

THESE

Présentée à

l'Université des Sciences et Technologies de LILLE

en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité

Productique : Automatique et Informatique Industrielle

Par

Ghaleb HOBLOS**CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA TOLERANCE
AUX FAUTES DES SYSTEMES D'INSTRUMENTATION**

Soutenue publiquement le 20 mars 2001 devant la commission d'examen

Membres du jury :

Président : Etienne CRAYE, Professeur, Ecole Centrale de Lille

Rapporteurs : Dominique SAUTER, Professeur, Université de Nancy I, H. Poincaré
Mohamed M'SAAD, Professeur, Institut des Sciences de la Matière et
du Rayonnement de Caen

Examineur : Patrick MILLOT, Professeur, Université de Valenciennes

Co-Directeurs : Marcel STAROSWIECKI, Professeur, Université de Lille I
Abdelwahab AITOUCHE, Enseignant-Chercheur, Hautes Etudes
Industrielles de Lille

A ma famille qui est trop nombreuse pour être citée entièrement,

A mes parents,

A mes sœurs,

A mes frères,

A mes ami(e)s,

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	2
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	3

1^{ère} partie : Introduction à la tolérance aux fautes

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	5
------------------------------------------	---

Chapitre 1 : Introduction

1.1. INTRODUCTION	7
1.2. DÉFINITIONS ET TERMINOLOGIE.....	7
1.2.1. DÉFINITIONS	8
1.2.2. MODÉLISATION DES DÉFAILLANCES.....	10
1.3. PRINCIPE DE LA DÉTECTION DE DÉFAUTS.....	11
1.3.1. PRINCIPE ET GÉNÉRALITÉS	11
1.3.2. EVALUATION DES PROCÉDURES DE DIAGNOSTIC	13
1.3.3. MÉTHODES DE DÉTECTION ET DE LOCALISATION	13
1.3.3.1. Méthodes sans modèle.....	14
1.3.3.2. Méthodes avec modèle	17
1.3.4. ROBUSTESSE DES TECHNIQUES DE DÉTECTION ET DE LOCALISATION	20
1.4. CONCLUSION	20

Chapitre 2 : Méthodes de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes et de la supervision

2.1. INTRODUCTION	22
2.2. PROBLÈME DE COMMANDE	23

2.2.1. POSITION DU PROBLÈME DE COMMANDE	23
2.2.2. APPROCHES PASSIVES ET ADAPTATIVES	25
2.2.2.1. Approches robustes.....	25
2.2.2.2. Approche par stabilisation simultanée de systèmes.....	27
2.2.2.3. Approches adaptatives	28
2.2.3. COMMANDE HYBRIDE	29
2.2.4. COMMANDE TOLÉRANTE AUX FAUTES	30
2.2.4.1 Problème d'accommodation des défaillances.....	31
2.2.4.1.1. <i>Approches heuristiques</i>	31
2.2.4.1.1.1. Approche basée sur les systèmes experts	31
2.2.4.1.1.2. Techniques d'apprentissage	33
2.2.4.1.2. <i>Modification de la loi de commande</i>	34
2.2.4.1.3. <i>Méthode de la pseudo-inverse</i>	35
2.2.4.2 Problème de reconfiguration	38
2.2.5. SUPERVISION	38
2.3. PROBLÈME D'ESTIMATION	40
2.3.1. POSITION DU PROBLÈME D'ESTIMATION	40
2.3.2. ESTIMATION ROBUSTE, ADAPTATIVE	41
2.3.2.1. Estimation robuste	41
2.3.2.2. Estimation adaptative	43
2.3.3. ESTIMATION TOLÉRANTE AUX FAUTES.....	43
2.4. CONCLUSION	44
CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE	45

2^{ème} partie : Analyse et conception d'une architecture d'instrumentation et d'action

INTRODUCTION DE LA DEUXIÈME PARTIE	46
-------------------------------------------------	-----------

Chapitre 3 : Observabilité, commandabilité des systèmes linéaires. Notions de minimalité et de redondance

3.1. INTRODUCTION	48
3.2. DÉFINITIONS ET PROPRIÉTÉS SUR LES INDICES D'OBSERVABILITÉ	49
3.2.1. INDICES D'OBSERVABILITÉ INDIVIDUELS [BING 87].....	49
3.2.2. INDICES D'OBSERVABILITÉ PAR RAPPORT À E [STAR 99].....	50
3.2.3. INDICES DE PSEUDO-OBSERVABILITÉ PAR RAPPORT À E [STAR 99].....	51

3.2.4. RELATIONS ENTRE LES INDICES	53
3.2.4.1. Propriété 1.....	53
3.2.4.2. Propriété 2 ($E=I_n$).....	53
3.3. OBSERVABILITÉ.....	54
3.3.1. RECOUVREMENT DE L'ESPACE	54
3.3.2. REDONDANCE ET MINIMALITÉ	55
3.3.2.1. Définitions	56
3.3.3. POSSIBILITÉS DE RECOUVREMENT.....	56
3.3.3.1. Fenêtre minimale	57
3.3.3.1. Observabilité temporaire	57
3.3.4. PROPRIÉTÉS	59
3.3.5. EXEMPLE	63
3.4. COMMANDABILITÉ	64
3.5. CONCLUSION	68

Chapitre 4 : Conception optimale d'un schéma d'instrumentation et d'action en vue de la tolérance aux fautes

4.1. INTRODUCTION	69
4.2. ETAT DE L'ART.....	70
4.2.1. PLACEMENT DE CAPTEURS	70
4.2.1.1. Méthodes	70
4.2.1.2. Critères d'évaluation	74
4.2.2. SÉLECTION D'ACTIONNEURS.....	77
4.3. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES SOUS ENSEMBLES DE CAPTEURS (D'ACTIONNEURS) REDONDANTS.....	78
4.3.1. EXEMPLE 1	78
4.3.2. IMPLANTATION	80
4.4. EVALUATION DE LA TOLÉRANCE AUX FAUTES	81
4.4.1. EVALUATION STRUCTURELLE.....	81
4.4.1.1. Définitions	81
4.4.1.2. Interprétation graphique.....	82
4.4.1.3. Exemple 2	83
4.4.2. EVALUATION FIABILISTE.....	85
4.4.2.1. Calcul du MTTNO d'un système d'instrumentation par rapport à E	86
Exemple 3	87
4.4.3. COÛT DE L'INSTRUMENTATION	88

4.5. CONCEPTION DE SCHÉMAS D'INSTRUMENTATION TOLÉRANTS AUX FAUTES	89
4.5.1. REMARQUES, SYMBOLES ET NOTATIONS.....	89
4.5.2. PROPRIÉTÉS	90
4.5.2.1. Marquage	90
4.5.2.2. Calcul des degrés de redondance.....	90
4.5.2.3. Mesure de fiabilité	91
4.5.3. ALGORITHME.....	91
4.6. CONCLUSION	93

Chapitre 5 : Applications

5.1. PLACEMENT DE CAPTEURS D'UN SYSTÈME THERMIQUE	94
5.2 SÉLECTION D'ACTIONNEURS D'UN PROCESSUS HYDRAULIQUE	106
5.3 CONCLUSION	112
CONCLUSION DE LA DEUXIÈME PARTIE	113
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	114
<u>ANNEXE A [WU 00]</u>	117
<u>ANNEXE B</u>.....	119
<u>ANNEXE C [LUON 97]</u>	120
<u>ANNEXE D</u>	122
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	124

Remerciements

Ce mémoire est le résultat de travaux menés au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique industrielle de Lille (LAIL – CNRS UPRESA 8021) sous la direction scientifique de Monsieur Marcel STAROSWIECKI, professeur à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille avec la collaboration de Monsieur Abdelwahab Aïtouche, Enseignant chercheur à l'école des Hautes Etudes Industrielles de Lille. Je tiens à leur témoigner toute ma reconnaissance pour l'aide tant scientifique que morale qu'ils ont su m'apporter lors de l'encadrement efficace et chaleureux de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à la direction de l'école des Hautes Etudes Industrielles et à la Fondation Nobert Segard pour leur soutien et leur confiance sans lesquels ce travail de recherche n'aurait pu se dérouler dans d'aussi bonnes conditions

Je tiens également à remercier les membres du jury qui me font l'honneur de participer à l'examen de ce travail :

Monsieur le Professeur Dominique SAUTER de l'Université de Nancy 1 et Monsieur le Professeur Mohamed M'SAAD de l'Université de Caen qui ont accepté la lourde tâche de rapporteur,

Monsieur le Professeur Patrick MILLOT de l'Université de Valenciennes et Monsieur le Professeur Etienne CRAYE de l'Ecole Centrale de Lille, pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en acceptant de participer au jury.

Je tiens également à remercier, avec une attention particulière, mes parents, mes sœurs et mes frères qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes projets. Et j'adresse un grand merci à tous mes amis pour leurs encouragements et leur soutien durant ces années de thèse.

Enfin, mes pensées vont à tous les membres du laboratoire et à toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu au cours de ces années de thèse pour leurs conseils et leur amitié.

Introduction générale

Le contrôle et la conduite des processus industriels complexes, tels que les processus hydrauliques et chimiques ou les centrales électriques, sont basés sur des systèmes d'instrumentation et d'action pour lesquels **la validation de données, l'accommodation et la reconfiguration** du système sont d'un intérêt primordial. Ainsi, la complexité des processus crée une demande croissante pour la tolérance aux fautes (accommodation/reconfiguration), qui peut être atteinte en utilisant l'efficacité des algorithmes de détection et de localisation de défauts. Lorsque des défauts se produisent, il est crucial qu'ils soient détectés et diagnostiqués rapidement afin que l'action corrective puisse reconfigurer le système de commande et puisse accommoder le changement. En effet, les défauts de capteurs, d'actionneurs et d'autres composants du système peuvent changer dramatiquement les trajectoires du système. La tolérance aux fautes est nécessaire pour préserver la capacité du système à accomplir les objectifs souhaités, ou dans le cas échéant, d'atteindre des nouveaux objectifs (réalisables) pour éviter dès que possible des trajectoires catastrophiques.

Ce mémoire traite le problème de la tolérance aux fautes en cas de pertes de capteurs (d'actionneurs). Il est décomposé en deux parties. La première présente les concepts généraux de commande et d'estimation de systèmes linéaires en vue de la tolérance aux fautes et elle est composée de deux chapitres. La deuxième est consacrée à la conception de schémas d'instrumentation (d'action) en vue de la tolérance aux fautes et elle est composée de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré au problème de la surveillance. Celle-ci peut être décomposée en trois étapes : détection, localisation, identification ou diagnostic. Après avoir rappelé les concepts généraux de la détection de défauts, nous présentons les différentes techniques utilisant un modèle ou non. Ces méthodes sont usuellement appelées dans la littérature anglophone : Fault Detection and Isolation (FDI).

Le deuxième chapitre pose le cadre de notre travail et présente quelques approches de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes et de la supervision. Ces méthodes ont pour objectif de permettre, lorsqu'une défaillance est détectée, de retrouver les performances nominales du système, que le problème se pose en termes de commande ou d'estimation.

Dans le troisième chapitre, après avoir rappelé les définitions et les propriétés de l'observabilité (commandabilité) d'un système linéaire, nous présentons les possibilités de recouvrement de l'espace d'une fonctionnelle linéaire en vue de satisfaire les conditions d'observabilité (commandabilité), ce qui nous permet d'introduire les notions de sous ensembles de capteurs (d'actionneurs) minimaux et redondants. Des propriétés sur ces ensembles sont établies.

Le quatrième chapitre est consacré au problème de placement de capteurs (d'actionneurs) dans l'optique de la tolérance aux fautes. Nous présentons un graphe multi-niveau orienté contenant tous les sous ensembles redondants. Ce graphe contient tous les chemins possibles d'accommodation/reconfiguration pour lesquels les conditions d'observabilité (commandabilité) d'une fonctionnelle linéaire sont satisfaites.

Le problème de la tolérance aux fautes revient donc à analyser les chemins de ce graphe en se basant sur deux mesures, structurelle (degrés de redondance fort et faible) et probabiliste (temps moyen pour l'apparition de la première défaillance non tolérée). Ces critères serviront de base à l'élaboration d'un algorithme permettant d'obtenir toutes les solutions de placement de capteurs (d'actionneurs) qui satisfont un cahier des charges de tolérance aux fautes.

Dans le cinquième chapitre, nous appliquons les algorithmes de conception que nous avons développés à un système thermique représentant une chaudière de bateau [CHEM 80] (dans le cas de placement de capteurs) et à un système hydraulique [HOBL 00-a] (dans le cas de sélection d'actionneurs).

Enfin, nous terminerons par la présentation des conclusions générales et des perspectives de ce travail.

1^{ère} partie

Introduction à la tolérance aux fautes

Au cours des vingt dernières années, de nombreux travaux ont été consacrés au problème de détection et de localisation de défauts des processus industriels. Rares sont les travaux consacrés au problème de la tolérance aux fautes, connue sous le nom de *FTC* (Fault Tolerant Control). Les premières applications ont été principalement dédiées aux domaines critiques tels que l'aéronautique mais ce n'est que récemment que cette technique a été appliquée à d'autres domaines.

Dans la littérature, deux types d'approches sur la commande en vue de la tolérance aux fautes ont été distinguées [PATT 97] : "**passives**" et "**actives**". L'approche passive est fondée sur la commande robuste pour assurer au système en boucle fermée une insensibilité à certains défauts anticipés ou des incertitudes de modélisation, sans tenir compte des défaillances qui se produisent en temps réel. La commande active quant à elle, selon le degré d'intelligence des techniques utilisées, permet d'offrir une capacité plus large à tolérer les défaillances. Les deux approches relèvent de l'accommodation des défaillances. Dans le cas de l'estimation, citons les travaux de Levine [LEVI 90] et Gaddouna [GADD 94] sur les observateurs tolérants aux fautes.

Notre objectif dans cette partie est de distinguer entre les concepts d'accommodation et de reconfiguration. Nous procédons de la façon suivante.

Dans le premier chapitre, nous rappelons les différents types de défauts qui peuvent affecter un processus ainsi qu'une synthèse brève de différentes techniques de *FDI*. Les performances et la robustesse de ces techniques sont en rapport avec le type de défaut (additif ou multiplicatif ; capteur, actionneur ou procédé).

Dans le deuxième chapitre, nous proposons une description du problème de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes et de la supervision.

Chapitre 1

Introduction

1.1. Introduction

Les systèmes devenant de plus en plus complexes, leur surveillance est un problème primordial. En particulier, l'instrumentation devient au cours du temps une source de défauts dégradant le bon fonctionnement du processus. Le rôle de la surveillance est de détecter, de localiser et de diagnostiquer des défauts de capteurs, d'actionneurs ou d'autres composants du système.

La phase de détection et de localisation de défauts représente une étape préliminaire pour l'exécution des procédures de tolérance aux fautes (accommodation et reconfiguration) (cf. chapitre 2). Ces éléments sont primordiaux à connaître pour augmenter la capacité d'un système à tolérer certains types de défauts.

Après avoir rappelé les différentes définitions et terminologies concernant les défauts, nous présentons les principes de base de la détection. Dans le chapitre suivant, une revue des différentes méthodes de commande et d'estimation est présentée. Selon la sévérité du défaut, une tâche de détection et de localisation sera utilisée ou non.

1.2. Définitions et terminologie

Un processus physique est caractérisé par trois ensembles de variables [BRUN 90] : un certain nombre de variables d'état (ensemble de variables internes suffisant pour résumer le "passé" et prédire le comportement futur du système), de variables de sortie et d'entrée (constituant les variables externes du processus). Ces variables évoluent selon certaines lois

physiques, qui peuvent être influencées par des perturbations ou entrées inconnues non contrôlées. Un tel processus peut être représenté par la figure suivante :

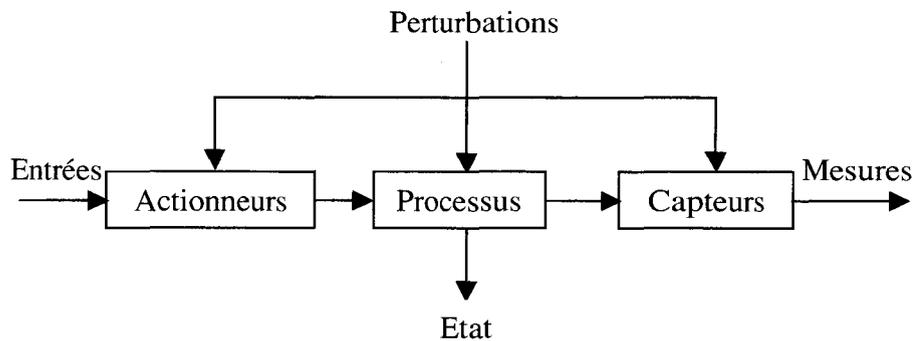


Figure 1.1. Schéma d'un processus physique

1.2.1. Définitions

Nous avons repris les différentes définitions et terminologie sur les défauts dans l'article d'Isermann et Ballé [ISER 96] .

Défaut. Imperfection physique liée soit à la conception ou à la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut rester "caché" pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance.

Défaillance. Modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions prévues.

Panne. Interruption permanente de la capacité du système à réaliser une fonction requise sous des conditions de fonctionnement spécifiées.

Dysfonctionnement. Irrégularité intermittente dans la réalisation d'une fonction désirée du système.

Entrée inconnue ou perturbation. Entrée inconnue (non mesurable et non commandable) agissant sur un système. La notion d'entrée inconnue permet parfois d'introduire dans le modèle les erreurs de modélisation entre le système réel et le modèle mathématique, ainsi que les bruits de système et de mesure, afin d'en évaluer les effets.

Nous nous intéressons par la suite plus particulièrement aux défaillances inhérentes à tout système. Du point de vue de la surveillance, les défaillances peuvent être classées en trois catégories, selon qu'elles agissent sur le processus, l'instrumentation ou l'actionnement [GERT 88] :

- **Défaillances de processus.** On distingue deux types :
 - défaillances dues à des entrées inconnues agissant sur le processus,
 - défaillances dues à des modifications des paramètres du modèle représentant l'installation.

- **Défaillances de capteurs.** Elles se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. Généralement, ces défaillances sont considérées comme additives et indépendantes de la valeur de la mesure. Comme nous le verrons plus tard, il s'avère indispensable de considérer des défaillances multiplicatives notamment celles engendrées par des problèmes de gain de capteur.
Comme exemple, nous pouvons citer les erreurs d'échelle, l'hystérésis, le biais, les mauvais contacts,

- **Défaillances d'actionneurs.** Elles se traduisent par une incohérence entre les commandes d'un actionneur et sa sortie. Elles sont principalement représentées sous forme additive, sauf dans certains cas particuliers, comme par exemple les mauvais réglages de gain, où la forme multiplicative est préférable.

Les défaillances engendrent des **erreurs**, des **symptômes** qui sont mis en évidence par des **résidus**.

- **Erreur.** Ecart entre une valeur mesurée ou estimée (d'une variable de sortie) et la vraie valeur, spécifiée ou théoriquement correcte.

- **Symptôme.** Changement du comportement d'une quantité observable, qui sort du domaine définissant son comportement normal.

- **Résidu.** Indicateur de défaillance. Il exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques.

Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons à la modélisation des défaillances de capteurs et d'actionneurs citées précédemment.

1.2.2. Modélisation des défaillances

Les défaillances de capteurs et d'actionneurs peuvent être modélisées sous forme additive ou multiplicative.

Dans le cas de systèmes linéaires, Gertler [Gert 94] a montré que les défaillances multiplicatives peuvent se modéliser sous une forme additive. Cependant, elles présentent des caractéristiques particulières : les défaillances multiplicatives ont les effets sur les sorties qui dépendent de l'évolution des entrées. Pour pouvoir les distinguer, un simple examen sur la corrélation temporelle de la faute à l'entrée est réalisé. En effet, les défaillances additives sont non corrélées avec l'entrée, tandis que les défaillances multiplicatives le sont.

La représentation qui prend en compte les différentes interventions de défaillances multiplicatives et additives (capteurs et actionneurs) [HAME 95] peut s'écrire par le système linéaire déterministe à temps invariant donné par :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + E_1 f_1(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + F_1 f_2(k) \end{aligned} \tag{1.1}$$

où $x \in \mathfrak{R}^n$ est le vecteur d'état, A la matrice d'état du système, $u \in \mathfrak{R}^m$ le vecteur d'entrée, B la matrice de distribution des commandes et $y \in \mathfrak{R}^p$ le vecteur de sortie avec les matrices de distribution appropriées C et D . Les matrices E_1 et F_1 peuvent être respectivement égales aux matrices B et $[D \ I_p]$, dans ce cas les vecteurs f_1 et f_2 représentent les défaillances de capteurs et d'actionneurs.

Pour associer les deux vecteurs $f_1(k)$ et $f_2(k)$ dans un seul vecteur $f(k)$, on définit deux matrices E et F tel que :

$$\begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} f(k) = \begin{bmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & F_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(k) \\ f_2(k) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

La forme simplifiée de la représentation d'état devient :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ef(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + Ff(k) \end{aligned} \quad (1.3)$$

La représentation d'état (1.3) peut être généralisée par l'ajout d'une nouvelle entrée $d(k)$ [HÖFL 94], telle que :

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Ef(k) + Gd(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + Ff(k) + Hd(k) \end{aligned} \quad (1.9)$$

où $d(k) \in \mathbb{R}^g$ permet de représenter toutes les perturbations ou incertitudes influençant les dynamiques du système ou les mesures, et $f(k)$ est un vecteur inconnu symbolisant les effets d'une défaillance.

1.3. Principe de la détection de défauts

Pour bien maîtriser les systèmes industriels, il est nécessaire de savoir détecter un défaut en présence d'autres effets (bruits de mesures, perturbations, erreurs de mesures), de le localiser (processus, système d'instrumentation ou d'action) et de le diagnostiquer si possible (instant d'apparition, amplitude, ...)

1.3.1. Principe et Généralités

La surveillance consiste à réaliser les tâches suivantes :

1. Détection du défaut, consiste à indiquer la présence d'un défaut.
2. Localisation du défaut, consiste à localiser l'élément défectueux (capteur, actionneur, composant de processus).

3. Identification du défaut, correspond à déterminer son amplitude, son comportement temporel, l'instant d'apparition,

Pratiquement, l'existence des deux premières tâches (« détection » + « localisation ») est d'une grande importance dans n'importe quelle application réelle, tandis que l'identification de défaut représente une étape complémentaire de diagnostic. Beaucoup d'auteurs utilisent le mot « diagnostic » comme synonyme du mot « localisation ». La figure 1.2. représente les étapes de la surveillance.

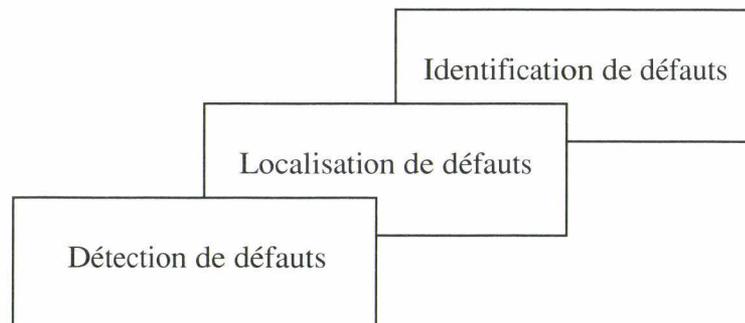


Figure 1.2. *Etapes de surveillance*

En principe, les tâches de détection et de localisation s'exécutent en temps réel pendant l'exploitation. Elles peuvent s'exécuter en parallèle ou d'une façon séquentielle.

Particulièrement, dans un module de détection et de diagnostic, les conventions suivantes sont adoptées :

1. Un défaut est supposé non présent à l'instant initial, mais il se produit pendant le fonctionnement à un instant t inconnu. Les défauts sont généralement décrits par des fonctions temporelles qui sont inconnues. Comme exemple, on peut citer : un saut ou une rampe.
2. La distinction entre les défauts et les perturbations additives est subjective : les premiers sont des entrées inconnues qu'on cherche à détecter et localiser tandis que les deuxièmes, sont des nuisances qu'on souhaite ignorer.
3. Un bruit provenant du processus, des systèmes d'instrumentation ou d'action est considéré comme un signal aléatoire de moyenne nulle. Si sa moyenne s'écarte de zéro, il peut être considéré comme un défaut ou une perturbation.

