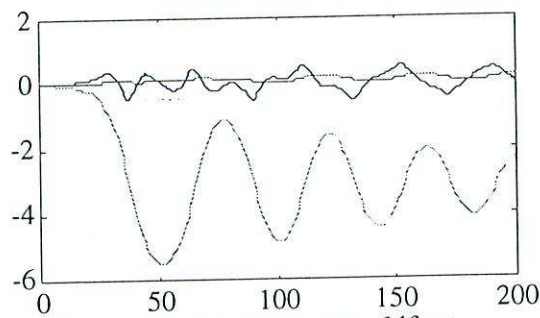


Figure 34. Mesures sans défaut

Nous ne nous intéresserons qu'au cas où les défauts apparaissent sur les capteurs ; en effet, un défaut d'actionneur serait fatal au pendule. Nous introduisons un biais constant sur le capteur de position, nous voyons sur la figure suivante les conséquences sur les mesures :

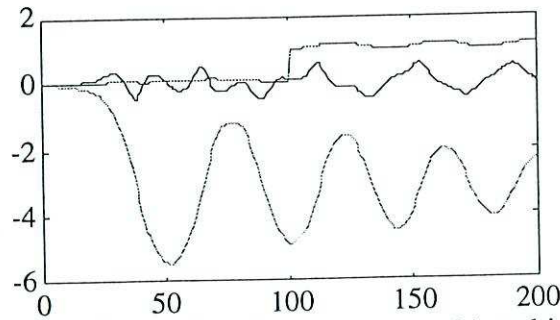


Figure 35. Mesures biaisées : le capteur n°1 est biaisé

Nous appliquons le Filtre de Kalman Généralisé afin d'estimer l'état non biaisé et l'amplitude du défaut. Nous introduisons pour cela une représentation singulière donnée par :

$$\bar{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ b_k \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} C & G \end{bmatrix}$$

où b_k est le vecteur de biais et la matrice G est choisie en fonction du nombre de composantes de la séquence d'innovation du filtre qui seront en défaut. Nous pouvons alors estimer l'amplitude du biais.

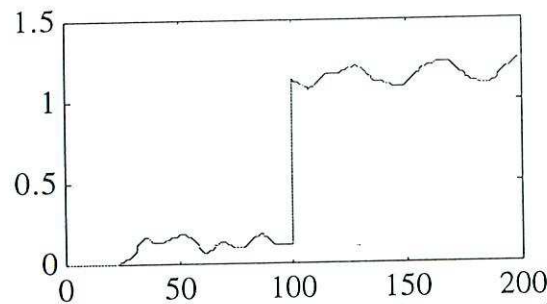


Figure 36. Estimation du biais sur le capteur n°1

Ce biais détecté et estimé, nous pouvons l'éliminer du fonctionnement du système ce qui nous permet de visualiser les mesures corrigées.

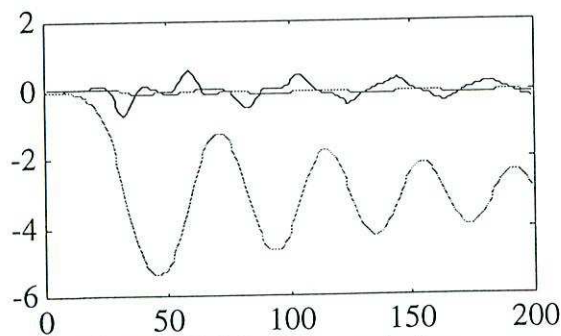


Figure 37. Mesures corrigées

IV.5. Conclusion

L'exploitation des systèmes singuliers et des algorithmes d'estimation correspondants pour la résolution de problèmes d'estimation simultanée de l'état non biaisé et des défauts constitue une approche élégante, astucieuse et performante. Nous bénéficions ainsi, par des transformations simples, d'une représentation claire où sont bien mis en évidence les différents éléments à estimer.

ÉTUDE DES SYSTÈMES BILINÉAIRES

V. ÉTUDE DES SYSTÈMES BILINÉAIRES

Dans notre démarche d'étude des systèmes complexes, nous avons cherché, dans un premier temps, à élaborer des techniques de diagnostic pour les systèmes décrits par des équations d'état bilinéaires. Ces systèmes appartiennent à une classe importante de systèmes physiques ; un exemple simple et couramment rencontré concerne la description des systèmes dits "à compartiments" constitués en réseaux de flux de matière caractérisés par des débits et des concentrations ; agir sur ces deux grandeurs nous impose de travailler avec une description bilinéaire. J'invite les lecteurs intéressés à se reporter aux travaux de Mechmeche, (1995).