4. Les erreurs de modélisation représentent les désaccords entre le modèle mathématique (structure, paramètres) et le système réel. En général, elles sont considérées comme des perturbations qu'on cherche à ignorer.

1.3.2. Evaluation des procédures de diagnostic

L'efficacité des procédures de diagnostic est liée à quelques critères d'évaluation [PATT 89], [STAR 94]. En effet, les performances d'une tâche de détection sont caractérisées par :

- Sensibilité aux défauts : Capacité des techniques à détecter les défauts de faible amplitude. Un concept en relation avec la sensibilité aux défauts est la probabilité de non détection. En effet, la non détection est un événement non prévisible au sens déterministe et sera donc caractérisé à l'aide du langage probabiliste.
- Rapidité de détection : Capacité des techniques à détecter les défauts dans les meilleures délais. Si la détection est rapide, le système de supervision réagit plus efficacement,
- Robustesse : Capacité des techniques à opérer en présence du bruit, des perturbations et des erreurs de modélisation avec peu de fausses alarmes. Une fausse alarme est un signal délivré par le système de surveillance alors que le système réel ne présente aucune défaillance. Pour évaluer la nature aléatoire de la fausse alarme, on associe un critère de qualité adapté, la probabilité de fausse alarme. Plus cette probabilité est faible, plus la détection du défaut est sûre.

Ces trois facteurs résultent des interactions entre les vrais défauts d'une part et les autres effets (bruits, erreurs de modélisation, etc ...) d'autre part.

Les performances de l'étape de localisation, se traduisent par la capacité des techniques à localiser un défaut de faible amplitude, ou un défaut affectant plusieurs variables du système.

1.3.3. Méthodes de détection et de localisation

Le principe général des algorithmes de détection et diagnostic consiste à confronter les données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement nominal (pour la détection) ou de ses fonctionnements défaillants

(pour la localisation et l'identification). La forme sous laquelle cette connaissance est disponible conditionne les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance.

Le niveau de connaissance minimal est celui dans lequel les différents types de fonctionnement ne sont décrits que par la donnée d'un certain nombre de réalisations. On parle alors de méthodes sans modèle.

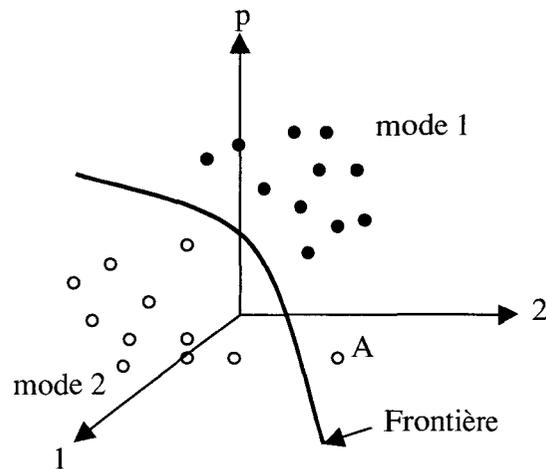
Un niveau de connaissance plus complet est celui dans lequel les différents types de fonctionnement sont décrits par des modèles de comportement numériques ou qualitatifs. On parle alors de méthodes avec modèle.

1.3.3.1. Méthodes sans modèle

On ne dispose pas de modèle décrivant le comportement normal et le(s) comportement(s) défaillant(s) du système. La méthode de diagnostic par reconnaissance des formes, est parmi les méthodes sans modèle la plus utilisée.

Diagnostic par reconnaissance des formes [DUBU 81, 90], [DENO 97], [BOUD 00]. Ce type de méthode est utilisé dans le cas de systèmes complexes, pour lesquels un modèle satisfaisant est difficile à obtenir. Les seules informations disponibles, hormis les informations humaines, sont issues des différents signaux. L'objectif de la reconnaissance des formes consiste à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connues *a priori*.

Notions de modes (classes). On choisit p paramètres (valeur de certains pics, énergie spectrale dans certaines bandes, valeur moyenne, variance, etc.) susceptibles de représenter les modes de fonctionnement. Cet ensemble de p paramètres constitue le vecteur d'observation x à chaque instant. Ce vecteur peut être représenté dans l'espace \mathfrak{R}^p de dimension p . Par suite du bruit inhérent aux différentes mesures, une suite d'observations du même mode de fonctionnement ne va pas se retrouver en un seul point, mais bien occuper une zone de l'espace \mathfrak{R}^p . Si les p paramètres ont été judicieusement choisis, le problème du diagnostic revient alors à l'obtention de frontières entre ces zones. La figure suivante illustre une telle présentation :



A: nouvelle observation ; correspond à quel mode ?

Figure 1.3. Représentation et décision dans l'espace des formes

Il s'agit de reconnaître à quel mode (ou classe) se rattache la forme observée.

Il convient donc, pour utiliser cette approche de :

- choisir une représentation des modes appuyée sur p paramètres significatifs ; ce choix est délicat et généralement issu de l'expérience ; aucune méthode générale ne permet de le guider,
- avoir des données correspondant à chacun des modes observables ; c'est ce que l'on appelle l'ensemble d'apprentissage.

Notions de règles de décisions. L'ensemble d'apprentissage peut être constitué à partir d'expériences réelles ou provoquées ou par exploitation de l'historique. La connaissance de cet ensemble est incomplète, du fait qu'on ne connaît jamais tous les modes de fonctionnement d'un processus. Généralement, on dispose de vecteurs d'observation correspondant au mode normal et, parfois, de quelques vecteurs correspondants à un nombre limité de modes avec défaut. Il faut donc élaborer des règles de décision avec une connaissance incomplète, parfois seulement limitée à des observations qui correspondent à un mode normal [DUBU 90].

Dans la théorie de la décision classique, l'affectation à un mode (mode 1 ou 2) d'un vecteur d'observation revient à un test entre deux hypothèses H_1 et H_2 . Pour tenir compte de la connaissance incomplète, on introduit une nouvelle hypothèse H_r , dite hypothèse de rejet: cela revient à séparer l'espace des observations en trois régions, la première où l'on décidera du mode 1, la deuxième où l'on décidera du mode 2 et la troisième où l'on rejettera le point comme observation d'un des modes connus. Les vecteurs observations rejetés peuvent formés d'autres modes inconnus au départ. Pour cet objectif, appelé *l'apprentissage*, de nombreuses méthodes dites génériques ont été proposées, parmi lesquelles la méthode des nuées dynamiques qui est la plus utilisée [DUBU 90]. La figure suivante illustre le processus général d'apprentissage.

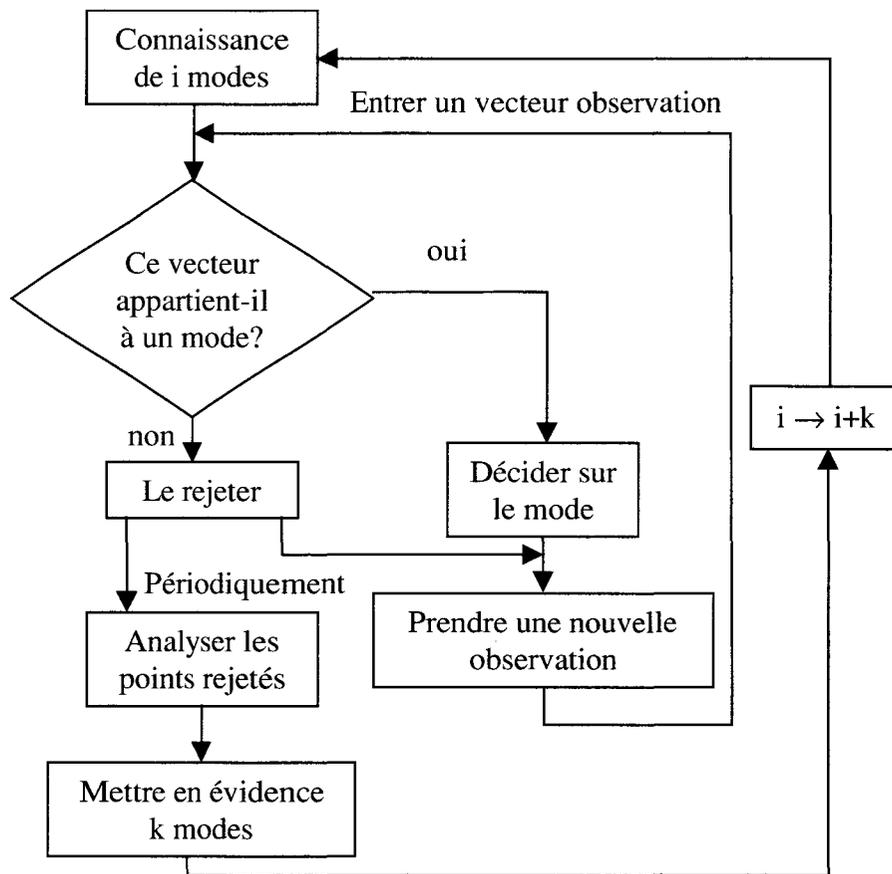


Figure 1.4. Principe de diagnostic par reconnaissance des formes

Les techniques classiques de discrimination sont en général insuffisantes. En effet,

1. elles supposent une connaissance *a priori* de tous les états de fonctionnement,

2. elles ne prennent pas en compte l'évolution du système.

Certains travaux ont conduit à proposer des méthodes reposant sur des théories non standard de traitement de l'incertitude telles que la logique floue [BOUD 96], [MASS 96] ou la théorie des fonctions de croyance [DENO 97, 98], [ZOUH 95]. Ces approches ont permis le développement de règles de décision à la fois robustes, adaptatives et prédictives [FREL 92, 96], [BOUD 00].

Les méthodes de surveillance « sans modèle » sont limitées car elles utilisent seulement des mesures effectués sur le processus. Une connaissance sur les lois physiques du processus qui constituent une source d'informations complémentaire, est ignorée dans ce type d'approches. D'où la nécessité d'exploiter cette connaissance, en utilisant des méthodes de surveillance avec modèle.

1.3.3.2. Méthodes avec modèle

La plupart des méthodes de surveillance avec modèle s'appuient sur les notions de redondance matérielle ou analytique. Les mesures sont comparées avec les valeurs des variables correspondantes calculées analytiquement. Ce calcul utilise les mesures des autres variables actuelles ou/et précédentes, ainsi que le modèle mathématique décrivant le système en fonctionnement normal. Cette idée peut être généralisée pour comparer deux quantités générées analytiquement. Dans les deux cas, les résultats de comparaison, appelés résidus, sont des indicateurs de l'apparition d'un défaut sur le système. Une autre classe de méthodes à base de modèle s'appuie directement sur l'estimation des paramètres.

La phase de génération des résidus est toujours suivie par une phase d'évaluation, pour atteindre l'objectif de détection et de localisation (figure 1.5.) :

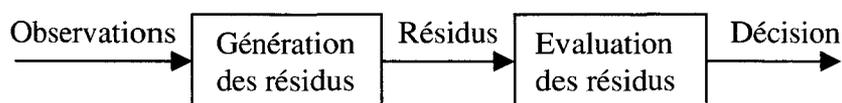


Figure 1.5. Détection et diagnostic des défauts à base de modèles

En présence du bruit et des erreurs de modélisation, les résidus ne sont jamais nuls, même en l'absence de défauts. Un seuil, calculé empiriquement ou théoriquement, est nécessaire pour le détecter. Des propriétés structurelles et directionnelles des résidus aident à localiser facilement un défaut.

Selon la manière dont la connaissance est utilisée, on distingue trois grandes approches fondées sur :

- la redondance matérielle ou analytique,
- l'estimation d'état,
- l'estimation des paramètres.

Méthodes fondées sur la redondance matérielle ou analytique. Dans l'approche de redondance matérielle, plusieurs capteurs sont utilisés pour mesurer la même grandeur physique. La défaillance peut être localisée si le nombre de capteurs est au moins égal à trois. La détection de défauts nécessite la génération d'indicateurs de défauts qui peuvent être obtenus de différentes manières [DORR 95], [AITO 90] :

- Par comparaison deux à deux les mesures délivrées par les capteurs,
- Par comparaison de chaque mesure à la médiane de l'ensemble des autres mesures délivrées par les capteurs mesurant la même grandeur physique.

Cette approche n'est dédiée qu'aux pannes capteurs. De plus le coût, l'encombrement et la possibilité de défaillances de mode commun constituent des inconvénients majeures.

Une autre solution consiste à utiliser les relations analytiques qui existent entre les mesures de grandeurs dépendantes. Cette approche, ne peut être mise en œuvre que si l'on dispose d'un modèle. Dans le cas de cette approche, on connaît donc un modèle décrivant le comportement dynamique du système, ainsi que la valeur de ses paramètres en fonctionnement normal. La génération de résidus est basée sur la vérification de l'égalité des deux membres d'équations faisant uniquement intervenir des variables connues (relations de redondance). Ces résidus appartenant à un espace, appelé espace de parité, ont des valeurs nulles en l'absence de défaut. Par définition, un vecteur de parité désigne un vecteur des résidus tandis que les relations utilisées pour générer ces résidus sont appelées relations de

parité. La génération de résidus consiste à construire un espace de parité obtenu en effectuant une projection, orthogonale à l'espace des observations, des relations du modèle de référence.

Cette approche a été initialement proposée par Evans et Wilcox (1970) dans le cas de la redondance matérielle et a été développée pour les systèmes statiques [POTT 77]. Une première synthèse de ces méthodes a été proposée par Chow [CHOW 80]. Le concept d'espace de parité a été généralisé, dans le cas de l'utilisation de la redondance temporelle [LABA 80], [MIRO 80], [CHOW 84].

Estimation d'état. L'erreur d'innovation d'un filtre de Kalman [WILL 76] ou l'erreur de prédiction d'un observateur d'ordre plein ou réduit [CLAR, 75, 78-a] peut être utilisée comme résidu pour la détection et la localisation de défauts. Les moyennes de ces résidus sont nulles en l'absence de défauts et deviennent différentes de zéro lors de l'apparition d'un défaut. La localisation de défauts consiste à établir une banque de filtres, chacun conçu de façon à générer un résidu ou un sous-ensemble de résidus sensibles à une situation de défaut [CLAR 78-a], [FRAN 87].

D'autres travaux de diagnostic fondés sur les observateurs ont été développés, dans le cas des systèmes linéaires dynamiques à retard [HANL 98], dans le cas des systèmes bilinéaires [YU 96], [YANG 97], et finalement dans le cas des systèmes non linéaires [FRAN 90], [ALCO 97], [ASHT 99], [HAMM 99], ZHOU 99].

Estimation paramétrique. Cette approche représente une technique naturelle pour la détection et la localisation de défauts paramétriques (multiplicatifs). Un modèle de référence est obtenu en identifiant le système en fonctionnement normal. Ensuite, les paramètres sont identifiés en ligne d'une façon répétitive. Une déviation des paramètres du modèle réel est révélatrice de l'apparition d'un défaut [ISER 84, 91]. Diverses contributions ont été apportées dans ce domaine, citons notamment les travaux de Basseville [BASS 87], Benveniste [BENV 87], Delmaire [DELM 94] et Gertler [GERT 95-b].

Nous pouvons noter qu'il existe une équivalence entre la conception basée sur les relations de parité et les observateurs, du fait que les deux techniques génèrent des résidus identiques si les générateurs ont été construits pour les mêmes spécifications [FRAN 90], [GERT 91], [PATT 91-b], [STAR 91], [MAGN 94], [NUNI 97]. Des auteurs ont prouvé, sous certaines

conditions, des liens entre les approches de l'espace de parité et de l'estimation paramétrique [GERT 95-b], [DELM 94].

1.3.4. Robustesse des techniques de détection et de localisation

Les indicateurs de défauts sont toujours affectés par des effets inévitables (bruits, perturbations, erreurs de modélisation, etc ...) cités précédemment. Désensibiliser les résidus vis à vis de ces effets est un aspect très important pour concevoir un algorithme de détection et de localisation. En particulier :

- Pour éliminer l'effet du bruit, les résidus peuvent être filtrés,
- Un découplage des perturbations peut être établi dans la structure du générateur des résidus, mais cela peut influencer d'une façon néfaste sur les performances de la tâche de localisation,
- La robustesse vis à vis des erreurs de modélisation est le problème le plus fondamental pour les algorithmes de détection fondés sur des modèles. Plusieurs méthodes s'appuyant sur l'optimisation sont disponibles. Malheureusement, ce problème ne se prête pas à une solution simple et les techniques connues sont efficaces seulement sous certaines conditions.

La robustesse des algorithmes de diagnostic a été initiée par Chow et Willsky [CHOW 84] et ses techniques ont été développées plus tard par Frank [FRAN 91, 92], Patton [PATT 94], Saïf [SAIF 98], Shen *et al.* [SHEN 98] et Jiang *et al.* [JIAN 99].

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons rappelé les différents types de défauts ainsi que les méthodes de surveillance représentant une étape de base pour la commande et l'estimation d'état d'un système en présence de défaillances. Certaines méthodes fondées sur des modèles disposent d'un ensemble de résidus qui expriment la redondance d'information observée sur un système. D'autres n'utilisent pas de modèles telles que les méthodes par reconnaissance des formes.

Lorsque les défaillances ont été détectées, localisées et diagnostiquées, une décision doit être prise : continuer, réparer, arrêter ... Les approches de la tolérance aux fautes (accommodation/reconfiguration) permettront de répondre à un tel problème. Le chapitre suivant fera l'objet d'une description de différentes méthodes de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes.

Chapitre 2

Méthodes de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes et de la supervision

2.1. Introduction

Ce chapitre présente quelques techniques de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes. Cette étude est fondée sur les travaux de Staroswiecki et Gehin [STAR 00] qui ont proposé une description complète du problème, partant de la commande robuste, aboutissant au concept de la tolérance aux fautes et de la supervision. L'état de l'art de méthodes de commande en vue de la tolérance aux fautes a été élaboré par Patton *et al.* [PATT 97]. Deux catégories d'approches ont été distinguées : "**passives**" et "**actives**". L'approche passive est assez limitée parce qu'elle est fondée sur la commande robuste et ne tient pas compte des défaillances en ligne. L'approche active est plus tolérante et offre un potentiel plus large, en particulier lorsque le module de détection et de localisation de défauts fonctionne correctement.

Une fois le problème de commande posé, on décrit dans le paragraphe 2 une démarche pour la classification des méthodes de commande selon les contraintes imposées (incertitudes des paramètres ou de modélisation, perte d'information, ...). Cette classification est rattachée aux notions d'**accommodation** et de **reconfiguration** :

- L'accommodation consiste à poursuivre de façon continue, ou reprendre, la mission sans remettre en cause ses objectifs ; cela suppose qu'il est possible de corriger, ou d'annuler les effets des défauts, soit par compensation des erreurs, soit par ajustement du régulateur du système ou du sous-système contenant l'élément défaillant, soit par une procédure de reprise à partir d'un état initial connu.

- La reconfiguration consiste à poursuivre la mission en reconfigurant le système, ou changer de mission en reconfigurant ses objectifs; cela suppose qu'il existe une reconfiguration permettant d'atteindre les nouveaux objectifs fixés.

Dans le paragraphe 3, nous proposons une classification des méthodes d'estimation en vue de la tolérance aux fautes.

2.2. Problème de commande

Avant d'aborder la synthèse et la classification de différentes méthodes de commande, on définit le problème de commande en fonction de son environnement.

2.2.1. Position du problème de commande

Le problème de commande [DUGA 88] dépend de trois entités, qui sont :

- Une *classe de commandes* U ,
- Un *objectif* γ ,
- Un ensemble de *contraintes* C (cet ensemble comprend les équations d'état et de mesure et d'autres contraintes).

La résolution du problème revient à rechercher, dans la classe U , une commande permettant d'atteindre l'objectif γ tout en respectant les contraintes C . Lorsque ce problème admet plusieurs solutions, il est possible d'utiliser un critère J , pour choisir la meilleure, appelée commande optimale.

Considérons un système linéaire continu (ou discret), donné par :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t) + Ef(t) + Gd(t) \\ y(t) &= C(\theta)x(t) + D(\theta)u(t) + Ff(t) + Hd(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

où θ est le vecteur de paramètres associé au système, $x \in R^n$ le vecteur d'état, $u \in R^m$ l'entrée de commande, $d(t) \in R^s$ représente toutes les perturbations ou incertitudes influençant les dynamiques du système ou les mesures, $f(t)$ est un vecteur inconnu symbolisant les effets d'un

défaut (capteurs et actionneurs) et les matrices A, B, C, D, E, F, G et H sont de dimensions appropriées.

Le problème de commande en boucle ouverte peut être décrit par :

- Deux variétés $V(x_0, t_0)$ et $V(x_f, t_f)$ dans \mathfrak{R}^{n+1} ; l'objectif γ consiste à transférer le système de $V(x_0, t_0)$ à $V(x_f, t_f)$.
- U l'ensemble des applications v de $[t_0, t_f]$ dans \mathfrak{R}^m , définissant la commande $u(t)$,
- Les contraintes données par (2.1).

Le plus souvent, la solution du problème en boucle ouverte ne permet pas d'obtenir le résultat souhaité. En effet, le modèle ne représente pas toute la réalité : certaines fonctions ne sont que des approximations de fonctions plus complexes, la valeur des paramètres est entachée d'erreur, des interactions avec l'environnement n'ont pas pu être modélisées,

En tenant compte de l'état réel du système (tel qu'il peut être reconstitué grâce aux capteurs) et non de l'état que l'on devrait avoir si le modèle était parfait, la commande en boucle fermée permet dans une certaine mesure de s'affranchir de ces problèmes. La formulation du problème de commande en boucle fermée serait identique à celle présentée plus haut, à la différence que la classe U devient une classe d'applications de Y dans \mathfrak{R}^m , où Y désigne l'espace image de \mathfrak{R}^n par g (cf. équation de la mesure).

Ainsi, pour une classe U donnée, l'objectif γ et les contraintes C définissent entièrement un problème de commande. Dans les contraintes, on peut distinguer leur *structure* et leurs *paramètres* (θ). Alors, pour une classe donnée, un problème de commande est défini par le triplet $\langle \gamma, s, \theta \rangle$ où γ désigne l'objectif poursuivi, s la structure des contraintes et θ leurs paramètres (un problème de commande optimale est défini par le quadruplet $\langle \gamma, s, \theta, J \rangle$). Remarquons que les notions d'objectif, de structure et de paramètres peuvent de toute évidence être utilisées pour des classes de systèmes plus complexes (non linéaires par exemple) que celle définies par les équations (2.1).

Dans la littérature, on trouve beaucoup de méthodes qui cherchent à résoudre le problème de commande dans des conditions diverses. Dans la suite, selon la description que l'on vient de citer, on va classifier ces méthodes selon leur capacité à tolérer les fautes. Cette

organisation nous permet de décrire ce concept partant de la commande robuste, aboutissant à la tolérance aux fautes et à la supervision.

2.2.2. *Approches passives et adaptatives*

Une première généralisation du problème de commande consiste à le définir non plus par la donnée d'un triplet $\langle \gamma, s, \theta \rangle$ mais par celle d'un ensemble de triplets $\langle \gamma, s, \Theta \rangle$, où Θ désigne un ensemble de valeurs possibles des paramètres θ . Il convient alors d'atteindre l'objectif γ , tout en respectant des contraintes dont la structure est s , mais dont les valeurs des paramètres θ ne sont pas connues, et peuvent appartenir à l'ensemble Θ . L'interprétation pratique de ce problème revient à considérer que les paramètres du système peuvent varier dans le temps (vieillessement) dans certaines limites définies par Θ , où que cet ensemble modélise l'incertitude sur leur valeur réelle, où que les erreurs de structure du modèle puissent se ramener à une telle présentation. Pour résoudre le problème $\langle \gamma, s, \Theta \rangle$, on distingue :

- les approches passives, basées sur la commande robuste [OUST 93, 94] et la stabilisation simultanée des systèmes [VIDY 82], [GHOS 83], [HOWI 91], [PETE 87], [NOUR 93],
- la commande adaptative (considérée comme une commande active) [DUGA 88].

2.2.2.1. *Approches robustes*

Principe. La commande robuste est un problème d'optimisation visant à minimiser un critère de dispersion des résultats pour toutes les valeurs possibles des paramètres $\theta \in \Theta$. L'élaboration d'une telle loi de commande permet de rendre le système insensible aux incertitudes paramétriques. L'objectif est de garantir la stabilité et un niveau de performance acceptable pour les systèmes commandés malgré des incertitudes sur les paramètres et/ou des dynamique négligées dans le modèle du processus.

L'insensibilité et la robustesse d'un système vis à vis des perturbations et des erreurs de modélisation est un problème souvent difficile à résoudre. Il n'est pas possible d'obtenir une parfaite égalité entre le modèle mathématique et le processus réel, et une description précise

des perturbations introduites par l'environnement (entrées non modélisées, ...); ce qui limite l'efficacité de ce type d'approches en présence d'un défaut.

Les approches robustes ont fait l'objet de nombreux travaux. Selon le type d'incertitudes paramétriques considérés, nous pouvons citer une brève classification de quelques méthodes. En effet, dans le cas où les incertitudes paramétriques sont structurées, les approches utilisées généralement sont la méthode QFT (Quantitative Feedback Theory) [HORO 85], [KEAT 95] et la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) [OUST 93]. Lorsque ces incertitudes sont non structurées (majoration d'une norme), on peut citer des méthodes telles que l'optimisation à sensibilité mixte [VERM 84], [KWAK 93] et la synthèse H_∞ [DOYL 92], [KWAK 93], [TYLE 94], [MURA 96], [NIEM 97], [STOU 97].

Les incertitudes portant sur les matrices de la représentation d'état du système sont notamment utilisées par les approches quadratiques [STEI 87], [TAKH 87], [WU 98].

Des approches multimodèles peuvent aussi être utilisées afin de considérer tous les états paramétriques possibles sans qu'un pessimisme ne soit introduit. C'est le cas du placement de valeurs et vecteurs propres [MAGN 94-a], ou encore du placement de pôles avec calibrage des fonctions de sensibilités [MORA 89], [LAND93]. L'évolution des paramètres du procédé quand elle peut être mesurée permet aussi d'élaborer des commandes robustes linéaires à paramètres variants. Néanmoins, sans que les incertitudes soient explicitement prises en compte, il est souvent possible de synthétiser une commande robuste en utilisant le placement de pôles [M'SAA 96].

Au regard de l'ensemble des techniques existantes, deux grandes familles de commandes robustes se dessinent, celle résultant des approches fréquentielles et celle issue des approches temporelles.

Degré de tolérance aux fautes. La tolérance aux fautes de ces méthodes est assez limitée. En effet, en boucle fermée, la loi de commande peut être tolérante à certains types de défauts et surtout aux incertitudes paramétriques du système.

2.2.2.2. Approche par stabilisation simultanée de systèmes

Principe. Soient les systèmes décrits par les fonctions de transfert, $T_1(s)$, $T_2(s)$, ..., $T_n(s)$. $T_0(s)$ représente le fonctionnement nominal du système et $T_1(s)$, ..., $T_n(s)$ en présence de n défaillances différentes. La question se pose de la manière suivante: existe-t-il un régulateur K , tel que le système $T_i(s)[I + K(s)T_i(s)]^{-1}$, $i = 1, \dots, n$, soit stable?. Donc, le problème revient à déterminer un seul régulateur capable de garder le système stable après l'apparition d'un défaut.

La figure suivante montre le schéma de régulation des n systèmes.

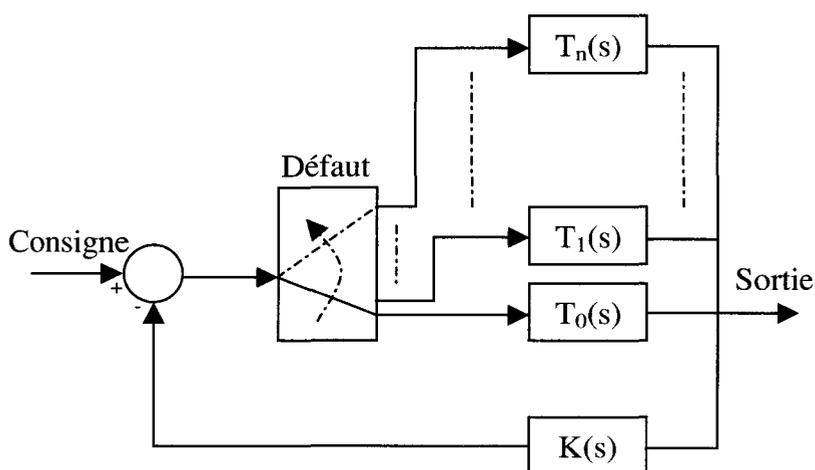


Figure 2.1. Approche par stabilisation simultanée

A la suite des travaux de Youla *et al.* [YOUL 74], donnant la condition nécessaire et suffisante pour qu'un système puisse être stabilisé par un régulateur asymptotiquement stable, plusieurs auteurs ont traité le problème de la stabilisation simultanée des systèmes. Un critère géométrique a été proposé par Saeks et Murray [SAEK 82] pour résoudre ce problème. Cependant, leur solution est difficile à mettre en œuvre dans le cas où $n > 2$. Vidyasagar et Viswanadham [VIDY 82] ont démontré que le fait de stabiliser simultanément $n+1$ systèmes est équivalent à stabiliser simultanément n systèmes en utilisant un régulateur stable. Plus tard, Ghosh et Byrnes [GHOS 83], puis Howitt et Luus [HOWI 91] ont cherché à stabiliser simultanément une famille de systèmes linéaires décrits sous forme de fonctions de transfert à l'aide d'un régulateur linéaire. L'utilisation d'un régulateur non linéaire pour stabiliser

simultanément une famille de systèmes linéaires sous forme d'état, a été traitée par Petersen [PETE 87]. Noura *et al.* [NOUR 93] ont étudié le problème de la stabilisation simultanée dans le cas où $n=2$, tout en gardant les performances proches des performances nominales.

2.2.2.3. Approches adaptatives

Principe. La "commande adaptative" [DUGA 88], [LAND 97] est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement automatique en temps réel des régulateurs, afin de maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres θ du procédé à commander sont soit inconnus soit/et varient avec le temps. Elle utilise des méthodes d'identification en ligne pour estimer régulièrement la valeur des paramètres θ et résoudre le problème $\langle \gamma, s, \theta^* \rangle$, où $\theta^* \in \Theta$ est l'estimation de θ .

Le principe d'un système de commande adaptative peut être illustré par la figure suivante :

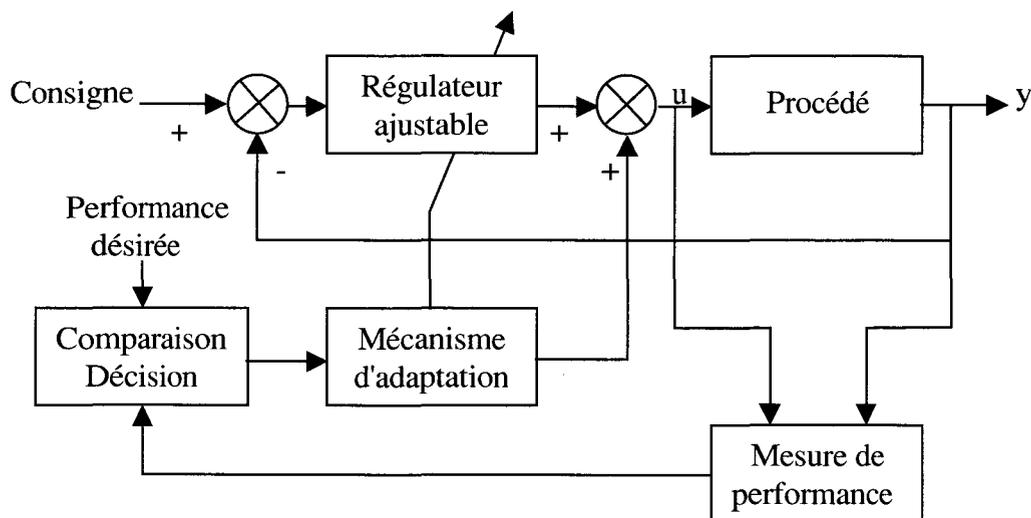


Figure 2.2. Principe général d'un système de commande adaptative

On distingue deux approches principales pour la commande adaptative :

- Commande adaptative directe : les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de comparaison entre performances réelles et performances

désirées. Comme exemple, on cite la méthode de commande adaptative à modèle de référence implicite [HUAN 90], et explicite [MORS 90].

- Commande adaptative indirecte : les paramètres du processus sont estimés par une procédure d'identification, c'est le cas des régulateurs auto-ajustables (commande par placement de pôles adaptatifs). Ce type de commande adaptative est plus utilisé que le premier du fait qu'il tient compte des caractéristiques d'évolution du processus. Comme exemple, nous pouvons citer deux méthodes appliquées au domaine de l'aéronautique, l'approche de la linéarisation de la rétroaction [OCHI 91, 93] et la méthode basée sur un régulateur hybride [AHME 91].

Degré de tolérance aux fautes. La tolérance aux fautes de ces méthodes est encore limitée. Par comparaison avec les commandes passives (robuste et par stabilité simultanée), les techniques de la commande adaptative sont plus tolérantes parce que le calcul de la loi de commande dépend de l'état actuel des paramètres du procédé.

2.2.3. Commande hybride

Une deuxième généralisation consiste à considérer le problème $\langle \gamma, S, \Theta, A \rangle$ où S et Θ sont respectivement un ensemble de structures et un ensemble de paramètres, et A est un automate. Il convient alors d'atteindre l'objectif γ tout en respectant des contraintes dont la structure appartient à S et dont les paramètres appartiennent à Θ . L'interprétation pratique la plus simple de ce problème concerne la classe des systèmes hybrides [ANTS 98]. Ces systèmes présentent différentes configurations, dont chacune correspond à un ensemble de contraintes caractérisées par un couple (s_i, θ_i) . Le passage d'une configuration à une autre est défini par l'automate A modélisant la partie discrète, et a pour effet de remplacer un ensemble de contraintes par un autre dans le problème de commande. Le plus souvent, l'objectif γ est lui-même décomposé en une séquence d'objectifs γ_i correspondant chacun à une configuration du système, de sorte que le problème global de commande se ramène à une séquence de problèmes $\langle \gamma_i, s_i, \theta_i \rangle$ dont l'enchaînement est défini par l'automate A . Un exemple d'un tel automate peut être décrit par la figure suivante :

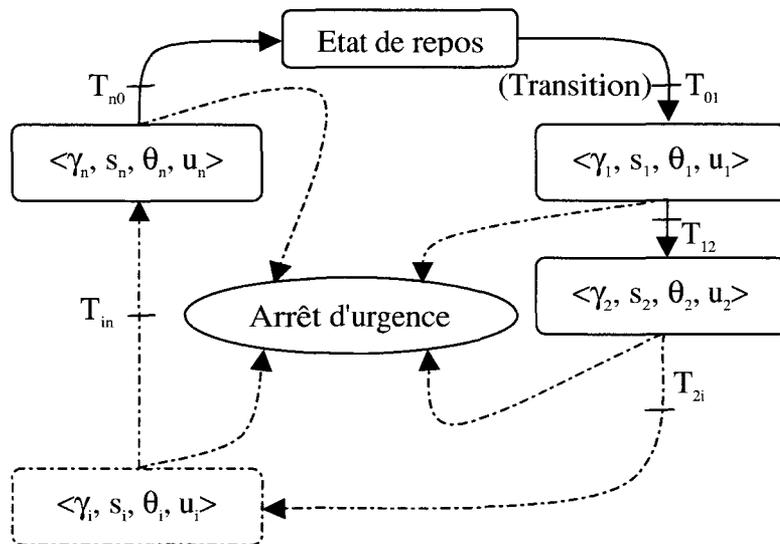


Figure 2.3. Représentation d'une commande hybride par un automate

T_{ij} représente une transition d'une configuration i à une configuration j .

2.2.4. Commande tolérante aux fautes

Une version plus complexe de la généralisation précédente est le problème $\langle \gamma, S, \Theta \rangle$ dans lequel aucune connaissance n'est disponible sur l'enchaînement des différents ensembles de contraintes (s_i, θ_i) . L'interprétation pratique est qu'il convient d'atteindre l'objectif γ , sous des contraintes dont la structure et les paramètres sont inconnus et peuvent appartenir respectivement aux ensembles S et Θ . On retrouve ici une généralisation du problème de la commande robuste ou adaptative dans laquelle non seulement les paramètres mais aussi la structure du système peuvent changer. C'est le cas lorsqu'on considère des systèmes dans lesquels des défaillances peuvent survenir : une faute multiplicative, par exemple, se traduit par une modification de la valeur d'un paramètre alors qu'une faute additive se traduit par un changement de structure. Pour résoudre le problème $\langle \gamma, S, \Theta \rangle$, différentes approches peuvent être définies [PATT 97]. Une démarche recherchant la robustesse (atteindre l'objectif, ou s'en approcher au mieux, quel que soit le couple (s, θ) actif) est manifestement irréaliste dans ce cas. L'accommodation des défaillances et la reconfiguration de la commande constituent deux approches plus réalistes.

En effet, les algorithmes de surveillance permettent de détecter et de localiser les défaillances, et donc d'identifier le couple (s, θ) réel. L'accommodation des défaillances est

une démarche qui permet d'atteindre l'objectif en modifiant la commande ; cela signifie qu'il existe une solution au problème de commande $\langle \gamma, S_{réel}, \theta_{réel} \rangle$. La reconfiguration de la commande, quant à elle, repose sur la mise en œuvre d'une autre structure (Σ, Π) , supposée exister, telle que le problème $\langle \gamma, \Sigma, \Pi \rangle$ ait une solution. On peut remarquer que la démarche de tolérance aux fautes par reconfiguration de la commande pose par nature un problème de gestion des comportements transitoires associés aux changements de structure du système.

2.2.4.1 Problème d'accommodation des défaillances

De nombreux travaux ont été consacrés au problème d'accommodation des défaillances, parmi lesquels nous pouvons citer :

- Approches heuristiques [HAND 89], [GARC 89, 90],
- Modification de la loi de commande [MOER 89], [SHAM 92], [LAWR 95], [KAMI 95],
- Méthode de la pseudo-inverse [GAO 90, 91],
- Accommodation par placement de pôles adaptatifs [NOUR 94],
- Méthode fondée sur la synthèse H_2 [LARM 93].

Dans la suite, nous allons développer seulement les trois premières approches.

2.2.4.1.1. Approches heuristiques

Nous distinguons deux approches :

1. la première utilise les systèmes experts,
2. la deuxième utilise les techniques d'apprentissage.

2.2.4.1.1.1. Approche basée sur les systèmes experts

L'idée de base de cette approche est de développer une technique de commande qui permet de détecter, d'identifier et d'accommoder un grand nombre des défauts potentiels. Son objectif principal est d'éliminer l'effet d'un comportement anormal dû aux défaillances de capteurs, d'actionneurs ou d'autres composants structurels du système. La figure 2.4. illustre une solution à ce problème.

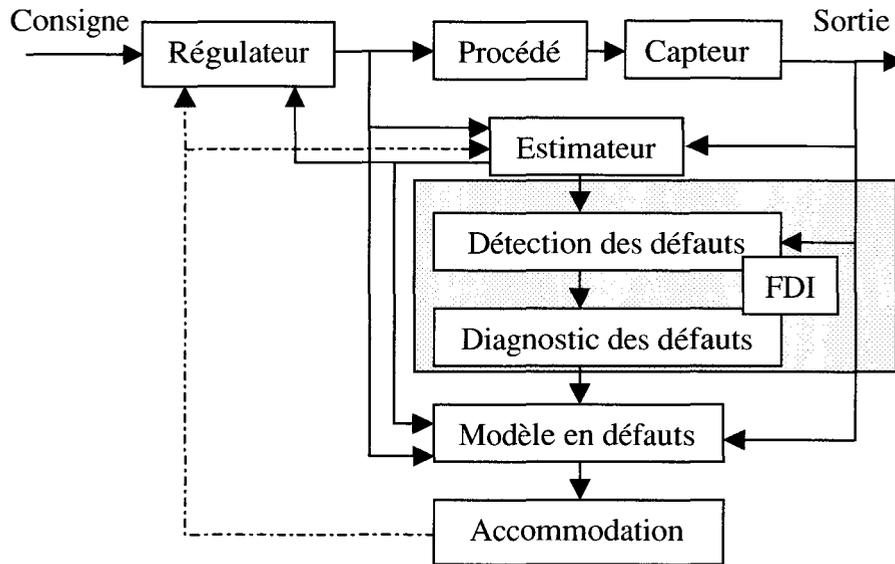


Figure 2.4. Organisation d'un système de commande

La phase d'accommodation est partagée en cinq tâches :

- Commande exécutive (régulateur, estimateur) : estimation dynamique continue de l'état, calcul de la loi de commande et synchronisation des autres tâches,
- Détection des défauts,
- Diagnostic des défauts : recherche des causes et des effets probables des défaillances,
- Estimation d'un modèle défaillant : génération d'un modèle mathématique du système défaillant en se basant sur la tâche de diagnostic, les mesures réelles et l'estimateur,
- Accommodation : détermination d'une action corrective du système en défaut. Cette action peut être une des règles heuristiques prédéfinies ou bien un ajustement de la loi de commande par une approche analytique (pseudo-inverse (cf. 2.2.4.3.), ...).

Handelman [HAND 89] a proposé une méthode utilisant une combinaison de la redondance analytique et des systèmes experts afin de détecter et de localiser un grand nombre de défauts et de pouvoir les accommoder en ligne. Cette approche est efficace pour des défauts additifs importants d'actionneurs ou de capteurs mais reste non valable pour les défauts de composants du système.

Le système expert utilisé exige :

- une base de connaissance contenant toutes les informations relatives à l'état du système sous forme de paramètres et de règles.
- Un moteur d'inférence qui cherche les valeurs des paramètres en testant les différentes règles.

2.2.4.1.1.2. Techniques d'apprentissage

L'objectif de ces techniques est de contrôler les performances du système de commande de façon continue. La structure de la loi de commande peut être reconfigurée, et les modules individuels d'apprentissage sont utilisés pour intégrer la décision et la commande.

Il s'agit de choisir un régulateur parmi les régulateurs conçus *a priori* [GARC 89]. Les lois de commande possibles peuvent être calculées en utilisant les techniques temporelles ou fréquentielles [AMDE 90], [DONA 73], la logique floue [BERN 89] ou une technique heuristique simple.

Un tel automate interagit avec l'environnement et donne des solutions environnementales compatibles en temps réel. La stratégie peut être élaborée en plusieurs étapes :

- identification de l'état actuel du système,
- évaluation des performances de commande actuelle,
- réactualisation de la loi de commande en choisissant une action spécifique sur l'ensemble d'actions disponibles,
- récompense ou pénalisation de l'automate en fonction des performances résultantes.

Dans le cas où l'environnement est inconnu, des automates stochastiques sont choisis [NARE 74, 89]. La figure 2.5. montre la structure d'un module d'apprentissage :

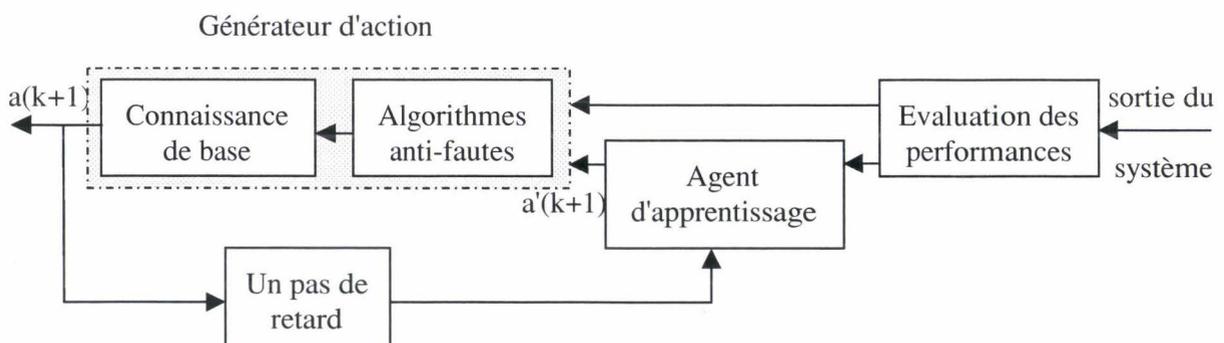


Figure 2.5. Module d'apprentissage

Le module d'apprentissage permet au système de commande de s'adapter à tout changement dans les conditions de fonctionnement du processus. Lorsqu'un changement apparaît suite à la présence d'un défaut, le module d'apprentissage évalue les performances du système et sélectionne le régulateur approprié pour permettre au système d'atteindre les performances souhaitées. Le temps de réponse dépend de l'exécution de la commande choisie lors du changement dans le fonctionnement du procédé.

Ce module est composé de trois parties :

- évaluateur de performances : interprète les performances actuelles du système pour un régulateur donné, en se basant sur les mesures de la sortie.
- agent d'apprentissage : utilise des automates stochastiques. A l'instant k , une commande est calculée pour l'instant $k+1$. Les entrées de ce module sont la réponse décisive du bloc "évaluation des performances".
- Générateur d'action : implante un régulateur sur le système.

2.2.4.1.2. Modification de la loi de commande

Cette méthode consiste à utiliser simultanément : des algorithmes de FDI, de l'estimation d'état pour reconfigurer le régulateur et les lois de commandes (paramètres ou structure) calculées et stockées en mémoire [MOER 89].

Cette méthode a fait l'objet de nombreux travaux, parmi lesquels, citons [MOER 89], [SHAM 92], [RUGH 91], [LAWR 95], [KAMI 95]. Elle a été appliquée essentiellement aux systèmes de navigation aérienne "CRCA aircraft".

Malgré l'efficacité de cette méthode dans le cas d'un défaut d'actionneur, deux inconvénients se présentent :

- Robustesse de FDI : Les gains de commande sont ajustés par compensation. Cet ajustement est une action en boucle ouverte, parce qu'il n'existe pas de retour qui compense l'action incorrecte. En effet, une fausse alarme ou une fausse localisation peut rendre le système instable ; cela implique que la bonne action est très liée à la robustesse des ces algorithmes. Zheng *et al.* [ZHEN 97] se sont intéressé à cette robustesse pour améliorer l'efficacité de cette méthode.

- Cette méthode est très restrictive. En effet, en présence de défauts imprévus, il devient nécessaire de faire appel à une autre approche pour pallier le fait que la base de données ne contient pas tous les types de défauts.

2.2.4.1.3. Méthode de la pseudo-inverse

La méthode de la pseudo-inverse consiste à calculer la pseudo-inverse de certaines matrices pour déterminer une nouvelle loi de commande. Cette méthode est alternative aux approches par modèle de référence. Cette dernière se réfère toujours à un modèle de base (en utilisant la trajectoire de sortie), tandis que l'approche pseudo-inverse consiste à modifier le gain de commande de telle façon que le système accommodé se rapproche le maximum possible du système nominal. Cette méthode a été utilisée par [HUBE 84], [CAGL 88a], [OSTR 85], [RATT 85], [RAZA 85].

La figure 2.6. illustre le schéma général de ces méthodes :

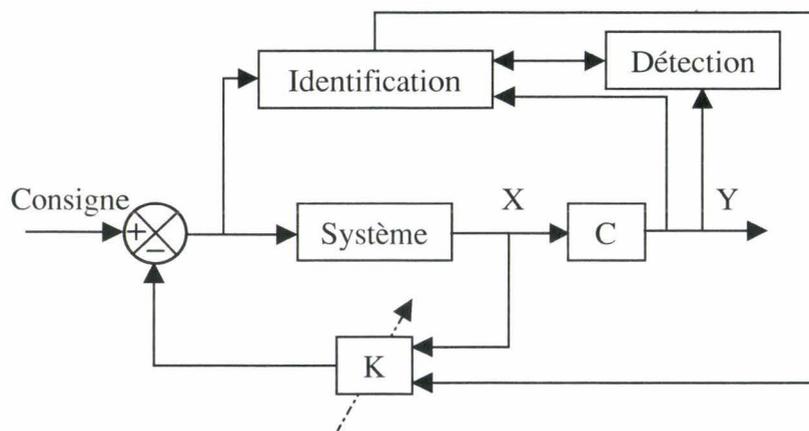


Figure 2.6. Méthode de la pseudo-inverse

La loi de commande en boucle fermée s'écrit :

$$u_M = K_M x_M \tag{2.2}$$

où $K_M \in \mathcal{R}^{m \times n}$.