Dans ce document, nous nous intéresserons principalement aux résultats que nous avons obtenus dans le cadre de la synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes bilinéaires avec application dans le diagnostic. Nous avons synthétisé les observateurs correspondant à différents cas de bilinéarités et nous avons étendu des procédures de détection et de localisation de défauts bien connues pour les systèmes standard aux systèmes bilinéaires.

V.1. Position du problème

Dans cette partie, nous étudierons les systèmes bilinéaires décrits par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^r N_i u_i(t) x(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (91)$$

où le vecteur de commande s'écrit :

$$u(t) = [u_1(t) \quad \dots \quad u_r(t)]$$

À partir de cette formulation, nous pouvons écrire un générateur de résidus qui sera décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \hat{A}z(t) + Ly(t) + Ju(t) + \sum_{i=1}^r \hat{B}_i u_i(t) y(t) + \sum_{i=1}^r \hat{N}_i u_i(t) z(t) \\ r(t) = R_1 z(t) + R_2 y(t) \end{cases} \quad (92)$$

où $z(t) \in \mathcal{R}^j$ ($j \leq n$) est le vecteur d'état de l'observateur et $r(t)$ le résidu généré. Les matrices sont de dimensions appropriées. Ce résidu doit être sensible aux défauts $f(t)$ tout en étant insensible aux entrées inconnues $d(t)$ ceci pour un système décrit de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^r N_i u_i(t) x(t) + Fd(t) + Df(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (93)$$

les matrices F et D étant supposées de rang plein colonne, la matrice C étant de rang plein ligne. Nous pouvons rappeler une définition essentielle que doit satisfaire un générateur de résidus.

Définition 1. Le système décrit par les équations (94) est un générateur de résidus pour le système (95) si et seulement si pour tout $u(t)$ et $d(t)$, nous avons :

i) pour tout x_0 , $u(t)$ et z_0 :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0 \text{ si } f(t) = 0, \forall t > 0$$

ii) il existe une matrice $T \in \mathfrak{R}^{j \times n}$ telle que, pour tout $u(t)$, $z_0 = Tx_0$ et $f(t) = 0$, nous avons :

$$z = Tx, \forall t > 0$$

iii) pour tout $z_0 = Tx_0$, $u(t)$ et $f(t) \neq 0$, nous avons :

$$r(t) \neq 0$$

À partir de ceci, nous allons prendre en compte les défauts sur les capteurs. Pour cela, nous réécrivons le système (95) sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=1}^r N_i u_i(t)x(t) + F_1 d(t) + D_1 f(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_2 d(t) + D_2 f(t) \end{cases} \quad (94)$$

Sans perte de généralité, nous supposons que $\text{rang}[C \begin{bmatrix} F_2 & D_2 \end{bmatrix}] = p$ et $\text{rang} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} = k$. Le problème sera de décomposer la mesure $y(t)$ en trois parties $y_{11}(t)$, $y_{12}(t)$ et $y_2(t)$ telles que :

$y_{11}(t)$ soit une fonction de l'état $x(t)$ et de l'entrée inconnue $d(t)$,

$y_{12}(t)$ une fonction de l'état $x(t)$, de l'entrée inconnue $d(t)$ et du défaut $f(t)$,

$y_2(t)$ uniquement fonction de $x(t)$.

Dans ce document, nous ne donnerons pas les détails de la décomposition (le lecteur intéressé pourra se reporter à Mechmeche 1995). Nous allons nous intéresser aux différents cas de générateurs de résidus. Suivant les valeurs prises par les matrices \hat{N}_i , nous aurons les deux cas suivants :

- les résidus exponentiels uniformes correspondant à $\hat{N}_i = 0$

- les résidus exponentiels non uniformes correspondant à $\hat{N}_i \neq 0$

Examinons le premiers cas.

V.2. Générateur de résidus exponentiels uniformes

Les conditions nécessaires et suffisantes d'existence d'un tel générateur sont données par le théorème suivant. Nous verrons que dans ce cas, nous nous ramenons à la synthèse

$$\hat{N}_i = 0 \quad (95.a)$$

$$\hat{N}_i T - T \hat{N}_i + \hat{B}_i C = 0 \quad (95.b)$$

$$\hat{A} T - T \hat{A} + L C = 0 \quad (95.c)$$

$$J = T B \quad (95.d)$$

$$T F = 0 \quad (95.e)$$

$$R_1 T + R_2 C = 0 \quad (95.f)$$

$$\hat{A} \text{ est une matrice stable} \quad (95.g)$$

$$\text{rang} \begin{bmatrix} sI_n - \hat{A} & TD \\ R_1 & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rang}(D) \quad (97.h)$$

$$\text{rang} \begin{bmatrix} sI_n - \hat{A} \\ R_1 \end{bmatrix} = n \text{ et } \text{rang} \begin{bmatrix} sI_n - \hat{A} & TD \end{bmatrix} = n$$

Les résultats exposés dans Mechmeche 1995 montre qu'ici la synthèse d'un générateur de résidus pour le cas bilinéaire à entrées inconnues correspond au cas linéaire à entrées inconnues. Nous considérons le système linéaire décrit par les équations suivantes et nous proposerons un algorithme de génération de résidus.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \varphi d_a(t) + Df(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (96)$$

avec $\varphi = [F \quad N_a \text{Ker}(C_a)]$

$$d_a(t) = \begin{bmatrix} d(t) \\ d_b(t) \end{bmatrix}$$

$$N_a = [N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_r], \quad C = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}, \quad \hat{B}_a = [\hat{B}_1 \quad \dots \quad \hat{B}_r]$$

Nous pouvons donner l'algorithme qui permet le calcul des différentes matrices composant les équations du générateur de résidus.

DébutCalculer $\varphi = \begin{bmatrix} F & N_a(I_{n \times m} - C_a^+ C_a) \end{bmatrix}$ Déterminer la matrice $\bar{\varphi}$ telle que $\varphi\Pi = [\bar{\varphi} \ 0]$ **Si** $\text{rang}(C\bar{\varphi}) = \text{rang}(\bar{\varphi})$ **Alors****Si** $\text{rang} \begin{bmatrix} sI_n - A & \bar{\varphi} \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rang}(\bar{\varphi})$ **Alors**Calculer $(C\bar{\varphi})^+ = [(C\bar{\varphi})^T (C\bar{\varphi})^{-1}] (C\bar{\varphi})^T$ Choisir $W \in \mathfrak{R}^{l \times p}$ telle que (WC) soit de rang plein colonneCalculer les matrices $R_1 = -WC$, $R_2 = W[I_p - C\bar{\varphi}(C\bar{\varphi})^+]$ $T = I_n - \bar{\varphi}(C\bar{\varphi})^+ C$, $\hat{B}_i = TNC^+$ **Si** $\text{rang}(TD) = \text{rang}(D)$ **Alors**Calculer la matrice de gain K telle que la matrice $(TA - KC)$ soit stableCalculer les matrices $\hat{A} = TA - KC$ et $L = K + \hat{A}\bar{\varphi}(C\bar{\varphi})^+$ **Fin Alors****Sinon**

pas de générateur de résidus

Fin Sinon**Fin Si****Fin Alors****Sinon**

Pas de générateur de résidus

Fin Sinon**Fin Alors****Fin Si****Fin**

Nous étudierons maintenant le cas exponentiel non uniforme.

V.3. Générateurs de résidus exponentiels non uniformes

Dans ce cas, nous proposons un algorithme de génération de résidus lorsque l'erreur de reconstruction est bilinéaire :

$$\dot{e}(t) = \left(\hat{A} + \sum_{i=1}^r \hat{N}_i u_i(t) \right) e(t) \quad (97)$$

La stabilité de l'erreur sera liée à la connaissance des bornes des entrées mesurées. Ce générateur de résidus ne sera donc plus uniforme. Nous pouvons donner la définition suivante.

Définition 2. Le système (94) est un générateur de résidus exponentiels non uniformes d'un système bilinéaire si et seulement si les conditions données dans la **Définition 1** sont vérifiées et si les entrées $u(t)$ sont telles que :

$$\det(\Phi_u(t, t_0)) \neq 0, \forall t > 0$$

$$\text{avec } \Phi_u(t, t_0) = \exp \int_{t_0}^t \left[\hat{A} + \sum_{i=1}^r \hat{N}_i u_i(\tau) \right] d\tau$$

Les conditions d'existence vérifiées, un générateur de résidus exponentiels non uniformes pourra être construit à partir des étapes de l'algorithme suivant :