Le système en boucle fermée est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}_M = (A_M + B_M K_M)x_M(t) \\ y_M = C_M x_M(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

Supposons que le système défaillant en boucle fermée s'écrive :

$$\begin{cases} \dot{x}_f = (A_f + B_f K_f)x_f(t) \\ y_f = C_f x_f(t) \end{cases} \quad (2.4)$$

où K_f est la nouvelle matrice de gain à déterminer dans le cas de défaillances.

Cette méthode est facile à mettre en œuvre à cause de la simplicité de calcul du nouveau gain. Une mesure de proximité entre les systèmes avant et après l'apparition du défaut peut être donnée par la norme de Frobenius :

$$\delta = \|(A_M - A_f) + (B_M K_M - B_f K_f)\| \quad (2.5)$$

Gao *et al.* [GAO 90, 91] ont montré qu'en minimisant cette norme, les sauts de variations des valeurs propres en boucle fermée dus aux défauts sont minimisés.

La méthode de Ostroff *et al* [OSTR 85] est basée sur la détermination du gain K_f telle que la matrice de transition en boucle fermée du système défaillant (2.4) se rapproche de la matrice de transition du système nominal décrit par (2.3). On en déduit l'approximation du gain K_f :

$$K_f = B_f^+(A_M - A_f + B_M K_M) \quad (2.6)$$

où B_f^+ est la matrice pseudo-inverse de B_f . K_f peut être déduit donc de l'équation précédente pour plusieurs types des défauts. Les résultats obtenus sont mémorisés et peuvent être utilisés ultérieurement selon le cas de défaillances.

Cette méthode d'accommodation a été utilisée en aéronautique [CAGL 88b], [HUBE 84], [OSTR 85], [RATT 85]. Cependant, la stabilité du système défaillant n'est pas toujours assurée, ce qui risque de conduire à des résultats catastrophiques.

Pour remédier à ce problème, Gao *et al.* ont développé la méthode de la pseudo-inverse modifiée (MPIM). Le but principal est le maintien de la stabilité du système en boucle fermée

tout en rapprochant le mieux possible les performances du système défaillant de celles du système nominal ; ceci revient à minimiser la norme δ sous les contraintes de stabilité [BARM 88], [YEDA 88], [ZHOU 87].

On suppose que la paire (A_f, B_f) est une forme stabilisable (partie non commandable asymptotiquement stable). Dans le cas contraire, on peut stabiliser le système en utilisant des boucles internes.

On suppose que les perturbations sur les variables d'état sont modélisées par ΔA :

$$\begin{cases} \dot{x}_M = (A_M + \Delta A_M)x_M(t) + B_M u_M(t) \\ y_M = C_M x_M(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

La condition de stabilité est donnée par :

$$|K_f(i, j)| < \delta, (i = 1, 2, \dots, m \ \& \ j = 1, 2, \dots, n) \quad (2.8)$$

Gao et Antsaklis [GAO 91] ont décrit dans leurs travaux comment la borne δ peut être déterminée en utilisant la méthode de Zhou [ZHOU 87] ou la méthode de Yedavalli [YEDA 88].

L'algorithme d'application de la méthode de la pseudo-inverse modifiée est le suivant :

- Calculer le gain K_f en utilisant l'équation (2.6),
- Tester la stabilité du système (2.8) pour la valeur du gain calculé,
- Si le système est stable, fin; Sinon $K_f = \text{sgn}(|K_f(i, j)|)\delta$.

Les méthodes *PIM* et *MPIM* présentent des inconvénients au niveau pratique.

Robustesse des algorithmes de détection et de localisation (FDI). Les méthodes de *PIM* ne parlent pas de la robustesse des algorithmes *FDI*, pourtant ces méthodes dépendent beaucoup de la connaissance des défauts.

Limitation à l'état de retour. Les méthodes *PIM* supposent que l'état a une structure bien définie. Dans les applications réelles de commande, les variables d'état ne sont pas toujours accessibles, ce qui limite l'utilisation des méthodes *PIM* et *MPIM*.

2.2.4.2 Problème de reconfiguration

Comme nous l'avons défini au début de ce paragraphe (2.2.4.), la reconfiguration de la loi de commande consiste à trouver une solution, supposée exister, au problème $\langle \gamma, \Sigma, \Pi \rangle$, où (Σ, Π) représente une configuration du système. La configuration (Σ, Π) ne contient pas les composants défectueux du processus (un composant peut être un capteur, un actionneur ou un autre élément du processus). Le problème de reconfiguration revient donc à étudier la capacité du modèle du système en défaut à tolérer le défaut en question. Cette capacité dépend des propriétés structurelles du modèle lui-même.

Rares sont les travaux qui posent le problème de reconfiguration avec clarté. Dans la littérature, on trouve toujours une confusion entre *accommodation* et *reconfiguration*. Récemment, Wu *et al.* [WU 00] ont lié l'efficacité d'une commande tolérante aux fautes aux notions de redondance existante sur le processus. Pour mesurer le niveau de redondance, ils ont utilisés les modes du deuxième ordre d'un modèle (cf. Annexe A). Pour des systèmes linéaires dynamiques à temps invariant, le plus petit mode du deuxième ordre a été utilisé pour mesurer la **reconfigurabilité** (cf. Annexe A), i. e. la potentialité d'un processus à maintenir certaines performances pendant la reconfiguration de la loi de commande en présence du pire des défauts considérés ; les défauts ont été considérés comme des paramètres. Il faut noter que la notion de reconfigurabilité est indépendante de la définition de « **recouvrabilité** », donnée récemment par Frei *et al.* [FREI 99], qui est une sorte de mesure de commandabilité ou d'observabilité d'un système dégradé.

L'analyse de la tolérance aux fautes d'un système d'actionneurs à maintenir les propriétés de commandabilité fera en partie l'objet de la deuxième partie de ce mémoire. Quelles que soient les techniques de commandes utilisées, cette analyse est essentielle pour connaître la capacité d'une configuration à tolérer les défauts ; les défauts considérés correspondent aux pertes d'actionneurs.

2.2.5. Supervision

Le dernier degré de généralisation que nous puissions envisager consiste à considérer le problème $\langle \Gamma, S, \Theta \rangle$, où Γ , S et Θ sont respectivement des ensembles d'objectifs, de

structures et de paramètres. Son interprétation pratique nous conduit à le proposer comme définition du problème de supervision. En effet, ce dernier se distingue de la commande tolérante aux fautes par le fait que l'objectif du problème de commande n'est pas fixé à l'avance, mais qu'il est à déterminer en fonction des possibilités du système. Au problème de commande se superpose donc un problème de décision, qui justifie le recours aux opérateurs humains. Le problème de supervision peut alors se formuler comme un problème de commande tolérante aux fautes associé à un problème de reconfiguration de l'objectif.

- Commande tolérante aux fautes

L'objectif γ étant donné, il s'agit de résoudre le problème de commande tolérante aux fautes $\langle \gamma, S, \Theta \rangle$, c'est à dire de déterminer le couple (s, θ) réel, et chercher une solution au problème de commande $\langle \gamma, s_{réel}, \theta_{réel} \rangle$.

a) Si (s, θ) réel définit les contraintes nominales, on est en situation de conduite normale, et le problème a une solution.

b) Si (s, θ) réel traduit l'existence de défaillances, l'existence d'une solution au problème $\langle \gamma, s_{réel}, \theta_{réel} \rangle$ n'est pas assurée. Si une solution existe, la commande correspondante permet d'atteindre l'objectif sous des contraintes non nominales, il s'agit d'accommodation de la commande. Dans le cas contraire, le problème de supervision revient à rechercher parmi les couples (s, θ) faisables un couple (Σ, Π) tel que le problème $\langle \gamma, \Sigma, \Pi \rangle$ ait une solution. Celle-ci permet donc d'atteindre l'objectif γ moyennant une reconfiguration du système qui se traduit par la modification des contraintes (s, θ) en (Σ, Π) . Si aucun couple (Σ, Π) ne permet de produire de solution au problème $\langle \gamma, \Sigma, \Pi \rangle$, cela signifie que l'objectif γ ne peut être atteint par une commande issue d'une reconfiguration du système. Il n'existe alors pas de commande qui soit tolérante aux défaillances présentes dans le système.

- Reconfiguration de l'objectif

Lorsque le problème de commande tolérante aux fautes n'a pas de solution pour l'objectif γ , la seule possibilité permettant aux opérateurs de continuer à piloter le système est de modifier

son objectif (par exemple passer du mode production au mode arrêt d'urgence). Il s'agit d'un problème de décision : trouver un triplet $\langle \Omega, \Sigma, \Pi \rangle$ tel que le problème de commande ait une solution. De tels triplets peuvent être particulièrement nombreux, et le problème de décision doit alors s'appuyer sur un (ou plusieurs) critère(s) de choix, dont la définition reste un problème largement ouvert.

2.3. Problème d'estimation

2.3.1. Position du problème d'estimation

Un problème d'estimation est défini par l'instanciation de trois entités, un ensemble d'observations O constitué de commandes et de sorties, un ensemble de contraintes C (modèle du processus et d'autres contraintes) et un critère d'optimisation. (figure 2.7.) :

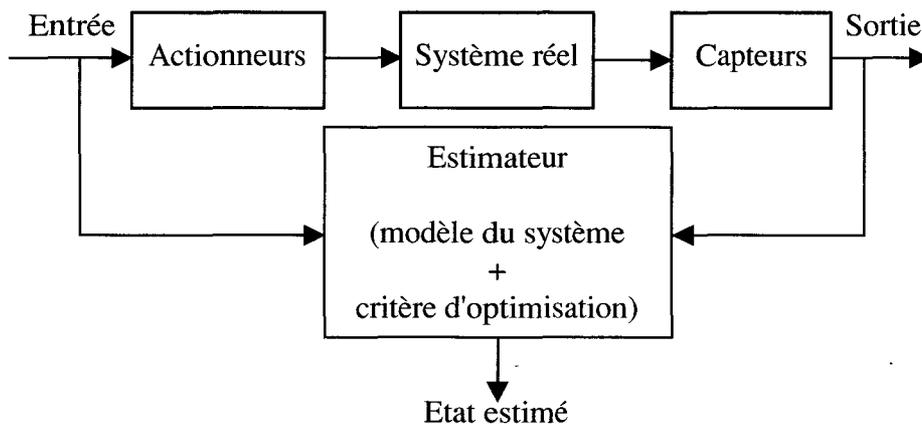


Figure 2.7. *Problème d'estimation*

La solution du problème d'estimation revient à rechercher, dans l'espace des variables d'état X , un vecteur \hat{x} le plus proche possible de l'état réel, validant la base de connaissance disponible (entrées, sorties) tout en respectant les contraintes C et les performances désirées.

Le problème d'estimation peut être défini par le triplet $\langle O, C, J \rangle$ où C représente l'ensemble de contraintes (structure (modèle : s , paramètres : θ)). Le problème peut alors être représenté par le quadruplet $\langle O, s, \theta, J \rangle$.

Dans le cas où le modèle est déterministe (continu ou discret), l'estimateur d'état sera appelé **observateur** [LUEN 71]. Dans le cas stochastique, on parle de **filtre** [KALM 60, 61], [ANDE 79]. L'observateur de Luenberger et le filtre de Kalman, avec leurs versions de base sont très restrictifs. En effet, l'observateur de Luenberger dévie en présence de n'importe quel type de bruit, et suppose la connaissance d'un modèle dynamique parfait du système. Le filtre de Kalman exige aussi la même supposition sur le modèle, et suppose que les sources de bruit sont des processus blancs dont les caractéristiques sont connues, ou bien des bruits colorés de densité spectrale connue. Dans la plupart des cas, ces hypothèses ne sont pas vérifiées (cas d'incertitudes de modèle, perturbations inconnues, ...).

Dans la suite de ce paragraphe, on classifie quelques méthodes d'estimation, selon les conditions imposées, ainsi qu'une évaluation du degré de la tolérance aux fautes de chaque méthode.

2.3.2. Estimation robuste, adaptative

Une première généralisation du problème d'estimation consiste à le définir non plus par la donnée d'un quadruplet $\langle O, s, \theta, J \rangle$ mais par celle d'un ensemble de quadruplets $\langle O, s, \Theta, J \rangle$, où Θ désigne un ensemble de valeurs possibles des paramètres θ . Il convient alors d'estimer l'état, tout en respectant des contraintes dont la structure est s , mais dont les valeurs des paramètres θ ne sont pas connues, et peuvent appartenir à l'ensemble Θ . Compte tenu de ces variations, la convergence de l'erreur d'estimation n'est plus assurée et il existe même un risque de divergence de l'erreur d'estimation par accumulation des variations de paramètres du fait de la prise en compte de tout le passé du processus [MEDV 91]. Pour résoudre le problème $\langle O, s, \Theta \rangle$, on distingue :

2.3.2.1. Estimation robuste

Dans la littérature, les approches robustes ont fait l'objet de nombreux travaux, parmi lesquels, nous pouvons citer :

- Les systèmes singulièrement perturbés, dont une solution de construction d'un observateur a été proposée par Porter [PORT 77].

- Les observateurs robustes pour les systèmes des grandes dimensions soumis à des interactions non linéaires et des incertitudes bornées [CHEN 97].
- Les filtres robustes, fondés sur les notions du problème d'optimisation de H_∞ , pour les systèmes linéaires à paramètres incertains et variants dans le temps [SAVK 97], [SHI 96], [GRIM 96], [ZIDO 99], [BOLZ 96]. Le problème de filtrage H_∞ a été abordé pour la première fois par [GRIM 88], qui a utilisé une approche polynomiale. Cependant, l'une des méthodes utilisées le plus souvent au cours des dernières années est l'approche par l'équation de Riccati [BANA 91], [BASA 91], [NAGP 91], [SHAK 90, 92] [SUN 91], [XIE 93], [YAES 89, 91, 92a, 92-b,]. Bernstein [BERN 89, 91] et Khargonekar [KHAR 92] ont proposé des filtres qui minimisent une borne sur la variance de l'erreur d'estimation tout en satisfaisant une performance H_∞ déterminée.
- Les observateurs en présence d'entrées inconnues, dont l'objectif est d'estimer l'état x du système tout en éliminant l'influence des entrées inconnues. Cette approche a reçu une attention considérable. Bhattacharyya [BHAT 78] et Hautus [HAUT 83] ont donné les conditions d'existence de ces observateurs en utilisant respectivement une approche géométrique et une approche fréquentielle. Avec une approche algébrique Kudva *et al.* [KUDV 80], Hou et Müller [HOU 92] et Darouach [DARO 94b] ont présenté une synthèse d'observateurs à entrées inconnues d'ordre réduit, l'ordre plein ayant été traité par Darouach *et al.* [DARO 94a]. Kurek [KURE 83] a présenté un observateur d'ordre plein en utilisant les propriétés des pseudo-inverses. Takahashi *et al.* [TAKA 99] a étudié ces observateurs pour les systèmes linéaires incertains. Il faut noter que ces observateurs présentent un grand intérêt pour le diagnostic des défauts affectant un système car il faut pouvoir distinguer entre l'occurrence d'un défaut et l'action d'une perturbation non mesurable présente lorsque le système est en fonctionnement normal [VISW 87], [FRAN 90, 91], [DING 90, 94b], [QIU 93], [CHEN 96]. Ces observateurs ont été appliqués sur des processus réels [GADD 98] et étendus dans le cas des systèmes singuliers [DARO 96], [TAKA 99], [GADD 96].
- Les filtres de Kalman à entrées inconnues ont été traités par Keller *et al.* [KELL 98a-b]. Chen et Patton [CHEN 96b] ont étudié aussi le filtrage optimal dans les cas des systèmes à entrées inconnues.

2.3.2.2. Estimation adaptative

Nous rappelons ici les observateurs et les filtres adaptatifs :

- Les observateurs linéaires adaptatifs, dont l'objectif est d'ajuster les paramètres de l'observateur, en utilisant des lois d'adaptation stable, de telle façon que l'erreur entre la sortie du processus et celle de l'observateur converge vers zéro. Cependant, la convergence des paramètres vers les valeurs désirées dépend de l'excitation persistante du signal d'entrée [NARE 89b]. Ce type d'observateurs a été étendu ultérieurement dans le cas des systèmes non linéaires [MARI 90, 92], [KRST 94].
- Les filtres adaptatifs (moindres carrées normalisées, filtre de Kalman adaptatif, filtre H_∞ central), dont la robustesse vis à vis de bruit de mesure et des variations paramétriques a été étudiée récemment par Bolzern *et al.* [BOLZ 99].

2.3.3. Estimation tolérante aux fautes

Une deuxième généralisation plus complexe est le problème $\langle O, S, \Theta \rangle$ dans lequel aucune connaissance n'est disponible sur l'ensemble de contraintes, i.e. la structure et les paramètres sont inconnus et peuvent appartenir respectivement aux ensembles S et Θ . On retrouve ici une généralisation du problème de l'estimation robuste ou adaptative dans laquelle non seulement les paramètres mais aussi la structure du système peuvent changer. C'est le cas lorsqu'on considère des systèmes dans lesquels des défaillances peuvent survenir. Pour résoudre ce genre de problèmes, rares sont les travaux qui ont été développés. Dans la littérature, on trouve les observateurs tolérants aux fautes, en cas de pertes d'information, traités par Levine [LEVI 90] et Savkin [SAVK 97].

Dans la deuxième partie de cette thèse, on s'intéresse à la tolérance aux fautes d'un système de capteurs fondée sur les propriétés d'observabilité. Les défauts considérés correspondent aux cas de pertes de capteurs.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une hiérarchie pour les méthodes de commande.

- D'une part, elle décrit l'évolution du problème de commande, partant de la boucle fermée classique et de la commande robuste et aboutissant aux notions de tolérance aux fautes et de supervision.

En effet, selon l'augmentation de la sévérité des défaillances, il faut augmenter le degré d'intelligence des méthodes de commande pour pallier les conséquences négatives et croître la tolérance aux fautes du système suivant l'apparition d'une défaillance.

- D'autre part, suite à la détection et à la localisation d'une défaillance, il est intéressant de connaître la démarche à suivre (accommodation ou reconfiguration) pour continuer à fonctionner. Une telle démarche peut être illustrée par la figure 2.8.

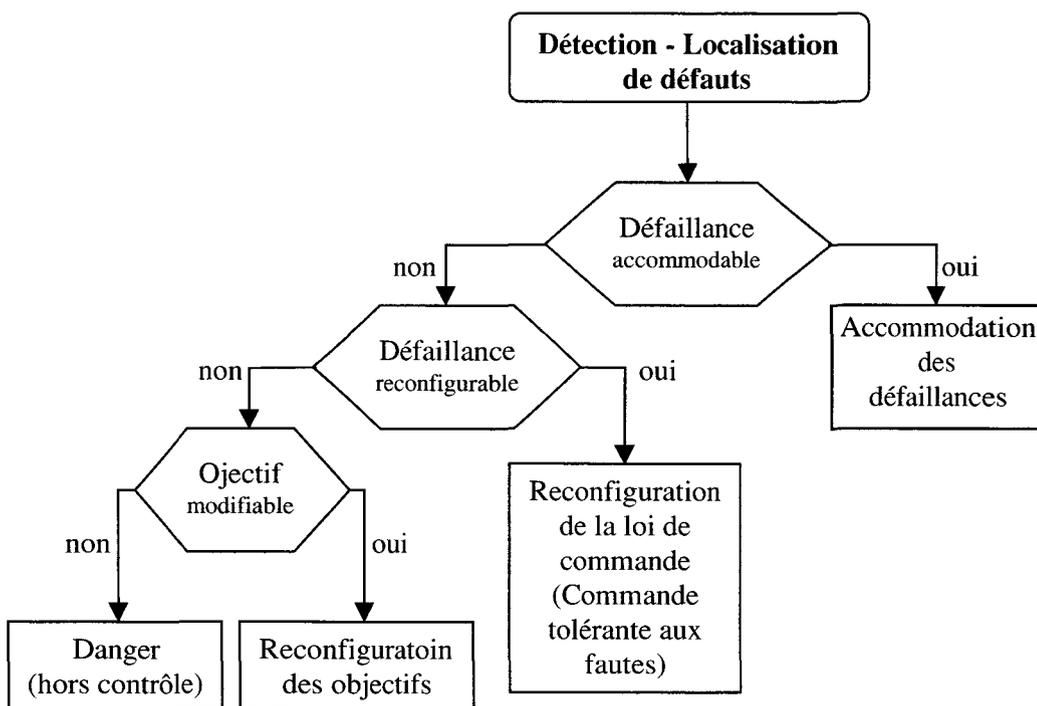


Figure 2.8. *Stratégie d'accommodation/reconfiguration*

De la même façon, nous avons présenté le problème de l'estimation en vue de la tolérance aux fautes (cf. 2.3).

Conclusion

Nous avons rappelé dans cette partie, les différents types de défauts selon leur degré de sévérité et selon leurs origines, ainsi qu'une modélisation de certaines types de défaillances (capteurs et actionneurs, multiplicatifs et additifs). Ces définitions représentent une grande importance pour les algorithmes de FDI pour bien distinguer un défaut d'autres effets (bruit de mesure, erreur de modélisation, etc ...). Un aperçu rapide sur les différentes techniques des algorithmes de détection et de localisation (FDI) a fait l'objet du premier chapitre.

L'objectif principal des algorithmes de diagnostic est d'augmenter le degré de la tolérance aux fautes d'un système. En effet, la connaissance de l'apparition d'un défaut permet d'améliorer la résolution des problèmes de commande et d'estimation. Le deuxième chapitre a fait l'objet d'une description des différentes méthodes de commande et d'estimation.

Nous verrons dans la deuxième partie, une nouvelle technique d'analyse et de conception d'une architecture optimale du système d'instrumentation (de commande) en vue de la tolérance aux fautes pour augmenter les performances des techniques de commande (d'estimation), quelles que soient ces techniques. Dans notre cas, nous nous intéressons aux fautes dues à une perte ou un blocage d'un élément du système (capteurs ou actionneurs).

2^{ère} partie

Analyse et conception d'une architecture d'instrumentation ou d'action tolérante aux fautes

Les performances d'un système tolérant aux fautes dépendent de la capacité de méthodes d'estimation (de commande) utilisées à effectuer les tâches désirées (estimation et commande) en cas de défaillances. Cependant, quelles que soient les méthodes mises en œuvre, les capacités sont limitées par la qualité et la structure de l'architecture du système d'instrumentation (de commande). Notre objectif est d'analyser la tolérance aux fautes en cas de pertes de capteurs et d'actionneurs. Cette analyse présente une étape importante pour concevoir un schéma d'instrumentation (ou d'action) tolérante aux fautes.

Dans la littérature, l'analyse de la tolérance aux défaillances de capteurs des systèmes linéaires statiques a été étudiée très tôt par Vaclaveck [VACL 69], puis reprise et développée dans [MAH 76], [CROW 89]. Récemment, les Gramiens d'observabilité et de commandabilité ont été utilisés pour évaluer le recouvrement de l'espace d'état des systèmes linéaires dynamiques [FREI 99], [WU 00]. Des travaux récents mettent en œuvre des approches graphiques et symboliques [STAR 99-b], [GEHI 99].

Dans cette partie, nous étudions la capacité du système à tolérer les fautes de capteurs et d'actionneurs en analysant la perte de ses propriétés d'observabilité (de commandabilité) lors de l'apparition de défaillances. Ces propriétés évaluent la possibilité d'estimer (de commander) les variables d'état du système, et leur satisfaction nécessite que l'on dispose de capteurs (d'actionneurs) permettant de couvrir l'espace d'état (ou un sous-espace, si on ne s'intéresse qu'à une fonctionnelle de l'état). Cette étude nous permettra de concevoir des schémas d'instrumentation (d'action) en vue de la tolérance aux fautes.