Début**Si** $\text{rang}(C_2 F_{12}) = \text{rang}(F_{12})$ **Alors**Calculer la matrice $(CF)^+ = [(CF)^T(CF)^{-1}](CF)^T$ Choisir $W \in \mathcal{R}^{r \times p}$ telle que (WC) soit de rang pleinCalculer les matrices $R_1 = -WC$, $R_2 = W[I_p - C\bar{\varphi}(C\bar{\varphi})^+]$, $T = I_n - \bar{\varphi}(C\bar{\varphi})^+ C$ Calculer les gains $K_i = SN_i C_2^+$ qui minimisent $\left\| \sum_{i=1}^r U_i \hat{N}_i^T \hat{N}_i \right\|$ Calculer $\hat{N}_i = SN_i - K_i C_2$ et $\hat{B}_{2i} = K_i + \hat{N}_i E_2$ **Si** $\text{rang} \begin{bmatrix} sI_n - A & F \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rang}(F)$ **Alors**Choisir les paramètres θ et ψ Résoudre l'équation de Riccati suivante en posant $\xi = \psi + \gamma$:

$$Q(SA_1)^T + SA_1 Q - QC_2^T R^{-1} C_2 Q + \xi I_n = 0$$

Calculer la matrice K et la matrice \hat{A}_1 Calculer la matrice L_2 **Fin Alors****Sinon**Choisir les paramètres α_i et calculer \tilde{U}_i **Si** $\text{rang} \begin{bmatrix} sI_n - A & F \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rang}(F)$ **Alors**Remplacer U_i par \tilde{U}_i dans le calcul

$$\gamma = 2 \left\| \sum_{i=1}^r U_i \hat{N}_i^T \hat{N}_i \right\|$$

Calculer $\tilde{A} = A + \sum_{i=1}^r \alpha_i N_i$ Choisir les paramètres θ et ψ

Résoudre l'équation de Riccati

Calculer la matrice K_0 , A_0 , \hat{A}_1 , L_2 **Fin Alors****Sinon**

Refaire le décalage des pôles

Fin Sinon**Fin Si****Fin Sinon****Fin Alors****Fin Si****Fin**

À partir de ces résultats, nous avons procédé à la localisation des défauts susceptibles d'agir sur le système surveillé. Pour cela, nous avons exploité l'approche classique de la "Banque d'Observateurs" qui dans les cas numériques traités, a permis de localiser tous les défauts simulés sur le système.

Nous nous sommes principalement intéressés à l'extension des travaux de Beard, 1971, Jones 1973 et White et Speyer 1987 sur le filtre de détection aux systèmes bilinéaires. Nous exploiterons les résultats obtenus dans le cas exponentiel uniforme.

V.3. Filtre de détection appliqué aux systèmes bilinéaires

L'objectif de ce filtre détecteur est de maintenir le vecteur des résidus $r(t)$ lorsqu'un défaut $f_i(t)$ apparaît, dans une direction fixe de l'espace des sorties, ceci grâce à un calcul spécifique du gain K de l'observateur. Pour cela, nous sélectionnerons les vecteurs propres de la matrice $\bar{A} - KC$ afin que l'espace généré par chaque défaut $f_i(t)$ ait pour base une combinaison linéaire de vecteurs propres ceci correspondant à un espace invariant. Ces espaces invariants doivent être, au travers de l'application représentée par la matrice des mesures C , des espaces image disjoints.

V.4. Conclusion

Les travaux entrepris dans le cadre des systèmes bilinéaires nous ont permis de synthétiser les notions d'observateurs à entrées inconnues. C'est donc tout naturellement que nous nous sommes orientés vers l'exploitation de ces résultats dans le cadre du diagnostic ; dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'extension des approches classiques de banques d'observateurs, puis nous avons adapté la notion de filtre de détection aux systèmes bilinéaires.

CONCLUSION

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La plupart des systèmes automatisés ne sont pas des systèmes représentés par des équations d'état standard comportant des entrées parfaitement connues, avec des bruits de caractéristiques statistiques complètement déterminées ; ils sont mal déterminés, sujets à des variations aléatoires plus ou moins importantes survenant à des instants inconnus et doivent respecter des contraintes liées aux caractéristiques physiques de certaines de leurs composantes. Tout ceci demande, si nous cherchons à produire un diagnostic performant, d'étudier et de nous intéresser à des représentations plus complexes et plus proches de la réalité. Dans ce document, nous avons donc abordé les cas :

- des systèmes à paramètres et états inconnus, standard et singuliers, avec définition d'un algorithme de détection, localisation et correction des défauts ; par exploitation d'un algorithme de type "Bootstrap" appliqué aux systèmes standard et singuliers, nous avons défini une procédure permettant l'estimation simultanée de l'état, des paramètres et du biais survenant sur les capteurs. Ce biais détecté et son amplitude estimée, nous avons proposé une procédure de correction dans le but de conserver des performances acceptables. Pour valider cette approche, nous l'avons appliquée dans le cadre d'études comparatives réalisées entre le CRAN et des équipes de Mulhouse et de Duisbourg, sur un pendule inverse.
- des systèmes singuliers et les performances obtenues par les techniques de séquences d'innovation généralisées ; ces systèmes par leur formalisme général et leur vaste champ d'application n'ont pas fait l'objet de beaucoup de travaux dans le domaine du diagnostic. La génération de résidus demande des techniques plus sophistiquées, la séquence d'innovation n'étant pas disponible directement. Nous avons donc développé un algorithme permettant de générer cette séquence de manière à réaliser la détection et la localisation des défauts survenant sur les capteurs du système. Le formalisme des systèmes singuliers nous a également permis de résoudre des problèmes d'estimation simultanée de l'état d'un système et de ses entrées inconnues.
- des systèmes bilinéaires, non linéaires et des systèmes à paramètres stochastiques ; l'étude des systèmes non linéaires a été motivée par les travaux effectués sur le pendule inverse. En exploitant le formalisme des systèmes singuliers, nous avons mis au point une procédure qui a permis, en simulation, d'estimer simultanément l'état du pendule et le défaut survenant sur l'un des capteurs. Une autre classe de systèmes qui n'a pas fait l'objet d'un développement dans ce document sont les systèmes bilinéaires pour lesquels nous avons synthétisé des observateurs bilinéaires à entrées inconnues, observateurs utilisés dans le cadre du diagnostic. Nous avons également amorcé une étude des systèmes à paramètres stochastiques afin de tenter de prendre en compte l'influence de perturbations de type aléatoires dans une procédure de diagnostic.

Les perspectives offertes par ces travaux se placent dans le cadre de la mise en place de procédures de diagnostic robustes intégrant la phase de reconfiguration des lois de commande. Par reconfiguration de loi de commande, nous entendons toutes approches qui permettront de recalculer les paramètres d'un correcteur lorsqu'un défaut survient sur le système. Ces paramètres sont alors tels que les performances du système sont maintenues dans un domaine de fonctionnement défini comme acceptable. Une approche complémentaire peut, si la correction n'est pas ou n'est plus suffisante, consister en la redistribution des tâches sur les organes encore valides du système ; le but est alors de réorganiser l'algorithme de commande en fonction des organes disponibles afin de permettre au système d'accomplir sa mission.

Une classe de systèmes complexes rencontrée couramment dans l'industrie est la classe des systèmes hybrides. Ils intègrent à la fois l'aspect continu des systèmes décrits par des équations différentielles que nous venons d'aborder, mais également l'aspect discret des systèmes à événements discrets décrits à l'aide, par exemple, de Réseaux de Pétri. La mise en correspondance de ces deux descriptions nécessitera le développement de nouvelles techniques de diagnostic.

Voilà, ce document se termine, l'horizon des recherches dans le domaine du diagnostic est toujours grand ouvert, il fédère toutes sortes de techniques, d'approches, de moyens mathématiques, saurons-nous trouver une voie privilégiée ? Saurons-nous développer de nouvelles technologies, de nouveaux outils qui permettront de répondre à toutes ces questions ?

BIBLIOGRAPHIE

Dans cette bibliographie, nous organiserons les différentes références afin de mettre en évidence les axes importants de ce document.

Comme l'introduction de ce document est principalement consacrée à des rappels historiques, la première catégorie d'ouvrages cités sont ceux que nous appellerons *Historiques* :

- Aplevitch J.D., 1979, Time-domain input-output representation of linear systems, *Automatica*, Vol.17, n°3, pp. 509-522
- Black H.S., 1934, Stabilized feedback amplifiers, *Bell Syst. Tech. J.*
- Bode H.W., 1940, Feedback amplifier design, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol.19, pp. 42
- Campbell S.L., 1980, Singular systems of differential equations, San Francisco, Pitman
- Francis B.A., 1987, A course in H^∞ control, LNCIS, Vol.88, Springer, Berlin
- Friedland B., 1986, Control system design : an introduction to state space method, New York, McGraw Hill
- Gantmacher F.R., 1959, Theory of Matrices, Vol. 1 et 2, Dunod
- Himmelblau D.M., 1978, Fault detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes, Elsevier Press, Amsterdam
- Kailath T., 1980, Linear systems, Prentice-Hall
- Kalman R.E., 1960, Contributions to the theory of optimal control, *Bol. Soc. Mat. Mexicana*, Vol.5, pp 102-119
- Kalman R.E., 1960, A new approach to linear filtering and prediction problems, *ASME, J. Basic Eng.*, Vol.82, pp. 34-45
- Kalman R.E., Bucy R.S., 1961, New results in linear filtering and prediction theory, *ASME, J. Basec Eng.*, Vol.80, pp. 193-196
- Kronecker L., 1890, Algebraische reduction der schaaren bilinear formen, *S.-B. Akad, Berlin*, pp. 763-776
- Luenberger D.G., Arkel A., 1977, Singular dynamic Leontief systems, *Econometrica*
- Lyapunov M.A., Problème général de la stabilité du mouvement, Éditions Jacques Gabay (1988)
- Maxwell J.C., 1868, On governors, *Proc. Royal Soc. London*, Vol.16, pp. 270-283
- Nyquist H., 1932, Regeneration theory, *Bell Syst. Tech. J.*
- Rosenbrock H.H., 1970, State space and multivariable theory, London, Nelson