Dans le troisième chapitre, les conditions d'observabilité (de commandabilité) d'une fonctionnelle linéaire sont analysées, à partir des indices d'observabilité (de commandabilité) individuels. On définit des sous ensembles de capteurs (d'actionneurs) minimaux et redondants *ER* et *EM*, et on en établit quelques propriétés.

Le quatrième chapitre est consacré à la conception de schémas d'instrumentation (d'action) en vue de la tolérance aux fautes. Nous décrivons un graphe multi-niveau orienté connectant tous les sous ensembles *ER* et *EM*. Les chemins de ce graphe représentent les successions de pertes de capteurs (d'actionneurs) possibles, et nous pouvons alors identifier les sous-chemins qui aboutissent à un ensemble minimal, c'est-à-dire ceux pour lesquels la condition d'observabilité (commandabilité) d'une fonctionnelle linéaire reste satisfaite. Ainsi, l'analyse de la tolérance aux fautes se réduit à l'analyse des chemins du graphe, qui peuvent par ailleurs être évalués par deux mesures, l'une structurelle (degrés de redondance fort et faible) et l'autre probabiliste (temps moyen pour l'apparition de la première défaillance). Ces critères sont utilisés pour élaborer un algorithme permettant d'obtenir tous les schémas d'instrumentation (d'action) qui satisfont le cahier des charges de tolérance aux fautes désiré.

Le chapitre V illustre sur deux exemples les algorithmes de conception développés dans les cas de placement de capteurs et de sélection d'actionneurs respectivement. Le premier exemple représente une chaudière de bateau [CHEM 80] et le second un système hydraulique [HOBL 00-a].

Chapitre 3

Observabilité, commandabilité des systèmes linéaires

Notions de minimalité et de redondance

3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les propriétés d'observabilité (commandabilité) en présence de défaillances en utilisant deux types d'indices : les indices d'observabilité (de commandabilité) individuels et les indices de pseudo-observabilité (de pseudo-commandabilité). Le premier évalue la capacité de recouvrement de chaque composant (capteur ou actionneur) par rapport à un sous espace donné, tandis que le deuxième évalue les possibilités de solutions du problème d'estimation ou de commande. Dans la suite de cette thèse le type de défaillance considéré est une panne totale (blocage, perte, ...).

Du point de vue pratique, l'estimation de l'état complet n'est pas toujours nécessaire pour atteindre les performances désirées. Pour généraliser notre analyse, nous allons nous intéresser à l'étude des propriétés d'observabilité (commandabilité) d'une fonctionnelle linéaire de l'état.

Dans le paragraphe 2, nous rappelons des notions sur les indices d'observabilité, de pseudo-observabilité et d'observabilité individuels par rapport à une fonctionnelle linéaire des variables d'état. Ces derniers ont été définis dans le cas de l'observabilité (commandabilité) complète par Bingulac [BING 87]. Staroswiecki *et al.* les ont utilisé dans le cas d'une fonctionnelle linéaire [STAR 99]. Plusieurs travaux ont été réalisés sur ces indices, en particulier pour la représentation des formes canoniques et pseudo-canoniques et pour l'identification des paramètres d'un système [BING 87, 91], [GUID 75].

Dans le paragraphe 3, nous introduisons des nouvelles notions sur les Ensembles de capteurs (d'actionneurs) Minimaux (*EM*) et Redondants (*ER*), fondées sur les indices d'observabilité individuels. Des propriétés de minimalité et de redondance sont établies. Comme nous le verrons dans le quatrième chapitre, ces ensembles constituent un élément de base pour une analyse de la tolérance aux fautes. Dans le paragraphe quatre, nous étendrons les résultats obtenus dans le cas de l'observabilité à la commandabilité grâce à la dualité entre ces deux critères. Des exemples illustrent l'étude que nous avons développée.

3.2. Définitions et propriétés sur les indices d'observabilité

Nous considérons le système linéaire déterministe discret suivant:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \\ e(k) = Ex(k) \end{cases} \quad (3.1)$$

où $x \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathcal{R}^m$ le vecteur d'entrée, $y \in \mathcal{R}^p$ le vecteur de sortie, $e \in \mathcal{R}^q$ est un vecteur à estimer, $1 \leq (m, p, q) < n$, et les matrices A, B, C et E (pour Estimation) sont de dimensions appropriées.

3.2.1. Indices d'observabilité individuels [BING 87]

Le vecteur v donné par :

$$v := (v_1, \dots, v_p), \quad 1 \leq v_i \leq n, \quad \sum_{i=1}^p v_i \geq n, \quad (3.2)$$

est le vecteur d'indices d'observabilité individuels, si l'entier $v_i \in v$ est l'ordre de la réalisation minimale du système :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y_i(k) = c^i x(k) \end{cases} \quad (3.3)$$

où c^i est la i ème ligne de matrice d'observation C .

Cet ordre est donné par :

$$v_i := \text{rang}(c^i \quad c^i A \quad \dots \quad c^i A^{n-1}) \quad (3.4)$$

Théorème 1

Lorsque la matrice d'état A du système (3.1) a des valeurs propres distinctes, l'indice d'observabilité individuel v_i est égal au nombre d'éléments **non nuls** de la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice d'observation C_J , correspondante à la forme de Jordan de (3.1).

La démonstration de ce théorème est assez simple [CHEN 70].

Nous allons illustrer ce théorème par l'exemple suivant : Soit le système linéaire donné par sa forme de Jordan :

$$A = \text{diag} [1 \quad 0.5 \quad 3 \quad 4 \quad 2 \quad 1.5 \quad 2.5],$$

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 5 \\ 1 & 4.2 & 3 & 1.5 & 5 & 6 & 3 \end{pmatrix} \text{ et } E=I_7. \quad (3.5)$$

La matrice A ayant des valeurs propres distinctes, les trois indices d'observabilité individuels sont :

$$v_1 = 4, \quad v_2 = 2 \quad \text{et} \quad v_3 = 7.$$

3.2.2. Indices d'observabilité par rapport à E [STAR 99]

Définitions. Soit un entier λ tel que $\max(p, q) \leq \lambda \leq n$. Le vecteur:

$$n_E(\lambda) = (n_1, \dots, n_p), 1 \leq n_i \leq \lambda - p + 1, \sum_{i=1}^p n_i = \lambda \quad (3.6)$$

est un vecteur d'indices d'observabilité par rapport à E si et seulement si :

1) Les λ premières lignes linéairement indépendantes de la matrice d'observabilité :

$$OBS = \left[C^T \quad A^T C^T \quad \dots \quad (A^{\lambda-p})^T C^T \right]^T \quad (3.7)$$

sont données par :

$$c^i A^{j-1}, (i=1, \dots, p; j=1, \dots, n_i) \quad (3.8)$$

2) La matrice $OBS(I, n_E(\lambda)) = (OBS(1, n_1); OBS(2, n_2); \dots; OBS(p, n_p))$ satisfait :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ OBS(I, n_E(\lambda)) \end{bmatrix} = \text{rang}[OBS(I, n_E(\lambda))] \quad (3.9)$$

où I est l'ensemble de capteurs de cardinal p et $OBS(i, n_i) = (c^i \ c^i A \ \dots \ c^i A^{n_i-1})$.

De cette définition, il est clair que les indices d'observabilité associés au triplet (A, C, E) ne sont pas uniques. Ces indices peuvent changer avec une simple permutation des lignes de la matrice C .

En effet, en reprenant l'exemple précédent, les indices d'observabilité n_1, n_2 et n_3 calculés pour le triplet (A, C, E) sont respectivement 3, 2 et 2, l'ordre des capteurs de la matrice C étant $(c_1 \ c_2 \ c_3)^T$. En permutant la ligne c_1 avec c_3 , les indices n_1, n_2 et n_3 ne gardent pas les mêmes valeurs et seront respectivement 2, 2 et 3.

3.2.3. Indices de pseudo-observabilité par rapport à E [STAR 99]

Définition. Un vecteur $\mu_E(\lambda)$ tel que $\mu_E(\lambda) = (\mu_1, \dots, \mu_p), 1 \leq \mu_i \leq \lambda - p + 1, \sum_{i=1}^p \mu_i = \lambda$, est dit vecteur d'indices de pseudo-observabilité par rapport à E . De plus, le vecteur $\mu_E(\lambda)$, est admissible si et seulement si :

- les λ lignes $c^i A^{j-1}, i=1, \dots, p; j=1, \dots, \mu_i$ de la matrice OBS sont linéairement indépendantes.
- la matrice $OBS(I, \mu_E(\lambda))$ satisfait la condition :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ OBS(I, \mu_E(\lambda)) \end{bmatrix} = \text{rang}[OBS(I, \mu_E(\lambda))] \quad (3.10)$$

Cette définition sur les indices de pseudo-observabilité peut être illustrée en reprenant l'exemple précédent. Soit le tableau suivant :

$\mu_E = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$	Admissibilité	$\mu_E = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3\}$	Admissibilité
$\{1, 1, 5\}$	Admissible	$\{2, 4, 1\}$	Non admissible
$\{1, 2, 4\}$	Admissible	$\{3, 1, 3\}$	Admissible
$\{1, 3, 3\}$	Non admissible	$\{3, 2, 2\}$	Admissible
$\{1, 4, 2\}$	Non admissible	$\{3, 3, 1\}$	Non admissible
$\{1, 5, 1\}$	Non admissible	$\{4, 1, 2\}$	Admissible
$\{2, 1, 4\}$	Admissible	$\{4, 2, 1\}$	Admissible
$\{2, 2, 3\}$	Admissible	$\{5, 1, 1\}$	Non admissible
$\{2, 3, 2\}$	Non admissible	--	--

Tableau 3.1. Exemple d'admissibilité des indices pseudo-observabilité

Nous avons 15 vecteurs d'indices de pseudo-observabilité dont 8 admissibles et 7 non admissibles.

Une condition nécessaire pour l'admissibilité des indices de pseudo-observabilité peut être donnée par le lemme suivant :

Lemme 1 [BING 87]

Le vecteur d'indice $\mu_E(\lambda) = (\mu_1, \dots, \mu_p), 1 \leq \mu_i \leq \lambda - p + 1, \sum_{i=1}^p \mu_i = \lambda$, est *admissible*, si on

a :

$$\mu_i \leq v_i, (i = 1, \dots, p) \tag{3.11}$$

3.2.4. Relations entre les indices

3.2.4.1. Propriété 1

L'ensemble d'indices d'observabilité individuels v_i représente une borne supérieure pour l'ensemble d'indices d'observabilité et de pseudo-observabilité [BING 87].

$$\max(n_i, \mu_i) \leq v_i, (i = 1, \dots, p) \quad (3.12)$$

La démonstration découle des définitions.

3.2.4.2. Propriété 2 ($E=I_n$)

Les indices d'observabilité sont indépendants de la permutation des lignes de la matrice C dans les deux cas suivants :

- lorsqu'ils sont égaux aux indices d'observabilité individuels,
- lorsqu'ils sont égaux entre eux.

Démonstration.

En effet, soit le vecteur d'indices d'observabilité \mathbf{n} égal au vecteur d'indices individuels \mathbf{v} ($\mathbf{n} \equiv \mathbf{v}$) ($n_i = v_i, 1 \leq i \leq k$), alors :

$$\sum_{i=1}^k n_i = \sum_{i=1}^k v_i = n. \quad (3.13)$$

Si ces indices changent avec la permutation, alors il y aura au moins un indice plus petit qu'auparavant et un autre plus grand, tout en ayant la somme des indices égale à n . Ce qui est en contradiction avec la propriété 1.

Dans le cas où les indices d'observabilité sont égaux entre eux, n est un multiple de p . Les n premières lignes indépendantes de la matrice d'observabilité sont données par:

$\left(C^T \mid A^T C^T \mid \dots \mid \left(A \begin{pmatrix} n \\ p-1 \end{pmatrix} \right)^T C^T \right)^T$. Alors, la permutation des lignes ne change pas les n premières lignes indépendantes.

3.3. Observabilité

Soit I_c l'ensemble des capteurs du processus.

Par définition, une fonctionnelle linéaire est observable si le sous espace correspondant est couvert par le système d'instrumentation disponible. Chaque capteur participe individuellement à la couverture d'un certain sous espace de l'espace d'état.

3.3.1. Recouvrement de l'espace

Soit i un capteur quelconque ($i \in I_c$). Ce capteur couvre un sous espace Ω_i de dimension ν_i , où ν_i est l'indice d'observabilité individuel de i , donné par la relation (3.4).

Le sous espace Ω_i est donné :

$$\Omega_i := \text{Span}(c^i; c^i A; \dots; c^i A^{\nu_i-1})^T \quad (3.14)$$

Cette définition nous permet d'énoncer les théorèmes suivants.

Théorème 2 (Observabilité par un capteur)

Une fonctionnelle linéaire des variables d'état $e = Ex(k)$ est observable par le capteur i si et seulement si :

$$- \text{Im}(E) \subset \Omega_i \quad (3.15)$$

ou

$$- \text{rang} \begin{bmatrix} E \\ \text{OBS}(i, \nu_i) \end{bmatrix} = \text{rang} [\text{OBS}(i, \nu_i)] \quad (3.16)$$

où $OBS(i, v_i) = (c^i \quad c^i A \quad \dots \quad c^i A^{v_i-1})$.

Si $v_i = n$, alors le système est complètement observable par le capteur i .

L'espace Ω_{I_c} couvert par l'ensemble des capteurs I_c est donnée par :

$$\Omega_{I_c} = \Omega_1 \oplus \Omega_2 \oplus \dots \oplus \Omega_p \quad (3.17)$$

où \oplus représente la somme directe des sous espaces.

Théorème 3 (Observabilité par un ensemble de capteurs)

Une fonctionnelle linéaire des variables d'état $e = Ex(k)$ est observable par l'ensemble de capteurs I_c si et seulement si :

$$- \text{Im}(E) \subset \Omega_{I_c} \quad (3.18)$$

ou

$$- \text{rang} \begin{bmatrix} E \\ OBS(I_c, v) \end{bmatrix} = \text{rang} [OBS(I_c, v)] \quad (3.19)$$

où $OBS(I_c, v) = (OBS(1, v_1); OBS(2, v_2); \dots; OBS(p, v_p))$ et $v = (v_1, \dots, v_p)$ est le vecteur des indices d'observabilité individuels des capteurs de I_c .

Théorème 4 (Observabilité complète)

La condition nécessaire et suffisante pour que le système (3.1) soit observable est donnée par :

$$\dim(\Omega_{I_c}) = n \quad (3.20)$$

3.3.2. Redondance et minimalité

Soit J un sous ensemble quelconque de I_c et I_c/J son complémentaire dans I_c . Dans la suite, nous allons introduire les notions de redondance et de minimalité, selon les possibilités de recouvrement d'un système d'instrumentation.

3.3.2.1. Définitions

Ensemble de capteurs E -Minimal (EM). Un ensemble de capteurs I_c est dit E -Minimal, si et seulement si :

$$\forall J \subset I_c, \begin{cases} \text{Im}(E) \subset \Omega_{I_c} \\ \text{et} \\ \text{Im}(E) \not\subset \Omega_{I_c \setminus J} \end{cases} \quad (3.21)$$

Ensemble de capteurs E -Redondant (ER). Un ensemble de capteurs I_c est dit E -Redondant, si et seulement si :

$$\exists J \subset I_c, \text{ tel que } \text{Im}(E) \subset \Omega_{I_c \setminus J} \quad (3.22)$$

En effet, la perte d'un capteur :

§ d'un ensemble minimal, rend la fonctionnelle linéaire Ex non observable.

§ d'un ensemble redondant, peut conduire à un autre ensemble redondant ou à un ensemble minimal.

Supposons qu'un capteur j défaillant soit détecté et localisé. La possibilité de reconfigurer le système suppose que la fonctionnelle linéaire Ex reste observable avec les capteurs de l'ensemble $I_c \setminus \{j\}$.

Ceci ne peut être obtenu que, si et seulement si, la condition suivante est vérifiée :

$$\text{Im}(E) \subset \Omega_1 \oplus \dots \oplus \Omega_{j-1} \oplus \Omega_{j+1} \oplus \dots \oplus \Omega_p \quad (3.23)$$

3.3.3. Possibilités de recouvrement

On suppose que la fonctionnelle linéaire Ex est observable avec l'ensemble de capteurs I_c . L'ensemble I_c peut couvrir l'espace $\text{Im}(E)$ avec un certain nombre de degrés de liberté. Les possibilités de recouvrement sont interprétées par l'existence de plusieurs combinaisons

d'indices de pseudo-observabilité admissibles (cf. 3.2.3). Ces indices nous permettront de définir une fenêtre d'observation minimale associée à l'ensemble I_c et d'introduire la notion d'observabilité temporaire.

3.3.3.1. Fenêtre minimale

Soit $\mu_E \in N^p$ un vecteur d'indice de pseudo-observabilité associé à l'ensemble I_c . A chaque vecteur d'indices μ_E , on associe la norme :

$$\|\mu_E\| = \max_{i \in I_c} \mu_i \quad (3.24)$$

Soit $M(I_c)$ l'ensemble des vecteurs d'indices de pseudo-observabilité admissibles associé à I_c .

A l'ensemble I_c , on associe la mesure :

$$\mu_E^*(I_c) = \min_{\mu_E \in M(I_c)} \|\mu_E\| \quad (3.25)$$

Celle-ci représente la fenêtre minimale d'observation pour laquelle la fonctionnelle linéaire e est estimable.

Lemme 2

Soit I_c un ER . La fonctionnelle linéaire e est observable $\forall \sigma \geq \mu_E^*(I_c)$.

La démonstration découle de l'admissibilité des indices de pseudo-observabilité.

3.3.3.1. Observabilité temporaire

L'objectif de ce paragraphe est de calculer pour chaque capteur j , un temps Δ_j pour lequel une fonctionnelle linéaire Ex reste observable en cas de perte du capteur j .

Si la condition (3.23) n'est pas vérifiée, en perdant un capteur j , nous avons remarqué que la fonctionnelle linéaire peut rester observable pendant un certain temps Δ_j (à définir). Pour interpréter ce régime d'observabilité, nous utilisons aussi les indices de pseudo-observabilité cités précédemment.

Soit s la largeur d'une fenêtre d'observation quelconque associé à I_c tel que $s \geq \mu_E^*(I_c)$. Une combinaison d'indices de pseudo-observabilité associée à I_c peut être représentée par la figure 3.1.

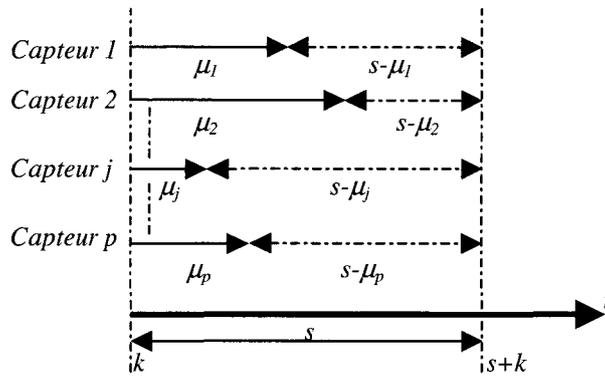


Figure 3.1. Représentation graphique d'une combinaison d'indices de pseudo-observabilité sur une fenêtre d'observation s

La largeur de la fenêtre d'observation nécessaire, de chaque capteur j , est donnée par μ_j .

Soit μ_E^j un vecteur associé au capteur j tel que $\mu_E^j = \{\mu_E(j), \mu_E \in M(I_c)\}$ et $\|\mu_E^j\|$ est défini par :

$$\|\mu_E^j\| = \min_{\mu_E \in M(I_c)} (\mu_E(j)) \quad (3.26)$$

Le temps Δ_j pendant lequel la fonctionnelle linéaire Ex reste observable après la perte du capteur j est donné par $\Delta_j = s - \|\mu_E^j\|$.

Pour un ensemble de capteurs minimal EM , on peut définir un temps Δ pendant lequel la fonctionnelle linéaire Ex reste observable quel que soit le capteur j perdu par :

$$\Delta = \min_{j \in I_c} (\Delta_j) \quad (3.27)$$

3.3.4. Propriétés

Nous présentons quelques propriétés sur les indices d'observabilité, de pseudo-observabilité et les ensembles minimaux et redondants.

Propriété 1

La somme des indices d'observabilité individuels associés à un Ensemble Redondant (ER) est supérieure ou égale à q .

Démonstration. Evidente par les définitions.

Propriété 2

Soit J un ER . Son cardinal vérifie :

$$\tau \leq |J| \leq p \quad \text{avec } \tau = \left\lceil \frac{q}{\max_{i \in I_c} (v_i)} \right\rceil \quad (3.28)$$

Démonstration.

D'une part, $\lambda = \sum_{i \in J} \mu_i \leq \sum_{i \in J} v_i$ [BIN 87]

Et d'autre part, $\lambda \leq |J| \times \max_{i \in J} (v_i)$

Nous en déduisons $\frac{\lambda}{\max_{i \in J} (v_i)} \leq |J|$

Et le résultat découle du fait que $\max_{i \in J} (v_i) \leq \max_{i \in I_c} (v_i)$.

Propriété 3

Tout ensemble qui inclut un ER est lui-même un ER . Tout ER contient au moins un EM .

Propriété 4 (monotonie)

La mesure μ_E^* est monotone décroissante (au sens de l'inclusion).

Soit I un ER , alors pour n'importe quel ER, J inclus dans I :

$$\forall I, J \in ER, J \subseteq I \Rightarrow \mu_E^*(I) \leq \mu_E^*(J) \quad (3.29)$$

Démonstration. Soit J un ER inclus dans I et soit $\mu_E = (\mu_j, j \in J)$ une combinaison d'indices de pseudo-observabilité admissible telle que $\text{Im}(E^T) \subset \text{Im} \text{OBS}(J, \mu_E)$.

Pour cela, considérons l'ensemble $J' = J \cup \{\alpha\}$, où $\alpha \in I \setminus J$ et J' est un ER (propriété 3).

Le capteur α participe ou non à couvrir l'espace $\text{Im}(E^T)$ selon deux cas :

1. $\text{Proj}_{\text{Im}(E)}(c^\alpha) = 0$, le capteur α ne joue aucun rôle pour couvrir l'espace $\text{Im}(E)$ et la largeur de la fenêtre minimale ne change pas. Une combinaison d'indices de pseudo-observabilité admissible μ'_E peut s'écrire comme suit : $\mu'_E = (\mu'_E, 1)$.

2. $\text{Proj}_{\text{Im}(E)}(c^\alpha) \neq 0$, le vecteur c^α peut s'écrire : $c^\alpha = c_E^\alpha + c_{E^\perp}^\alpha$, où c_E^α est la projection de c^α sur l'espace $\text{Im}(E^T)$ et $c_{E^\perp}^\alpha$ sa projection sur l'espace orthogonal à $\text{Im}(E)$.

Soit r_j le premier entier tel que $c^j A^{\mu_j - r_j} (c_E^\alpha)^T \neq 0$, sinon $r_j = \infty$. v_α est l'indice d'observabilité individuel de α et soit m le capteur de J qui vérifie : $r_m = \min_{j \in J} r_j$.

Comme $r_m > v_\alpha$ est impossible, la propriété est vérifiée pour $r_m \leq v_\alpha$.

En effet,

- Si $r_m \leq v_\alpha$.

Il est possible de remplacer les lignes indépendantes : $c^j A^{\mu_j - r_m}, c^j A^{\mu_j - r_m + 1}, \dots, c^j A^{\mu_j - 1}$ par $c_E^\alpha, c_E^\alpha A, \dots, c_E^\alpha A^{r_m - 1}$ respectivement, et $\mu_E' = (\mu_l, \dots, \mu_j - r_m, \dots, \mu_l, r_m)$.

Alors,

$$\begin{aligned} \mu_E^*(J') &\leq \|\mu_E'\| \leq \max\{\max\{\mu_1 \dots \mu_j - r_m \dots \mu_l\}, r_m\} \leq \\ &\max\{\|\mu_E\|, \mu_j\} \leq \|\mu_E\| = \mu_E^*(J) \end{aligned} \quad (3.30)$$

- Si $r_m > v_\alpha$ (Impossible)

Nous pouvons remplacer les v_α premières lignes indépendantes : $c^j A^{\mu_j - r_m}, c^j A^{\mu_j - r_m + 1}, \dots, c^j A^{\mu_j - r_m + v_\alpha - 1}$ par $c^\alpha, c^\alpha A, \dots, c^\alpha A^{v_\alpha - 1}$ respectivement, $\mu_E' = (\mu_l \dots \mu_j \dots \mu_l v_\alpha)$ ne représentant pas une combinaison d'indices de pseudo-observabilité admissible. Ceci implique donc que J' n'est pas un ER ce qui est en contradiction avec l'hypothèse. Ce cas ne peut donc se produire.

En itérant ce raisonnement, nous pouvons montrer :

$$\mu_E^*({I, I/J}) \leq \mu_E^*({J, \alpha, \beta}) \leq \mu_E^*({J, \alpha}) \leq \mu_E^*(J) \quad (3.31)$$

où $\alpha, \beta, \chi, \dots \in I/J$ et $\{J, \alpha\}$ désigne $J \cup \{\alpha\}$

Propriété 5

Soient I_1 et I_2 deux ER dont l'intersection est également un ER , alors :

$$\forall (a, b) \in [0, 1]^2 \text{ avec } a + b = 1$$

$$\mu_E^*(I_1 \cup I_2) \leq a\mu_E^*(I_1) + b\mu_E^*(I_2) \leq \mu_E^*(I_1 \cap I_2) \quad (3.32)$$

Démonstration : La démonstration découle directement de la propriété 5.

Ce résultat peut être généralisé pour k ER dont l'intersection est un ER :

$$\mu_E^*\left(\bigcup_{i=1}^k I_i\right) \leq \sum_{i=1}^k a_i \mu_E^*(I_i) \leq \mu_E^*\left(\bigcap_{i=1}^k I_i\right), \quad \sum_{i=1}^k a_i = 1, \quad a_i \geq 0 \quad (3.33)$$

REMARQUE. – cas particulier $E = I_n$

Soit J un ER tel que :

$$\exists \mu \in M(J) \quad t.q. \quad \forall i \in J \quad \mu_i = v_i \quad (3.34)$$

Alors, J est un EM et il admet une seule combinaison admissible d'indices de pseudo-observabilité.

Démonstration : Soit $\mu := (\mu_1, \dots, \mu_k)$, $\sum_{i=1}^k \mu_i = n$ un vecteur d'indices de pseudo-observabilité admissible tel que $\mu_i = v_i \quad \forall i \in J$, et soit μ' un autre vecteur admissible. μ , μ' et v sont tels que :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k \mu_i &= \sum_{i=1}^k \mu'_i = n \\ \mu'_i &\leq v_i \quad \forall i \in J \\ \mu_i &= v_i \quad \forall i \in J \end{aligned} \quad (3.35)$$

dont la solution unique est $\mu_i = v_i = \mu'_i$.

En outre, $\mu_i = v_i$ implique que $\sum_{i=1}^k \mu_i = \sum_{i=1}^k v_i = n$. Donc, en éliminant n'importe quel capteur

j le système devient non observable puisque :

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^k \mu_i = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^k v_i < n \quad (3.36)$$

Propriété 6

Une condition nécessaire et suffisante pour qu'un ensemble de capteurs I_c admette un EM unique est que tout ER contienne le même EM .

Démonstration : Soit I (resp. P) un EM (resp. un ER) inclus dans I_c .

Condition nécessaire : Considérons un système possédant un seul EM , I et supposons qu'il existe un ER , P tel que $I \not\subset P$, alors comme tout ER contient au moins un EM , ceci implique que I_c contient un autre EM , ce qui est en contradiction avec l'hypothèse.

Condition suffisante : Soit $P \subset I_c$, un ER contenant deux EM , I et J . Puisque J est EM , il est ER , et $I \subset J$. De même, $J \subset I$ puisque I est EM , d'où le résultat $I = J$.

3.3.5. Exemple

Considérons un système linéaire multivariable avec 7 variables d'état x_1, \dots, x_7 et 4 capteurs $I = \{a, b, c, d\}$ [STAR 99]. Soient les matrices A , C et E :

$$A = \text{diag} [1 \quad 0.5 \quad 3 \quad 4 \quad 2 \quad 1.5 \quad 2.5],$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \text{ et } E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$

La fonctionnelle linéaire à estimer est $e = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = Ex$. Puisque les valeurs propres de la matrice A sont différentes, les indices d'observabilité individuels ν_a, ν_b, ν_c et ν_d sont donnés par le nombre des éléments non nuls des lignes correspondantes de la matrice d'observation C . Ils sont respectivement 4, 3, 3 et 5.

En appliquant la définition, on trouve que les indices d'observabilité par rapport à E , n_a, n_b, n_c et n_d sont respectivement 2, 2, 2 et 1.

Il existe 10 *ER* par rapport à *E*, parmi lesquels 2 sont des *EM*. Donc l'observabilité de *e* est obtenue pour 10 *ER* par rapport à *E*, qui sont $\{a, b, c, d\}$, $\{b, c, d\}$, $\{a, c, d\}$, $\{a, b, d\}$, $\{a, b, c\}$, $\{c, d\}$, $\{a, d\}$, $\{a, c\}$, $\{a, b\}$ et $\{a\}$.

On peut noter que le nombre des *ER* par rapport à *E* est plus grand que le nombre des *ER* (dans le cas où $\text{rank } E = n$), ce qui rend plus facile d'estimer *e* que l'état complet dans le cas de pertes de capteurs.

Chaque *ER* par rapport à *E* possède au moins une combinaison d'indices de pseudo-observabilité admissible. Comme exemple, le tableau 3.2. illustre les résultats de calcul pour l'ensemble $\{a, c, d\}$ (*A* représente "admissible" et *NA* "non admissible").

$\mu_H = \{\mu_a, \mu_c, \mu_d\}$	Admiss.	$\mu_H = \{\mu_a, \mu_c, \mu_d\}$	Admiss.	$\mu_H = \{\mu_a, \mu_c, \mu_d\}$	Admiss.
{1, 1, 5}	A	{3, 3, 1}	A	{3, 1, 2}	NA
{1, 2, 4}	A	{4, 1, 2}	A	{3, 2, 1}	A
{1, 3, 3}	A	{4, 2, 1}	A	{4, 1, 1}	A
{1, 4, 2}	NA	{5, 1, 1}	A	{1, 1, 3}	NA
{1, 5, 1}	NA	{1, 1, 4}	NA	{1, 2, 2}	NA
{2, 1, 4}	A	{1, 2, 3}	NA	{1, 3, 1}	NA
{2, 2, 3}	A	{1, 3, 2}	NA	{2, 1, 2}	NA
{2, 3, 2}	A	{1, 4, 1}	NA	{2, 2, 1}	NA
{2, 4, 1}	A	{2, 1, 3}	NA	{1, 1, 2}	NA
{3, 1, 3}	A	{2, 2, 2}	NA	{1, 2, 1}	NA
{3, 2, 2}	A	{2, 3, 1}	A	{2, 1, 1}	NA

Tableau 3.2. Admissibilité des vecteurs d'indices de pseudo-observabilité par rapport à *E*

3.4. Commandabilité

Nous considérons le modèle d'un système linéaire déterministe discret suivant:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \\ c(k) = Kx(k) \end{cases} \quad (3.38)$$

où $x \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathcal{R}^m$ le vecteur d'entrée, $y \in \mathcal{R}^p$ le vecteur de sortie, $c \in \mathcal{R}^q$ est un vecteur à commander, $1 \leq (m, p, q) < n$, et les matrices *A*, *B*, *C* et *K* sont de dimensions appropriées.

Dans ce paragraphe, le problème revient à commander une fonctionnelle linéaire $c = Kx$ sachant que le système d'action est donné par I_a . Le défaut considéré est une perte d'un ou plusieurs actionneurs à un instant donné.

Soit la matrice :

$$COM(I_a, \nu) = (COM(1, \nu_1); COM(2, \nu_2); \dots; COM(m, \nu_m))$$

où ν_i $i=1, \dots, m$ sont les indices de commandabilité individuels. La condition de commandabilité complète $Rang [COM(I_a, \nu)] = n$ peut s'écrire évidemment $Im [COM(I_a, \nu)] = \mathcal{R}^n$.

La possibilité de commander la fonctionnelle linéaire $c = Kx$ est liée à l'existence d'une matrice $F_{n \times \lambda}$ dont les colonnes sont sélectionnées parmi les colonnes indépendantes de la matrice $COM(I_a, \nu)$ et telle que :

$$Im K \subseteq Im F. \tag{3.39}$$

Les développements dans les paragraphes précédents concernant l'observabilité sont entièrement repris pour la commandabilité. Les indices de commandabilité individuels et de pseudo-commandabilité sont définis de la même façon [HOBL 00-a].

Pour un ensemble d'actionneurs J , le vecteur d'indices de commandabilité individuels ν , soit $\Omega_J = Im COM(J, \nu)$. Nous pouvons distinguer les ensembles :

Ensemble d'actionneurs K-minimal (KM). Un ensemble d'actionneurs I_a est dit *KM*, si et seulement si :

$$\forall J \subset I_a, \begin{cases} Im(K) \subset \Omega_{I_a} \\ \text{et} \\ Im(K) \not\subset \Omega_{I_a \setminus J} \end{cases} \tag{3.40}$$

Ensemble d'actionneurs K-redondant (KR). Un ensemble d'actionneurs I_a est dit *KR*, si et seulement si :

$$\exists J \subset I_a, \text{ tel que } \text{Im}(K) \subset \Omega_{I_a \setminus J} \quad (3.41)$$

A chaque vecteur d'indices de pseudo-commandabilité μ_K , on associe la norme :

$$\|\mu_K\| = \max_{i \in I_a} \mu_i \quad (3.42)$$

Soit $M(I_a)$ l'ensemble des vecteurs de *pseudo-commandabilité* admissibles associés à un ensemble d'actionneurs KR donné. A chaque KR , on associe la mesure :

$$\mu_K^*(I_a) = \min_{\mu \in M(I_a)} \|\mu_K\| \quad (3.43)$$

Cette mesure représente l'intervalle de temps minimal en dessous duquel la fonctionnelle linéaire Kx n'est pas commandable. En effet :

Lemme 3

Soit I_a un KR . La fonctionnelle linéaire c est commandable $\forall \sigma \geq \mu_K^*(I_a)$.

Nous pouvons montrer facilement que les propriétés des ER et EM s'étendent sans difficulté aux KR et KM .

Exemple

Considérons l'exemple d'un système linéaire donné par les matrices A_J, B_J suivantes [HOBL 00-c].

$$A_J = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_7 \end{pmatrix}, \quad (3.44)$$

$$B_J = (a \ b \ c \ d) = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & b_{13} & b_{14} \\ 0 & b_{22} & 0 & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & 0 & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \\ b_{51} & 0 & b_{53} & 0 \\ b_{61} & b_{62} & 0 & 0 \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & 0 \end{pmatrix} \quad K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

où K est la matrice de sélection de variables d'état.

Les indices de commandabilité individuels v_a , v_b , v_c et v_d sont respectivement 5, 4, 3 et 4. Les indices de commandabilité par rapport à I_7 , n_a , n_b , n_c et n_d sont respectivement 2, 2, 2 et 1.

Supposons qu'on s'intéresse seulement à commander la partie $c = [x_5 \ x_6 \ x_7]^t = Kx$.

Les indices de commandabilité par rapport à E sont égaux à 1, et nous trouvons 10 KR par rapport à K parmi lesquels deux sont KM : $\{a, b, c, d\}$, $\{b, c, d\}$, $\{a, c, d\}$, $\{a, b, d\}$, $\{a, b, c\}$, $\{b, c\}$, $\{a, d\}$, $\{a, c\}$, $\{a, b\}$ et $\{a\}$.

Le tableau 3.3. illustre les combinaisons d'indices de pseudo-commandabilité par rapport à K , admissibles et non admissibles.

$\mu_H = \{\mu_a, \mu_b, \mu_c\}$	Admiss.	$\mu_H = \{\mu_a, \mu_b, \mu_c\}$	Admiss.	$\mu_H = \{\mu_a, \mu_b, \mu_c\}$	Admiss.
{1, 1, 5}	NA	{4, 1, 2}	A	{4, 1, 1}	A
{1, 2, 4}	A	{4, 2, 1}	A	{1, 1, 3}	NA
{1, 3, 3}	A	{5, 1, 1}	A	{1, 2, 2}	NA
{1, 4, 2}	A	{1, 1, 4}	NA	{1, 3, 1}	NA
{1, 5, 1}	NA	{1, 2, 3}	A	{2, 1, 2}	NA
{2, 1, 4}	A	{1, 3, 2}	NA	{2, 2, 1}	NA
{2, 2, 3}	A	{1, 4, 1}	NA	{3, 1, 1}	NA
{2, 3, 2}	A	{2, 1, 3}	A	{1, 1, 2}	NA
{2, 4, 1}	A	{2, 2, 2}	A	{1, 2, 1}	NA
{3, 1, 3}	A	{2, 3, 1}	NA	{2, 1, 1}	NA
{3, 2, 2}	A	{3, 1, 2}	A	{1, 1, 1}	NA
{3, 3, 1}	A	{3, 2, 1}	A	--	--

Tableau 3.3. Admissibilité des vecteurs d'indices de pseudo-commandabilité par rapport à K

On obtient 19 combinaisons d'indices de pseudo-commandabilité admissibles qui correspondent aux possibilités de recouvrement de l'espace $Im(K)$.

3.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré dans un premier temps, aux définitions et à l'analyse des indices d'observabilité (commandabilité), de pseudo-observabilité (pseudo-commandabilité) et d'observabilité individuels (indices de commandabilité individuels) . Ces indices ont été utilisés comme outils de test pour savoir si une fonctionnelle linéaire est estimable (commandable) par rapport à un système d'observation (d'action). Dans la littérature, ces indices ont été utilisé particulièrement pour résoudre le problème de l'identification des paramètres en réduisant le nombre des paramètres à estimer pour la recherche des formes canoniques.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié les propriétés d'observabilité (de commandabilité) en cas de pertes de capteurs (d'actionneurs). Cette étude, nous a permis de définir les sous ensembles : minimaux et redondants. Comme on le verra dans le chapitre suivant, un ensemble redondant est tolérant aux fautes, un ensemble minimal ne l'est pas. La question qui se pose est :

- *Comment mesurer la capacité d'un ensemble redondant à estimer (à commander) une fonctionnelle linéaire en cas de pertes de capteurs (d'actionneurs) ?*
- *Comment concevoir une architecture d'instrumentation (ou d'action) tolérant aux fautes ?.*

Chapitre 4

Conception d'un schéma d'instrumentation ou d'action en vue de la tolérance aux fautes

4.1. Introduction

Gertler *et al.* [GERT 88] ont montré que la conception d'un système de surveillance dépend non seulement du nombre de capteurs mais aussi du choix des mesures. Dans ce chapitre, nous étendons cette idée au problème de la tolérance aux fautes d'un système d'instrumentation [STAR 99-a] et d'action [HOBL 00-a].

Dans le paragraphe 2, nous présentons brièvement les différentes méthodes de placement de capteurs. Ces méthodes utilisent différents critères d'évaluation pour le choix d'un système d'instrumentation dans le cas des systèmes linéaires dynamiques.

Après avoir montré comment les propriétés d'observabilité (de commandabilité) d'une fonctionnelle linéaire peuvent changer en cas de pertes de capteurs (d'actionneurs) (cf. chapitre III), nous proposons d'étudier la capacité d'un système d'instrumentation (d'action) à tolérer les fautes. Deux types de systèmes d'instrumentation (d'action) ont été définis : minimal et redondant.

- le premier représente le cas où la perte de n'importe quel capteur (actionneur) rend le système non observable (non commandable),
- le deuxième est plus tolérant, et la perte d'un composant peut ne pas influencer sur les conditions d'observabilité (de commandabilité) du système.

Une représentation graphique des Ensembles de capteurs (d'actionneurs) Redondants *ER* (*KR*) et Minimaux *EM* (*KM*) est proposée (cf. § 4.3.). Ces ensembles sont organisés selon un

graphe orienté (un automate) contenant tous les chemins d'accommodation/reconfiguration pour lesquels l'espace d'état (ou un sous-espace, si on ne s'intéresse qu'à une fonctionnelle de l'état) reste observable.

Dans le paragraphe 4, nous analysons la tolérance aux fautes en étudiant les chemins de ce graphe en se fondant sur deux types de critères : structurel (degré de redondance) et probabiliste (fiabilité). Enfin, nous proposons un algorithme pour la conception d'un schéma d'instrumentation.

4.2. Etat de l'art

Différentes méthodes ont été développées pour résoudre le problème de placement de capteurs et de sélection d'actionneurs. Dans ce paragraphe, nous rappelons quelques approches.

4.2.1. Placement de capteurs

4.2.1.1. Méthodes

Le problème de placement de capteurs est lié notamment à l'analyse de l'observabilité des systèmes. Les premiers résultats, fondés sur la théorie des graphes, ont été obtenus par Vaclaveck [VACL 69]. Ces travaux ont été appliqués aux systèmes linéaires statiques obtenus à partir des lois de conservation de matière ou d'énergie dont l'objectif est de mettre en évidence les variables observables et non observables ainsi que les mesures redondantes. Stanley et Mah [STAN 81-a-b], en utilisant cette approche graphique, ont développé des algorithmes efficaces pour la classification des variables selon leur observabilité. D'autres travaux ont été consacrés à l'analyse de l'observabilité, parmi lesquels, nous pouvons citer :

- utilisation des vecteurs propres de la matrice d'observabilité par Tablawi et Hagry [TABL 79],
- utilisation de la matrice de projection pour déduire l'observabilité des variables [CROW 83],
- factorisation sous forme triangulaire d'une matrice de gain [MONT 86],

- décomposition matricielle qui fait apparaître des blocs regroupant les variables selon leur observabilité [DARO 86],
- évaluation de la redondance des variables d'un système à partir d'une analyse structurelle [DECL 91].

De nombreux travaux, qui ne se limitent plus à l'analyse de l'observabilité, fondés sur l'optimisation de la précision d'estimation [KRES 87], la redondance [STAN 81] et la fiabilité des estimations [ARIA 75] ont été développés. L'optimisation de la précision des estimations [EDEL 75] se fonde sur le calcul de rang d'une matrice des variances des erreurs d'estimation. Dans ce sens, des méthodes heuristiques consistent à supprimer de manière séquentielle, les mesures dont l'estimation est la moins précise [KOGI 75], [AAM 83]. Ainsi, pour diminuer les erreurs d'estimation, Arbel [ARBE 79, 82] a développé une méthode d'optimisation de la matrice de variance-covariance des mesures. Stanley et Mah [STAN 81] ont montré que l'augmentation de la redondance des variables aide à diminuer les erreurs d'estimation.

Dans la suite, nous allons rappeler quelques approches qui ont été utilisées principalement pour la mise en œuvre des méthodes de placement de capteurs.

Décomposition matricielle. A l'issue des travaux de Maquin *et al.* [MAQU 86-b, 87-a], fondés sur la décomposition de la matrice d'incidence du graphe associé au processus, Turbatte *et al.* [TURB 91-a-b] ont défini une démarche aboutissant à une instrumentation fiable. Cette décomposition matricielle a été utilisée aussi par Ragot *et al.* [RAGO 90, 92], dans le cas des systèmes bilinéaires pour effectuer le placement de capteurs tout en gardant l'observabilité de l'ensemble des variables. Mazzour *et al.* [MAZZ 95, 96] ont proposé une analyse d'aide au positionnement de capteurs.

Madron et Ververka [MADR 92] ont utilisé une autre classification des variables fondée sur la méthode du pivot. Cette méthode, prenant en compte des critères de coût et de précision, permet de concevoir ou d'améliorer des systèmes d'instrumentation et aboutit à des solutions sous-optimales.

Graphes. On distingue ici plusieurs travaux fondés sur la théorie des graphes [DEO 74] [BERG 83], utilisée pour l'analyse d'observabilité des variables. En utilisant la matrice des cycles du graphe associé au processus, Turbatte [TURB 92] a défini une architecture

d'instrumentation permettant de répondre aux objectifs de surveillance et de fiabilité. Cette approche a été étendue par Luong *et al.* [LUON 94, 95, 96] qui ont introduit la notion de degré de redondance dans le cas des systèmes linéaires statiques.

Une méthode itérative employant des opérateurs spécifiques aux graphes a été développée par Ali et Narasimhan [ALI 93]. Cette approche, étendue dans le cas des systèmes bilinéaires [ALI 96], consiste à observer le système avec un nombre minimal de capteurs, tout en maximisant la fiabilité d'estimation des variables. Dans le même sens, Meyer *et al.* [MEYE 93, 94] ont proposé une architecture d'instrumentation assurant l'observabilité d'un sous ensemble de variables avec un nombre de capteurs optimal.

Graphes bipartis. Les graphes bipartis constituent un outil très intéressant pour les systèmes complexes. En effet, l'analyse structurelle des systèmes est fondée sur la décomposition canonique de la matrice d'incidence codifiant le graphe biparti [DECL 91]. Il s'agit de regrouper les variables selon leur observabilité, et cela permet de mettre en œuvre des procédures de placement de capteurs en vue de la surveillance [CASS 96, 97], [CARP 96, 97]. Cette approche ne nécessite pas d'hypothèse sur le modèle considéré et elle est particulièrement adaptée au cas des systèmes complexes.

Graphes signés. Les premiers travaux sont dus à Ira *et al.* [IRA 81], qui ont proposé une démarche d'analyse de l'architecture d'instrumentation à partir de la modélisation des systèmes par des graphes signés. Ce principe constitue un outil pour minimiser le coût de l'instrumentation pour des contraintes de diagnostic données [SHIO 85], [TSUG 89], [SHIB 91], [TATE 94].

Bond-graphs. Les bond-graphs représentent un outil de modélisation très puissant pour les processus linéaires ou non linéaires composés d'éléments de nature différente (mécanique, électrique, hydraulique, etc, ...). Cette approche permet de prendre en compte la totalité des informations disponibles. Il s'agit d'analyser les divers phénomènes physiques intervenant au niveau du processus, en se fondant sur les échanges énergétiques au sein du système.

Cette approche a été également utilisée pour analyser l'observabilité des variables. En effet, il est possible à partir d'un bond-graph de définir l'ensemble de capteurs rendant un système observable [VERG 94]. D'autres travaux ont été développés concernant la génération des

relations de redondance analytiques [TAGI 94, 95-a-b], l'évaluation de la capacité de détection et de localisation de défauts et l'amélioration de l'architecture d'instrumentation.

Programmation linéaire ou non linéaire mixte. La programmation non linéaire permet de formuler mathématiquement le problème du placement de capteurs en se fondant sur la définition de variables entières qui traduisent la nécessité de mesurer ou non une variable.

Sans utiliser les notions des variables entières, les premiers travaux qui ont considéré le positionnement de capteurs sous forme d'un problème d'optimisation ont été élaborés par Phua et Dillon [PHUA 77]. Cette formulation utilise la programmation non-linéaire pour optimiser simultanément l'observabilité, les erreurs d'estimation et le coût de l'instrumentation.

La programmation linéaire mixte a été utilisée par Immonen [IMMO 94] pour résoudre le problème de placement de capteurs. Il s'agit de chercher à minimiser un critère linéaire à variables entières sous contraintes linéaires à variables réelles. Pour chaque variable, il calcule un degré de calculabilité, connu par Degree Of Calculability (DOC), représentant la tolérance aux fautes de capteurs des estimations de chacune des variables. L'auteur a utilisé ce critère pour la mise on œuvre d'une procédure permettant d'obtenir une architecture d'instrumentation à coût minimal tout en assurant aux variables un certain degré de calculabilité.

Bagajewicz [BAGA 95] a proposé une stratégie de conception d'architecture d'instrumentation très intéressante, tenant compte simultanément de la précision, de la capacité à détecter des défaillances, de la disponibilité et de la robustesse vis à vis des erreurs de mesure et des défauts. Une formulation très détaillée et complète a été développée par l'auteur tenant compte de toutes les contraintes.

Maquin *et al.* [MAQU 95-b-c, 96, 97] ont utilisé la programmation linéaire mixte pour résoudre le problème de positionnement de capteurs. La théorie des graphes a été utilisée pour formuler les contraintes linéaires liées à l'observabilité et à la fiabilité, et le critère à minimiser est le coût de l'instrumentation.