Rosenbrock H.H., 1974, Computer-aided control system design, New York ; Academic Press

Routh E.J., 1877, A treatise on the stability of a given state of motion, London, Mac Millan & Co

Schweppe F.C., 1973, Uncertain dynamic systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Vyshnegradsky I.A., 1877, On controllers of direct action, Izv. SPB Tekhnolog. Ing.

Weierstrass K., 1867, Zur theorie der bilinearen und quadratischen former, Monatsh. Akad. Berlin, pp. 310-338

Afin de respecter le plan de ce document, nous donnerons les articles et ouvrages ayant un caractère fondateur ou synthétique dans le domaine du diagnostic :

Basseville M. et Benveniste A. (Eds), 1986, *Detection of abrupt changes in signals and dynamic systems*, LNCIS N°77, Springer, Berlin

Basseville M., 1988, Detecting changes in signals and systems - A survey, *Automatica* 24, (3), 309-326

Brunet J., Jaume D., Labarrère M., Rault A., Vergé M., 1990, Détection et diagnostic de pannes ; approche par modélisation, Éditions Hermès

Chow E.Y., Willsky A.S., 1984, Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems, *I.E.E.E. Trans. Auto. Control.* AC-29, 603-614

Clark R.N., 1989, State estimation schemes for instrument fault detection, Chapitre 2 de Patton, Frank et Clark (Eds) ; *Fault diagnosis in Dynamic systems : Theory and applications*, Prentice Hall

Deckert J.C., Desai M.N., Deyst J.J., Willsky A.S., 1977, F8 DFBW sensor failure identification using analytical redundancy, *I.E.E.E. Trans. Auto. Control.* AC-22, n°5, pp. 795-803

Frank P.M., Wünnenberg J., 1989, Robust fault diagnosis using unknown input observer schemes, Chapitre 3 de Patton, Frank et Clark (Eds) ; *Fault diagnosis in Dynamic systems : Theory and applications*, Prentice Hall

Frank P.M., 1990, Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - A survey, *Automatica*, 26, (3), 459-474

Frank P.M., 1991, Enhancement of robustness in observer-based fault detection, *Proc. of IFAC Symposium SAFEPROCESS'91, Baden-Baden*, 275-287

Frank P.M., 1993, Advances in observer-based fault diagnosis, *Proc. de la conférence TOOL'DIAG 93*

Friedland B., 1969, Treatment of bias in recursive filtering, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-24, (4), 359-367

- Gertler J.J., 1988, Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants, IEEE Control Systems Magazine, 8, (6), December, 3-11
- Isermann R., 1984, Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey, Automatica, 20, 387-404
- Jacobson C.A., Nett C.N., 1991, An integrated approach to control and diagnosis using the four parameters controller, IEEE Control System Magazine, 22-28
- Jones H.L., 1973, Failure detection in linear systems, Ph.D thesis, Department Of Aeronautics and Astronautics, MIT
- Massoumnia M., 1986, A geometric approach to failure detection and identification in linear systems, Ph.D thesis, Department Of Aeronautics and Astronautics, MIT
- Massoumnia M., 1988, A geometric approach to the synthesis of failure detection filters, IEEE Trans. Auto. Control, AC-31, 839-846
- Mehra R.K., Peschon I., 1971, An innovation approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems, Automatica, 7, 637-640
- Patton R.J., Chen J., 1991, Robust fault detection using eigenstructure assignment, a tutorial consideration and some new results, 30st Conference on Decision and Control, Brighton, UK
- Potter J.E., Suman M.C., 1977, Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments, AGARDOGRAPH, NATO, 224, 15-1
- Schrichander R., Walker B.K., 1993, Stochastic stability analysis for continuous time fault-tolerant control systems, Int. J. Control, 57, n°2, pp. 433-452
- Speyer J.L., White J.E., 1984, Shirayayev sequential probability ratio test for redundancy management, J. Guidance, Control & Dynamics, 7, n°7, pp. 588-595
- Viswanadham N., Schrichander R., 1987, Fault detection using unknown input observers, Control Theory and Advanced Technology, MITA Press, Vol.3, n°2, 91-101
- Walker B., 1989, Fault detection threshold determination using Markov theory, Chapitre 14 de Patton, Frank et Clark (Eds) ; Fault diagnosis in Dynamic systems : Theory and applications, Prentice Hall
- Watanabe K., Himmelblau D.M., 1982, Instrument fault detection in systems with uncertainties, Int. J. Syst. Sci., 13, 137-156
- Watanabe K., Yoshimura T., Soeda T, 1979, A diagnosis design for parametric failures, Trans. Society of Instrument Control Engineers, 15, 901-906
- White J.E., Speyer J.L., Detection filter design : spectral theory and algorithm, IEEE Trans. Auto. Control, AC-32, 593-603
- Willsky A.S., 1976, A survey of design methods for failure detection in dynamic systems, Automatica, 12, 601-611