4.2.1.2. Critères d'évaluation

La formulation du problème de placement de capteurs est toujours destinée à trouver des grandeurs représentatives de la qualité d'un système d'instrumentation. Ces grandeurs représentent des critères qui permettent la description la plus juste des objectifs à atteindre. Dans la suite, nous allons citer les différents critères d'optimisation utilisés dans la littérature sur le placement de capteurs. La plupart de ces critères ont été utilisés dans le cas des systèmes linéaires statiques.

Observabilité des variables. L'analyse de l'observabilité d'un système représente une étape primordiale dans le cadre de la surveillance et de la **tolérance aux fautes (paragraphes suivants)**. En effet, la majorité des travaux traitant du problème du placement de capteurs font référence à la notion d'observabilité. Ainsi l'observabilité apparaît comme un critère de positionnement de capteurs. Le problème revient à choisir les variables du système qu'il faut mesurer tout en respectant un cahier des charges donnant les variables devant être observables.

Degré de redondance. Le degré de redondance est un critère structurel qui évalue la capacité à déduire une information perdue (une variable ou une fonctionnelle linéaire), que ce soit par mesure directe ou par déduction.

Les degrés de redondances associés à une variable ont été introduit par Turbatte *et al.* [TURB 91], dans le cas des systèmes statiques, et plusieurs contributions ont été données par Luong *et al.* [LUON 91]. Deux notions ont été définies, “redondance principale de degré k ” et “degré de redondance faible” (voir ANNEXE B).

Dans le paragraphe (cf. V), nous définissons des nouvelles notions de degré de redondance (fort et faible) d'un sous ensemble de capteurs par rapport à une fonctionnelle linéaire donnée.

Fiabilité et disponibilité. Les définitions de base de ces termes sont données par l'annexe C. La fiabilité [TURB 91] et la disponibilité [LUON 97] ont été utilisées comme critères complémentaires pour optimiser le placement de capteurs en vue de la surveillance. Le problème revient à maximiser ces critères. Ali *et al.* [ALI 93] ont proposé une méthode de

maximisation de la fiabilité locale en analysant la fiabilité de chaque variable d'un système linéaire.

Le problème d'optimisation du placement de capteurs a été posé de plusieurs façons. Turbatte *et al.* [TURB 92] ont utilisé le critère de fiabilité de l'instrumentation dans le but d'optimiser le placement de capteurs sous contraintes d'observabilité de variables d'un système à transport de matière ou d'énergie. Luong *et al.* [LUON 95] ont abordé le problème en exprimant la fiabilité de l'instrumentation d'un système linéaire ou bilinéaire en fonction du degré de redondance des variables en partant du principe que plus les variables nécessaires à la conduite ou à la sécurité ont un degré de redondance élevé, plus la fiabilité de l'instrumentation est importante.

Coût de l'instrumentation. Les notions de coût ont été utilisées par beaucoup d'auteurs pour le placement de capteurs. Dans le cas des systèmes linéaires et bilinéaires, Maquin *et al.* [MAQU 95] ont formulé le problème de placement à coût minimal par des contraintes, de telle façon que le coût global de l'instrumentation ne dépasse pas un certain seuil.

L'autre façon de tenir compte du coût est d'affecter un poids à chaque capteur mesurant une variable du système et de calculer le coût total de la configuration de capteurs en faisant la somme des coûts de chaque capteur. L'objectif est de retenir la configuration de capteurs la moins chère. Immonen [IMMO 94] et Bagajawicz [BAGA 95] ont utilisé la programmation linéaire ou non linéaire pour résoudre ce problème, tandis qu'une procédure multicritère a été utilisée par Carpentier et Litwak [CARP 99].

Phua et Dillon [PHUA 77] ont proposé une méthode, qui utilise la programmation non linéaire dont l'objectif est de minimiser l'erreur d'estimation et le coût de l'instrumentation.

Précision des estimations. La précision des estimation des variables d'état est directement liée à la précision des mesures à partir desquelles l'estimation a été effectuée. Des travaux ont permis de montrer l'influence de la précision de capteurs sur l'estimation des variables d'un système [RAGO 90]; ce qui donne une évaluation de la qualité d'une architecture d'instrumentation donnée. Ainsi, l'erreur de l'estimation peut être naturellement un critère de placement de capteurs.

Kretsovalis *et al.* [KRET 87] ont mis au point une méthode de placement de capteurs s'appuyant sur l'utilisation d'arbres et visant à minimiser l'erreur d'estimation. D'autres travaux ont utilisé la variance de l'estimation [MAQU 94]. Abdollahzadeh *et al.* [ABDO 96] ont proposé une méthode dont l'objectif est de pouvoir définir la précision des mesures permettant d'obtenir une précision désirée pour les estimations, pour une architecture d'instrumentation donnée.

D'autres travaux ont été développés utilisant la matrice d'information de Fisher des paramètres inconnus à estimer [KOSU 82] et la matrice représentant l'entropie des paramètres à estimer [PHUA 77].

Critères de qualité d'estimation [MÜLL 72], [ARBE 82], [JOHN 96]. Les conditions d'observabilité ne fournissent aucune information sur la qualité d'estimation. Des critères variés ont été proposés pour cet objectif, parmi lesquels on cite :

- l'analyse de la sensibilité de la matrice de covariance de l'estimation [ARBE 82]
- l'utilisation du gramien d'observabilité [MÜLL 72] défini par :

$$W = C^T C + A^T C^T C A + \dots + (A^T)^{p-1} C^T C A^{p-1} \quad (4.1)$$

où A et C sont respectivement les matrices d'état et d'observation du système (3.1).

Les mesures associées à cette matrice sont :

$$- \gamma_1 = \lambda_{\min}(W) \quad (4.2a)$$

$$- \gamma_2 = \frac{n}{\text{tr}(W^{-1})} \quad (4.2b)$$

$$- \gamma_3 = \sqrt[n]{\det W} \quad (4.2c)$$

Ces mesures vérifient les axiomes suivantes :

$$1. \gamma(W) = 0 \text{ si } \det(W) = 0, \quad (4.3a)$$

$$2. \gamma_i(W) > 0 \text{ si } \det(W) > 0, \quad (4.3b)$$

$$3. \gamma_i(kW) = k \gamma_i(W), \forall W \geq 0, \quad (4.3c)$$

$$4. \gamma_i(W_1) \geq \mu_i(W_2) + \mu_i(W_3), \text{ pour } W_1 = W_2 + W_3. \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.3d)$$

Ces critères peuvent être intégrés sous une seule forme, telle que :

$$m_s = m_s(\Lambda(W)) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \lambda_i^s \right)^{1/s}, \quad (4.4)$$

où $\Lambda(W)$ est l'ensemble de n valeurs propres λ_i de la matrice $W \geq 0$ et s tel que :

$$\begin{cases} \gamma_1 = \lim_{s \rightarrow -\infty} m_s = m_{-\infty} \\ \gamma_2 = m_{-1} \\ \gamma_3 = \lim_{s \rightarrow 0} m_s = m_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

4.2.2. Sélection d'actionneurs

La sélection d'actionneurs représente une étape très importante, qui aide à augmenter les performances de la loi de commande d'un processus. Dans la littérature, ce problème a été étudiée en combinaison avec le placement de capteurs [CAO 95], [VAL 95], [LEE 95], [MARC 98] ou indépendamment [SUNA 97], [TIM 98].

De nombreuses approches ont été utilisées pour résoudre ce problème, parmi lesquelles nous pouvons citer l'approche statistique utilisée par Burdisso et Haftka [BURD 89, 90] et les algorithmes génétiques par Rao et Venkayya [RAO 91].

Viswanathan *et al.* [VISW 84] et, Linndgerg et Longman [LINN 82] ont défini les notions de degré de commandabilité et les ont appliquées pour optimiser le positionnement d'actionneurs. Skelton et Delorenzo [SKEL 83] et, Skelton et Chiu [SKEL 83] ont utilisé les notions du coût pour sélectionner l'ensemble d'actionneurs le moins cher. Une nouvelle mesure de commandabilité (indices de commandabilité) pour les systèmes linéaires à temps invariants a été introduite par Youdan et Junkins [YOUND 91] et appliquée pour la sélection d'actionneurs. D'autres critères ont été utilisés, comme exemple, nous citons la fiabilité [RAYM 85], [HOBL 00-d], le degré de redondance [HOBL 00-b].

Au niveau pratique, nous pouvons trouver de nombreuses applications telles que les systèmes flexibles [LIM 98], [ROH 97], les systèmes de transport [ANTO 00], ...

4.3. Représentation graphique des sous Ensembles de capteurs (d'actionneurs) Redondants

Le modèle linéaire et invariant en présence de pertes de capteurs auquel nous nous intéressons est donné par les équations (4.6) :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y_d(k) = C_d x(k) \\ e(k) = Ex(k) \end{cases} \quad (4.6)$$

où C_d est la matrice d'observation obtenue en éliminant les lignes correspondantes aux capteurs perdus, $x \in \mathcal{X}^n$ est l'état, $u \in \mathcal{X}^m$ l'entrée et $y \in \mathcal{Y}^p$ la sortie et $e \in \mathcal{Y}^p$ est un vecteur à estimer.

Dans la suite de ce chapitre, nous considérons I comme l'ensemble de capteurs du système d'instrumentation et J un sous ensemble inclus dans I .

L'ensemble des sous ensembles de I peut être représenté par un automate, dans lequel :

- l'ensemble complet des capteurs représente l'état initial,
- un nœud représente une situation de perte de capteurs,
- un niveau contient toutes les situations de pertes, dont les sous ensembles correspondants ont le même cardinal,
- une transition t_{ij} est une fonction booléenne ou probabiliste entre un nœud du niveau k et un nœud du niveau $k+1$, qui définit la condition de passage entre deux situations de pertes.

Nous pouvons remarquer que, si le cardinal de I est égal à p , le nombre des sous-ensembles inclus dans I est égal à 2^p . Chacun (sauf I) correspond à une configuration du système résultant de la perte d'un ou plusieurs capteurs.

4.3.1. Exemple 1

Soit $I=\{a, b, c\}$, l'ensemble de capteurs disponibles. L'ensemble des situations possibles est donné par :

$S = \{s(a), s(b), s(c)\}, t.q. s(k) \in \{0 = \text{capteur défaillant}, 1 = \text{capteur sain}\} \forall k \in \{a, b, c\}$.

Dans cet exemple, les situations possibles $\{1, 1, 1\}, \{1, 1, 0\}, \{1, 0, 1\}, \{0, 1, 1\}, \{1, 0, 0\}, \{0, 1, 0\}, \{0, 0, 1\}, \{0, 0, 0\}$ sont respectivement représentées par les nœuds 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8.

La figure 4.1. illustre un tel automate :

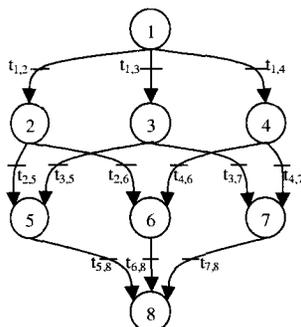


Figure 4.1. Automate générant toutes les situations de pertes

t_{ij} représente une transition avec $t_{ij}=1-s(\alpha)$, où α est le capteur qui était présent en situation i et qui est non présent en situation j .

Les règles suivantes peuvent être définies :

- Une fonctionnelle linéaire e est observable par un sous ensemble de capteurs J , si et seulement si l'espace couvert Ω_J par la matrice d'observabilité correspondante contient ImE (cf. III.3.1).

$$Im(E) \subset \Omega_J \tag{4.7}$$

- Une fonctionnelle linéaire e observable par un sous ensemble de capteurs J , est observable par n'importe quel sous ensemble de capteurs contenant J .

Pour distinguer les sous ensembles de I pour lesquels la fonctionnelle linéaire e est observable, i.e. les ER et EM , ceux-ci sont représentés par des nœuds gris. Si e est estimable avec les nœuds 1, 2, 3, 4, et 5, alors l'automate de la figure 4.1 devient :

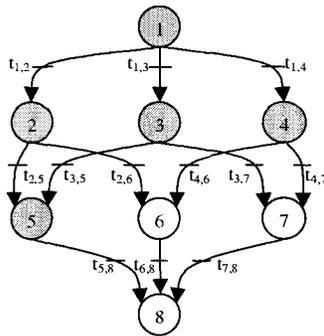


Figure 4.2. Automate générant tous les ER par rapport à E

Les nœuds 4 et 5, dont les successeurs sont en blanc, sont des situations terminales correspondant à des sous ensembles EM par rapport à E .

4.3.2. Implantation

Du point de vue pratique, un tel automate peut être placé en aval d'un bloc FDI pour déterminer si l'ensemble de capteurs restant est capable d'accomplir la tâche d'estimation ou non (cf. figure 4.3.). En effet, l'automate reçoit des informations binaires sur les situations actuelles des capteurs (0 = capteur défaillant, 1 = capteur sain), et donne à la sortie une indication binaire si l'ensemble de capteurs restant est un ER par rapport à E ou non (0 = non- ER , 1 = ER ou EM). Si le nœud atteint est en gris, on peut continuer à estimer le vecteur e , sinon une procédure de réparation doit être suivie, pour éliminer le risque, dans les meilleurs délais.

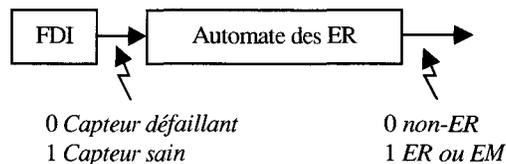


Figure 4.3. Implantation d'un automate des ER

Cet automate constitue donc un modèle de base pour analyser la tolérance aux fautes d'un système d'instrumentation (d'action) en vue de l'estimation (de la commande) d'une fonctionnelle linéaire e que nous allons présenter.

4.4. Evaluation de la tolérance aux fautes

Soit F le sous graphe contenant les situations grises de l'automate des ER . Supposons que tous les capteurs sont en fonctionnement normal au départ : le système part du sommet initial I et transite vers un niveau inférieur à chaque perte de capteur, jusqu'à arriver en un nœud terminal en lequel la perte de tout capteur supplémentaire causera la perte de l'observabilité, i.e. l'impossibilité d'estimer la fonctionnelle e . La tolérance aux fautes de capteurs peut donc s'évaluer par la longueur de ces chemins, elle même fonction de la pondération de leurs arcs. Nous proposons alors d'utiliser deux pondérations :

- la pondération unitaire conduit à des mesures structurelles (degrés de redondance), qui évaluent le nombre de capteurs qu'il faut perdre pour que le système devienne inobservable,
- la pondération probabiliste conduit à une mesure de fiabilité qui évalue le temps moyen avant la perte de la propriété d'observabilité.

L'analyse de la capacité d'un système à tolérer les fautes revient donc à une évaluation structurelle ou fiabiliste.

4.4.1. Evaluation Structurelle

Dans cette partie, nous généralisons les définitions de degrés de redondance en les associant à un couple (J, e) , où J est le sous ensemble de capteurs utilisé pour estimer e , dans le cas des systèmes dynamiques. En considérant l'automate présenté dans le paragraphe précédent, ces degrés possèdent des interprétations graphiques comme on le verra par la suite.

4.4.1.1. Définitions

Degré de redondance faible. Le degré de redondance faible $d_f(J, e)$ associé au couple (J, e) est le nombre maximal de capteurs de J qu'on peut perdre tout en continuant à estimer la fonctionnelle linéaire e . Ce degré est donné par : $d_f(J, e) = |J| - \min_i |EM_i|$, où EM_i représente un sous ensemble de capteurs minimal quelconque inclus dans J .

Le degré de redondance faible est une mesure « optimiste » de la tolérance aux fautes, comme le montre l'exemple suivant :

$$I = \{a, b, c\}, EM_1 = \{a\}, EM_2 = \{b, c\}$$

Le degré de redondance faible est 2. En effet, on peut perdre b et c tout en continuant à estimer e grâce à a , mais on voit qu'il suffit de perdre le capteur a pour aboutir à $\{b, c\}$ qui est un EM c'est-à-dire qu'il ne tolère plus aucune perte. Une mesure plus réaliste (en ce sens qu'elle est pessimiste, donc qu'elle fournit une tolérance garantie) est donnée par le degré de redondance fort.

Degré de redondance fort. Le degré de redondance fort $d_F(J, e)$ associé au couple (J, e) est le nombre maximal des capteurs de J qu'on peut perdre tout en continuant à estimer la partie de variables d'état e , quels que soient ces capteurs perdus. Analytiquement, ce degré est donné par : $d_F(J, e) = |J| - \max_i |non - ER_i| - 1$.

4.4.1.2. Interprétation graphique.

En considérant le graphe F , on a :

- le degré de redondance faible associé au couple (J, e) peut être interprété comme la longueur du chemin le plus long entre la situation j et n'importe quelle situation terminale successeur de j .
- le degré de redondance fort associé au couple (J, e) est la longueur du chemin le plus court entre j et n'importe quel successeur correspondant à un sous ensemble de capteurs non- ER moins un.

La différence entre les degrés de redondance faible et fort peut être illustrée comme suit :

Soient $d_f(J, e)$ et $d_F(J, e)$ les degrés associés au couple (J, e) . Alors :

$\exists K \subset J$ tel que $\text{card } K = d_f(J, e)$ et $J \setminus K$ est un EM

$\forall K \subset J$ tel que $\text{card } K = d_F(J, e)$ alors $J \setminus K$ est un ER

Evidemment on a :

$\forall J \subset I$ $d_F(J, e) \leq d_f(J, e)$, et $d_F(J^*, e) = d_f(J^*, e) = 0$ pour n'importe quelle situation terminale j^* .

4.4.1.3. Exemple 2

Considérons le modèle linéarisé continu du "CCV-type aircraft" décrit analytiquement par Syrmos et Lewis [SYRM 93]. Le modèle discrétisé est donné par les matrices:

$$A = \begin{bmatrix} -1.341 & 0.9933 & 0 & -0.1689 & -0.2518 \\ 43.223 & -0.8693 & 0 & -17.251 & -1.5766 \\ 1.341 & 0.0067 & 0 & 0.1689 & 0.2518 \\ 0 & 0 & 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -20 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 47.76 & -0.268 & 0 & -4.56 & 4.45 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

où E est une matrice de sélection des variables d'état.

Les vecteurs d'état x , de sortie y et de commande u sont respectivement donnés $[\alpha \ q \ \gamma \ \delta_e \ \delta_f]$, $[\gamma \ n_{zp} \ \delta_e \ \delta_f]$ et $[\delta_{e_c} \ \delta_{f_c}]$, où α est l'angle d'incidence, q la vitesse avec laquelle l'avion pivote verticalement, γ l'angle de descente ou la pente, δ_e la déflexion de la gouverne de profondeur, δ_f la déflexion du flaperon, δ_{e_c} la commande de la gouverne de profondeur, δ_{f_c} la commande du flaperon et n_{zp} l'accélération normale à la station de pilotage.

Dans cet exemple, nous allons analyser la tolérance aux fautes en utilisant les degrés de redondance forts comme critères d'évaluation.

Soit $e=[x_1, x_2, x_4, x_5]=Ex$ la fonctionnelle linéaire à estimer.

Le système d'instrumentation contient 16 sous ensembles de capteurs. Le tableau de correspondance entre ces sous ensembles et les situations de pertes est donné par :

Situations	J	Situations	J
1	{a, b, c, d}	9	{a, d}
2	{b, c, d}	10	{a, b}
3	{a, c, d}	11	{a, c}
4	{a, b, d}	12	{a}
5	{a, b, c}	13	{b}
6	{c, d}	14	{c}
7	{b, d}	15	{d}
8	{b, c}	16	{}

Tableau 4.1. Codage des situations

Le système possède 10 ER par rapport à E parmi lesquels, 5 sont des EM par rapport à E . Ces ER sont $\{a, b, c, d\}$, $\{b, c, d\}$, $\{a, c, d\}$, $\{a, b, d\}$, $\{a, b, c\}$, $\{b, d\}$, $\{b, c\}$, $\{a, d\}$, $\{a, b\}$ et $\{a, c\}$.

L'automate qui génère tous les ER par rapport à E est donné par la figure suivante :

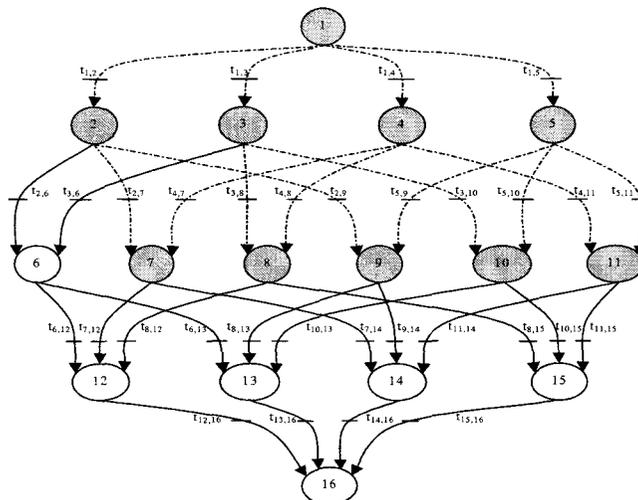


Figure 4.4. Automate des ER par rapport à E

Les degrés de redondance sont donnés par le tableau 4.2. :

J	$d_f(J, x)$	$d_F(J, x)$
{a, b, c, d}	2	1
{b, c, d}	1	0
{a, c, d}	1	0
{a, b, d}	1	1
{a, b, c}	1	1
{b, d}	0	0
{a, d}	0	0
{a, c}	0	0
{a, b}	0	0
{b, c}	0	0

Tableau 4.2. Degrés de redondance des ER par rapport à E

Evaluation de la tolérance aux fautes en fonction en fonction des degrés de redondance

L'ordre croissant de la tolérance aux fautes des sous ensembles ER sous critère de degré de redondance (*fort, faible*) est donné par la figure 4.5 :

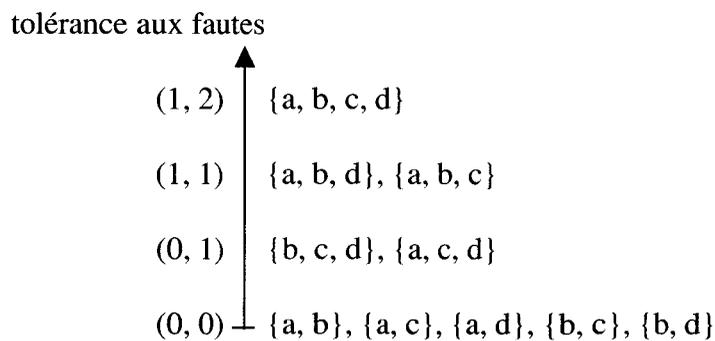


Figure 4.5. Tolérance aux fautes des ER

4.4.2. Evaluation fiabiliste

Les définitions de base de la fiabilité, de la disponibilité et de la maintenabilité sont données par l'annexe C.

Dans cette partie nous utilisons ces critères pour analyser la tolérance aux fautes d'un système d'instrumentation ou d'action.

Soit 0 l'instant initial (tous les capteurs sont sains). La longueur du chemin entre le nœud I et le nœud courant à l'instant t représente le nombre de capteurs perdus pendant l'intervalle de temps $[0, t[$. Les pertes de capteurs étant des événements dont on peut évaluer la probabilité, une mesure de la tolérance aux fautes du système I peut être fournie par la probabilité pour que l'estimation de e soit possible dans l'intervalle $[0, t[$, sous l'hypothèse qu'elle l'était à l'instant 0 .

Le graphe F contient les situations telles que l'estimation de la partie e reste possible. Pour les autres situations, l'estimation est impossible. Au delà, on peut être intéressé par la fiabilité de l'estimation de e , i.e. la probabilité pour que l'estimation de e dans un intervalle de temps $[0, t[$ donné soit possible, sous l'hypothèse que e soit estimable à l'instant 0 . Cette fiabilité est caractérisée par le calcul du MTTNO (Mean Time To Non-Observability).