Wünnenberg J., Frank P.M., 1989, Chapitre 1 de Patton, Frank et Clark (Eds) ; Fault diagnosis in Dynamic systems : Theory and applications, Prentice Hall

Après ces articles de synthèse, nous allons détailler les articles qui ont servi de références aux travaux effectués sur les systèmes standard et plus particulièrement dans le domaine de l'estimation simultanée de l'état et des paramètres en présence de défaut, des systèmes à paramètres stochastiques, des observateurs, ... :

Blom H.A.P., Bar-Shalom Y., 1988, The interacting multiple model algorithm for systems with markovian switching coefficients, IEEE Trans. Auto. Control, AC-33, n°8, pp. 780-783

Bong-Chae M., Zeugnam B., 1991, Failure detection, identification and accommodation based on a new accommodation filter, Int. J. of Syst. Sciences, 22, (6), 1025-1034

Darouach M., Zasadzinski M., Keller J.Y., 1992, State estimation for discrete systems with unknown inputs using state estimation of singular systems, American Control Conference, Chicago, USA

Ding X., Frank P.M., 1991, Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation, Proc. of IFAC Symposium SAFEPROCESS'91, Baden-Baden, 307-312

El-Sherief H, Sinha N.K., 1979, Bootstrap estimation of parameters and states of linear multivariable systems, I.E.E.E. Trans. Auto. Control. AC-24, (2), 340-342

Emami-Naeini A.E., Akhter M.M., Rock S.M., 1988, Effect of model uncertainties on failure detection : the threshold selector, I.E.E.E. Trans. Auto. Control. AC-33, (2), 1106-1115

Fuchs J.J., 1990, Structure and order estimation of multivariable stochastic processes, I.E.E.E. Trans. Auto. Control. AC-35, (12), 1338-1341

Gertler J.J., 1991, Analytical redundancy methods in fault detection and isolation, Proc. of IFAC Symposium SAFEPROCESS'91, Baden-Baden, 9-21

Gertler J.J., Kunwer M.M., 1993, Optimal residual decoupling for robust fault diagnosis, Proc. de la conférence TOOL'DIAG 93

Irwin G.W., Roberts A.P., 1976, The Luenberger canonical form in the state/parameter estimation of linear systems, Int. J. of Syst. Sciences, 23, (6), 851-864

Kailath T., 1970, The innovation approach to detection and estimation theory, Proceedings IEEE, 58, (5), 680-695

Keller J.Y., 1991, Contribution à la validation de données des systèmes statiques et dynamiques, Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I

Kitamura M., 1989, Fault detection in nuclear reactors with the aid of parametric modelling methods, Chapitre 9 de Patton, Frank et Clark (Eds) ; Fault diagnosis in Dynamic systems : Theory and applications, Prentice Hall

Lou X.L., Willsky A.S., 1986, Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems, *Automatica*, 22, 333-344

Luenberger D.G., 1978, Time-invariant dynamical systems, *Automatica*, Vol.17, pp. 473-480

Prasad R.M., Sinha A.K., 1977, On bootstrap identification using stochastic approximation, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-22, (4), 671-672

Puthenpura S., Sinha N.K., 1986, Robust bootstrap method for joint estimation of states and parameters of a linear system, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 108, 255-266

Ray G., 1989, On-line state and parameter estimation of multivariable systems based on transformed model, *Int. J. Syst. Sci.*, Vol.20, n°1, pp. 1-17

Rosenbrock H.H., Pugh A.C., 1974, Contribution to a hierarchical theory of systems, *Int. J. Control*, Vol. 19, n°5, pp. 845-867

Tugnait J.K., 1982, Detection and estimation for abruptly changing systems, *Automatica*, Vol.18, n°10, pp.607-615

Walker B.K., 1992, Fault detection performance of a FDI strategy based on non-linear parameter estimation for the space shuttle main engine, 31st IEEE Conference on Decision and Control, Tucson, Arizona

Watanabe K., 1985, General two-stages bias correction filter and predictor for linear discrete-time systems, *Control Theory and Advanced Technology*, MITA Press, 1, (1), 87-101

Watanabe K., Yoshimura T., Soeda T., 1981, A discrete-time adaptive filter for stochastic distributed parameter systems, *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control*, 103, 266-278

Willsky A.S., Jones H.L., 1976, A generalized likelihood ratio testing approach for the detection and estimation of jumps in linear systems, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-21, 108-112

Wu N.E., 1992, Failure sensitizing reconfigurable control design, 31st Conference on Decision and Control, Tucson, Arizona

Yoshimura T., Watanabe K., Konishi K., Soeda T., 1979, A sequential failure detection approach of failure parameters, *Int. J. Systems Sci.*, 10, 827-836

Enfin, nous regrouperons dans cette dernière partie, une partie des articles et ouvrages qui nous ont servi de références dans nos travaux dans le cadre du diagnostic sur les systèmes singuliers :

Campbell S.L., Meyer C.D. Jr, Rose N.J., 1976, Application of Drazin inverse to linear systems of differential equations with singular constant coefficients, *SIAM J. App. Math.*, Vol.31, n°3, pp. 411-425

Dai L., 1989, Filtering and LQG problems for discrete-time stochastic singular systems, *I.E.E.E. Trans. Auto. Control*. AC-34, n°10, pp. 1105-1108

- Dai H, Sinha N.K., Puthenpura S.C., 1989, Robust combined estimation of states and parameters of bilinear systems, *Automatica*, Vol.25, n°4, 613-616
- DeClaris N., Rindos A., 1984, Semi-state analysis of neural networks in *Apysia Californica*, Proc. 27th MSCS, pp. 686-689, Morgantown
- Dziurla B., Newcomb R., 1979, The Drazin inverse and semi-state equations, Proc. 4th Int. Symp. Math. Theory of Networks and Systems Delft, The Netherland, pp. 283-289
- Lewis F.L., Özçaldiran K., 1986, Geometric structure and feedback in singular systems, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-34, n°4, pp. 450-455
- Lewis F.L., 1988, A survey of linear singular systems, *J. Circuits, Signal Proc.*, Vol.5, n°1, pp. 3-36
- Ljung L., Soderstrom T., 1983, *Theory and practice of recursive identification*, MIT Press
- Luenberger D.G., 1977, Dynamic equations in descriptor form, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-22, pp. 312-321
- Luenberger D.G., 1989, Boundary recursion for descriptor variable systems, *IEEE Trans. Auto. Control*, AC-34, pp. 287-292
- Mac Clamroch N.H., 1986, Singular systems of differential equations as dynamic models for constrained robot systems, Proc. IEEE Conf. Rob. Autom., pp. 21-28
- MacFarlane A.G.J., Postlethwaite I., 1977, The generalized Nyquist stability criterion and multivariable root loci, *Int. J. Control*, Vol.25, pp. 81-127
- Newcomb R.W., 1981, The semi-state description of non-linear time-variable circuits, *IEEE Trans. Circuits and Systems*, CAS-26, n°1, pp. 62-71
- Newcomb R.W., 1982, Semi-state design theory : binary and sweep hysteresis, *J. Circuits, Systems, Signal Proc.*, Vol.1, n°2, pp. 203-216
- Nikoukhah R., Adams M., Willsky A.S., Levy B.S., 1989, Estimation for boundary value descriptor systems, *Circuits, Systems and Signal Processing*, Vol.8, pp. 25-48
- Verghese G.C., 1978, Infinte-frequency behavior in generalized dynamical systems, Ph D Dissertation, Dept. of Elec. Eng. Stanford University, Stanford CA
- Verghese G.C., Levy B.C., Kailath T., 1981, A generalized state-space for singular systems, *IEEE Trans. Auto. Cont.*, AC-26, n°4, pp. 811-831
- Wang X.M., Bernhard P., 1991, Filtrage et lissage des systèmes implicites discrets, *APII-RAIRO*, Vol.25, n°3, pp. 205-228
- Zasadzinski M., Mehdi D., Darouach M., 1991, Recursive state estimation for singular systems, *American Control Conference*, Boston, Vol.2, pp. 2850-2851
- Zeeman E.C., 1975, Duffing's equation in brain modelling, *J. Int. of Math. and its Applic.*, pp. 207-214

Nom : NOWAKOWSKI

Prénom : Samuel

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 22 JAN. 1990

Le Président de l'Université



3C-H9