4.4.2.1. Calcul du MTTNO d'un système d'instrumentation par rapport à E

La probabilité de l'estimation de e pour un sous ensemble de capteurs K inclus dans I , sur l'intervalle de temps $[0, t[$ est donnée par :

$$R(e/K, t) = P(e \wedge K).R(K, t) \quad (4.8)$$

$$\text{où } P(e \wedge K) = \begin{cases} 1 & \text{Pour un noeud gris} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

et $R(K, t)$ évalue la fiabilité de l'ensemble de capteurs, définie comme la probabilité pour que tous les capteurs de K soient en bon fonctionnement sur un intervalle de temps $[0, t[$. Si l'on suppose les pertes de capteurs indépendantes (pas de défaillances de mode commun), on a :

$$R(K, t) = \prod_{k \in K} R_k(t) \prod_{k \notin K} (1 - R_k(t)) \quad (4.9)$$

où $R_k(t)$ est la fiabilité du capteur k . Cette probabilité individuelle est souvent modélisée en utilisant la distribution de Poisson :

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t) \quad (4.10)$$

où λ_k est le coefficient de défaillance du capteur k (supposé constant) (voir ANNEXE D).

Comme les sous ensembles du graphe F sont exclusifs, on a :

$$R(e/I, t) = \sum_{K \subset I} P(e \wedge K).R(K, t) \quad (4.11)$$

et le temps moyen pour obtenir un sous-ensemble *non-ER* en partant de l'ensemble I à l'instant 0 est évalué par le temps moyen avant disparition de la propriété d'observabilité (Mean Time To Non-Observability) :

$$MTTNO(I) = \int_0^{\infty} R(e/I, t) dt \quad (4.12)$$

Exemple 3

Prenons le système décrit dans l'exemple 2 et supposons que la probabilité de bon fonctionnement de chaque capteur k est modélisée par la distribution de Poisson :

$$R_k(t) = \exp(-\lambda_k t)$$

où λ_k sont les taux des défaillances de capteurs, donnés par : $\lambda_k = \lambda = 0.4 \times 10^{-5} H^{-1}$, $\forall k \in I$.

Les probabilités de bon fonctionnement des sous ensembles J de I pour estimer e sont données par le tableau suivant :

J	Prob. d'estimation	J	Prob. d'estimation
{a, b, c, d}	R ₄	{b, c}	R ₁
{a, b, c}	R ₃	{b, d}	R ₁
{a, b, d}	R ₃	{c, d}	0
{a, c, d}	R ₂	{a}	0
{b, c, d}	R ₂	{b}	0
{a, b}	R ₁	{c}	0
{a, c}	R ₁	{d}	0
{a, d}	R ₁	{}	0

Tableau 4.3. Probabilités de bon fonctionnement des sous ensembles de capteurs

où $R_1 = \exp(-2\lambda t)$, $R_2 = 2\exp(-2\lambda t) - \exp(-3\lambda t)$, $R_3 = 3\exp(-2\lambda t) - 2\exp(-3\lambda t)$ et $R_4 = 2\exp(-4\lambda t) - 6\exp(-3\lambda t) + 5\exp(-2\lambda t)$

Les temps moyens pour perdre l'observabilité de e (*MTTNO*) sont donnés par le tableau 4.4. :

J	MTTNO	J	MTTNO
{a, b, c, d}	2.5×10^5 H	{b, c}	$1.25 \cdot 10^5$ H
{a, b, c}	2.08×10^5 H	{b, d}	$1.25 \cdot 10^5$ H
{a, b, d}	2.08×10^5 H	{c, d}	0
{a, c, d}	1.66×10^5 H	{a}	0
{b, c, d}	1.66×10^5 H	{b}	0
{a, b}	$1.25 \cdot 10^5$ H	{c}	0
{a, c}	$1.25 \cdot 10^5$ H	{d}	0
{a, d}	$1.25 \cdot 10^5$ H	{}	0

Tableau 4.4. *MTTNO des sous ensembles de capteurs*

4.4.3. Coût de l'instrumentation

Dans le cas de notre graphe d'analyse, nous proposons d'associer à chaque capteur un poids représentant le coût. A chaque nœud du graphe des sous ensembles redondants et minimaux, on associe la somme des coûts correspondante. L'objectif est de choisir l'instrumentation la moins chère lorsque plusieurs solutions sont obtenues en utilisant les critères de degré de redondance fort ou de la fiabilité.

Exemple 4

Prenons le système de l'exemple 2. Les sous ensembles de capteurs sélectionnés sont $\{a, b, d\}$ et $\{a, b, c\}$. Si on suppose que le capteur c (mesurant la température par exemple) est moins cher que le capteur d (mesurant le débit), le coût peut être utilisé comme un critère supplémentaire. Le problème revient donc à choisir l'ensemble redondant $\{a, b, c\}$ le plus tolérant et le moins cher.

4.5. Conception de schémas d'instrumentation tolérants aux fautes

Nous proposons un algorithme qui permet de construire tous les sous-ensembles redondants et minimaux d'un ensemble de capteurs I donné, et de calculer les mesures structurelles et probabilistes qui leur sont associées (l'extension aux actionneurs est immédiate). Lorsque I est l'ensemble des capteurs *installés* sur le processus, l'algorithme permet l'analyse de la tolérance aux fautes et la définition des procédures d'accommodation des défaillances lorsque celles-ci existent. Lorsque I est un ensemble de capteurs possibles d'un système, l'algorithme permet la conception d'un schéma d'instrumentation caractérisé par des propriétés de tolérance aux fautes spécifiées (on parle aussi dans la littérature, de sélection de capteurs). L'algorithme proposé repose sur une exploitation ascendante du graphe défini précédemment.

4.5.1. Remarques, symboles et notations

a) Pour un niveau k de l'automate des parties :

- le cardinal de chaque nœud est $p - k$,
- chaque nœud possède k prédécesseurs au niveau $k-1$.

b) A chaque nœud on associe :

- un sous ensemble de capteurs J ,
- la matrice d'observabilité $OBS(J, v(J))$, où $v(J) = (v(i), i \in J)$ sont les indices d'observabilité individuels des capteurs de J ,
- son marquage : gris si J est un *ER*, blanc autrement,
- $S(J)$ l'ensemble de ses successeurs gris au niveau suivant du treillis,
- $d_F(J, e)$ et $d_f(J, e)$ ses degrés de redondance fort et faible,
- $d_F^-(J, e)$ le degré de redondance fort minimal sur $S(J)$,
- $d_f^+(J, e)$ le degré de redondance faible maximal sur $S(J)$,
- la fonction de fiabilité $R(J, t)$,

- le $MTTNO(J)$, temps moyen pour atteindre la non-observabilité.

4.5.2. Propriétés

La complexité de l'algorithme, due à une possible explosion combinatoire (le treillis des parties d'un ensemble de cardinal p comprend 2^p éléments), peut être largement maîtrisée en remarquant que la propriété d'observabilité se propage des niveaux inférieurs vers les niveaux supérieurs du treillis, et en calculant les indicateurs de tolérance aux fautes de façon itérative.

4.5.2.1. Marquage

Le marquage d'un nœud est gris ssi :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ OBS(J, v(J)) \end{bmatrix} = \text{rang}[OBS(J, v(J))] \quad (4.18)$$

Cependant, le test n'est pas nécessaire en tout nœud, grâce à la propriété suivante (évidente).

Propriété 1

Tous les prédécesseurs d'un nœud gris sont gris. Tous les successeurs d'un nœud blanc sont blancs.

4.5.2.2. Calcul des degrés de redondance

Les deux propriétés suivantes permettent le calcul des degrés de redondance.

Propriété 2 (initialisation)

Pour tout nœud blanc ou terminal J^* :

$$d_F(J^*, e) = d_f(J^*, e) = 0 \quad (4.19)$$

Propriété 3 (itération)

Pour tout nœud gris de niveau k , on a :

$$d_F(J, e) = 0 \quad \text{si } |S(J)| < p - k \quad (4.20a)$$

$$d_F(J, e) = d_F^-(J, e) + 1 \quad \text{si } |S(J)| \geq p - k \quad (4.20b)$$

$$d_f(J, e) = d_f^+(J, e) + 1 \quad (4.20c)$$

4.5.2.3. Mesure de fiabilité

Propriété 4 (initialisation)

- La fonction de fiabilité associée à un nœud blanc est nulle
- La fonction de fiabilité associée à un nœud gris terminal est :

$$R(J, t) = \prod_{i \in J} R_i(t) \quad (4.21)$$

Propriété 5 (itération)

La fonction de fiabilité associée à un nœud gris non-terminal est :

$$R(J, t) = \prod_{i \in J} R_i(t) + \sum_{L \in S(J)} R(L, t) \bar{R}(L, t) \quad (4.22)$$

$$\text{où } \bar{R}(L, t) = \prod_{i \in J \setminus L} (1 - R_i(t))$$

4.5.3. Algorithme

L'algorithme proposé comporte deux phases principales. La première (**INI**) marque le niveau le plus bas du graphe et calcule les degrés de redondance et le MTTNO de chaque nœud marqué. La deuxième (**Marquage $k \rightarrow k-1$**), consiste à marquer un niveau $k-1$ à partir du niveau k précédemment marqué.

La condition d'arrêt est :

- soit $k = 0$, si l'on cherche à exploiter tous les niveaux du graphe F (I est l'ensemble des capteurs implantés),
- soit la rencontre d'au moins un sous ensemble de capteurs possédant les degrés de redondance ou le MTTNO requis si l'on cherche à concevoir un système d'instrumentation (I est un ensemble de capteurs implantables).

1. Phase INI,

Pour chaque capteur $i \in I$:

- calculer son indice d'observabilité individuel $v(i)$ et suivant le test (4.13) marquer chaque nœud du niveau bas avec la couleur convenable,
- initialiser les degrés de redondance associés (zéro si le nœud est gris, -1 , sinon),
- calculer $MTTNO(\{i\})$ en utilisant $R(\{i\}, t) = R_i(t)$.

Fin Pour

2. Phase Marquage $k \rightarrow k-1$

Plusieurs étapes peuvent être distinguées dans cette phase :

Pour chaque nœud du niveau k :

- Marquage : si le nœud est gris, tous ses prédécesseurs au niveau $k-1$ sont également gris (*propriété 1*), si le nœud est blanc, tester la *propriété 2*.

Fin Pour

Pour chaque nœud gris de niveau $k-1$:

- calculer les degrés de redondance fort et faible en appliquant les propriétés 2 et 3.
- calculer les fonctions de fiabilité et le temps moyen MTTNO avec les propriétés 4 et 5.

Fin Pour

4.6. Conclusion

Nous avons présenté l'étude de la conception de l'architecture des systèmes d'instrumentation (d'action). Cette étude est élaborée en vue de la tolérance aux fautes en cas de pertes de capteurs (d'actionneurs). L'objectif est de garder les propriétés d'observabilité (de commandabilité) de l'état du système ou en général d'une fonctionnelle linéaire de l'état du système.

L'outil d'analyse consiste à déterminer un automate contenant tous les chemins possibles d'accommodation/reconfiguration, tenant compte de pertes de capteurs (d'actionneurs), qui permettent de résoudre le problème de l'estimation (commande).

Pour évaluer les chemins de cet automate, on a défini deux critères structurel et fiabiliste. Le premier consiste à calculer le degré de redondance fort d'un système d'instrumentation, tandis que l'autre calcule le temps moyen pour la perte de l'observabilité.

Cette analyse est très utile, puisqu'elle permet, en fonction de pertes de capteurs ou d'actionneurs, de déterminer instantanément quelle capacité possède le système à tolérer les fautes et donc d'intervenir plus efficacement pour mener une action de réparation urgente.

Chapitre 5

Applications

5.1. Placement de Capteurs d'un système thermique « cycle eau-vapeur d'un navire »

Dans ce paragraphe, nous allons appliquer l'algorithme proposé au chapitre précédent sur un système thermique « cycle eau-vapeur d'un navire » [CHEM 78]. La figure 5.1. représente le schéma de principe de l'installation.

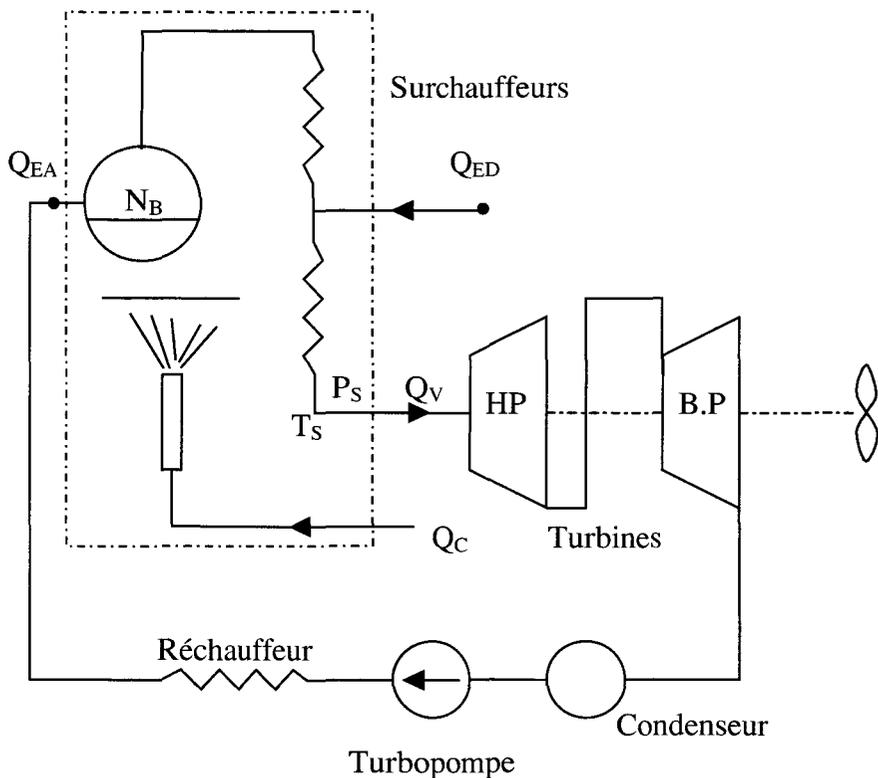


Figure 5.1. Cycle eau-vapeur

La vapeur produite dans le ballon est surchauffée avant d'alimenter le groupe des turbines, haute et basse pressions, capable de fournir une grande puissance. La vapeur détendue est

refroidie dans le condensateur et l'eau condensée est renvoyée dans le ballon, après avoir été réchauffée, au moyen d'une turbopompe.

Cette brève description du processus ne reflète pas le fonctionnement exact du cycle mais nous permet de connaître les entrées principales de commande, qui sont U_{EA} , U_C , et Q_{ED} correspondant respectivement aux grandeurs d'action Q_C (débit de combustible), Q_{EA} (débit d'eau alimentaire) et Q_{ED} (débit d'eau de surchauffe), et les sorties N_B (niveau d'eau du ballon), P_S (pression de vapeur à la sortie des surchauffeurs), T_S (température de vapeur à la sortie des surchauffeurs), Q_{EA} , Q_C et Q_{ED} .

Les matrices A , B , C et E du modèle discret sont données par (5.1) :

$$A=10^{10} \begin{bmatrix} 10^{10} & -123 & -499000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 98680 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 710^5 & 99930 \cdot 10^5 & -193000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 99890 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 99200 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \cdot 10^5 & -10 \cdot 10^5 & -310 \cdot 10^5 & 99690 \cdot 10^5 & 0 \\ 0 & -28 & -114000 & 0 & 0 & 0 & 99220 \cdot 10^5 \\ 0 & 0 & 0 & -67500 & 0 & 0 & -440 \cdot 10^5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -133000 & -3510 \cdot 10^5 & 3510 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -55000 & -1480 \cdot 10^5 & 1480 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots$$

$$\dots \begin{bmatrix} 0 & 30 \cdot 10^5 & 240 \cdot 10^5 & 10 \cdot 10^5 & 80 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 250 \cdot 10^5 & 2760 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & -10 \cdot 10^5 & -90 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -40 \cdot 10^5 & -320 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4000 \cdot 10^5 & 0 & 0 & -30700 & -30 \cdot 10^5 & 10 \cdot 10^5 & 140 \cdot 10^5 \\ 10^{10} & -1.48 & -2245 & 20 \cdot 10^5 & 200 \cdot 10^5 & -10 \cdot 10^5 & -80 \cdot 10^5 \\ 0 & 85210 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 21560 \cdot 10^5 & 76580 \cdot 10^5 & -625 & -1320 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 67030 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14840 \cdot 10^5 & 81870 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 76580 \cdot 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2555 & -543 & 12930 \cdot 10^5 & 85210 \cdot 10^5 \end{bmatrix}$$

S	J	S	J	S	J	S	J
1	{a, b, c, d, e, f}	17	{a, d, e, f}	33	{b, c, d}	49	{b, d}
2	{a, b, c, d, e}	18	{b, c, d, e}	34	{b, c, e}	50	{b, e}
3	{a, b, c, d, f}	19	{b, c, d, f}	35	{b, c, f}	51	{b, f}
4	{a, b, c, e, f}	20	{b, c, e, f}	36	{b, d, e}	52	{c, d}
5	{a, b, d, e, f}	21	{b, d, e, f}	37	{b, d, f}	53	{c, e}
6	{a, c, d, e, f}	22	{c, d, e, f}	38	{b, e, f}	54	{c, f}
7	{b, c, d, e, f}	23	{a, b, c}	39	{c, d, e}	55	{d, e}
8	{a, b, c, d}	24	{a, b, d}	40	{c, d, f}	56	{d, f}
9	{a, b, c, e}	25	{a, b, e}	41	{c, e, f}	57	{e, f}
10	{a, b, c, f}	26	{a, b, f}	42	{d, e, f}	58	{a}
11	{a, b, d, e}	27	{a, c, d}	43	{a, b}	59	{b}
12	{a, b, d, f}	28	{a, c, e}	44	{a, c}	60	{c}
13	{a, b, e, f}	29	{a, c, f}	45	{a, d}	61	{d}
14	{a, c, d, e}	30	{a, d, e}	46	{a, e}	62	{e}
15	{a, c, d, f}	31	{a, d, f}	47	{a, f}	63	{f}
16	{a, c, e, f}	32	{a, e, f}	48	{b, c}	64	{}

Tableau 5.1. Codage des situations

Le problème de placement de capteurs consiste à rechercher un (ou plusieurs) sous ensemble de capteurs qui vérifie simultanément les deux critères suivants :

- les degrés de redondance fort et faible sont respectivement égaux au moins à 1 et 3.
- le temps moyen $MTNO$ avant l'apparition des premières défaillances est au moins égal à $3.10^5 H$.

Dans la suite on va détailler l'exécution de l'algorithme proposé.

Etape INI, (N₀)

Les indices d'observabilité individuels des capteurs a, b, c, d, e et f sont respectivement 8, 7, 12, 7, 2 et 9. Sur ce niveau, les conditions d'observabilité de e sont satisfaites seulement

pour le nœud 63. Donc, celui-ci est marqué en gris tandis que les autres sont en blanc (cf. figure 5.2-a).

Les degrés de redondance fort et faible du nœud 63 sont nuls tandis que pour les autres (niveau N_0), ils sont égaux à -1 .

De même, le $MTTNO$ est égal $2.5 \cdot 10^5 H$. pour le nœud 63 tandis que pour les autres, il est nul.

Etape Marquage $N_0 \rightarrow N_1$

Le nœud 63 étant en gris, la *propriété 1* nous permet de marquer en gris les nœuds 47, 51, 54, 56 et 57. Les nœuds 58, 59, 60, 61 et 62 étant en blanc, l'application de la *propriété 2* nous permet de marquer en gris les nœuds 44, 48 et 52. Les autres nœuds sont en blanc (cf. figure 5.2-b).

En appliquant la *propriété 3*, les degrés de redondance fort et faible des nœuds *du niveau N_1* sont donnés par le tableau suivant.

S	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
$d_f(S, e)$	-1	0	-1	-1	1	0	-1	-1	1	0	-1	1	-1	1	1
$d_F(S, e)$	-1	0	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	-1	0	0

Tableau 5.2. Degrés de redondance des nœuds du niveau N_1

Les probabilités de bon fonctionnement « **R** » des situations de pertes « **S** » situées sur ce niveau sont données par le tableau suivant :

S	R	S	R	S	R
43	0	48	$\exp(-2\lambda t)$	53	0
44	$\exp(-2\lambda t)$	49	0	54	$\exp(-\lambda t)$
45	0	50	0	55	0
46	0	51	$\exp(-\lambda t)$	56	$\exp(-\lambda t)$
47	$\exp(-\lambda t)$	52	$\exp(-2\lambda t)$	57	$\exp(-\lambda t)$

Tableau 5.3. Probabilités de bon fonctionnement des nœuds marqués du niveau N_1

et les *MTTNO* sont donnés par :

S	MTTNO	S	MTTNO	S	MTTNO
43	0	48	$1.25 \cdot 10^5 H$	53	0
44	$1.25 \cdot 10^5 H$	49	0	54	$2.5 \cdot 10^5 H$
45	0	50	0	55	0
46	0	51	$2.5 \cdot 10^5 H$	56	$2.5 \cdot 10^5 H$
47	$2.5 \cdot 10^5 H$	52	$1.25 \cdot 10^5 H$	57	$2.5 \cdot 10^5 H$

Tableau 5.4. *MTTNO des nœuds marqués (N_1)*

Les conditions d'arrêt n'étant pas satisfaites puisque aucun sous ensemble de capteurs ne possède un couple de degrés de redondance (1, 3) ou un temps moyen *MTTNO* plus grand ou égal à $3 \cdot 10^5 H$, une itération supplémentaire est donc nécessaire.

Etape Marquage (N_1)→(N_2)

Les nœuds 44, 47, 48, 51, 52, 54, 56 et 57 sont en gris, il suit de la *propriété 1* que leurs prédécesseurs du niveau N_2 sont en gris. La *propriété 2* permet de marquer les autres nœuds en blanc (cf. figure 5.2-c).

Les degrés de redondance de nœuds du niveau marqué sont donnés par le tableau suivant.

S	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
d_f	1	-1	-1	2	1	1	2	-1	2	2	1	0	2	-1	2	2	1	2	2	2
d_F	0	-1	-1	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	1	0	0

Tableau 5.5. *Degrés de redondance des nœuds du niveau N_2*

Les probabilités de bon fonctionnement sont :

S	R	S	R	S	R	S	R
23	R ₁	28	R ₃	33	R ₁	38	R ₂
24	0	29	R ₄	34	R ₃	39	R ₃
25	0	30	0	35	R ₂	40	R ₄
26	R ₂	31	R ₂	36	0	41	R ₂
27	R ₁	32	R ₂	37	R ₄	42	R ₂

Tableau 5.6. Probabilités de bon fonctionnement des nœuds marqués

où, $R_1=2\exp(-2\lambda t) - \exp(-3\lambda t)$, $R_2= \exp(-\lambda t)$, $R_3= \exp(-2\lambda t)$
et $R_4=\exp(-\lambda t)+ \exp(-2\lambda t)- \exp(-3\lambda t)$.

et les *MTTNO* sont donnés par:

S	R	S	R	S	R	S	R
23	$0.83 \cdot 10^5 \text{ H}$	28	$1.25 \cdot 10^5 \text{ H}$	33	$0.83 \cdot 10^5 \text{ H}$	38	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$
24	0	29	$2.92 \cdot 10^5 \text{ H}$	34	$1.25 \cdot 10^5 \text{ H}$	39	$1.25 \cdot 10^5 \text{ H}$
25	0	30	0	35	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	40	$2.92 \cdot 10^5 \text{ H}$
26	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	31	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	36	0	41	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$
27	$0.83 \cdot 10^5 \text{ H}$	32	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	37	$2.92 \cdot 10^5 \text{ H}$	42	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$

Tableau 5.7. *MTTNO* des nœuds marqués

Etape Marquage $N_2 \rightarrow N_3$

La propriété 1 permet de marquer en gris tous les nœuds du niveau trois sauf le nœud 11 qui est en blanc (cf. figure 5.2-d).

Les degrés de redondance fort et faible sont donnés par le tableau suivant :

S	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$d_f(S, e)$	2	2	3	-1	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3
$d_F(S, e)$	0	0	1	-1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1

Tableau 5.8. Degrés de redondance du niveau N_3

Les sous ensembles $\{a, b, c, f\}$, $\{a, c, d, f\}$, $\{a, b, e, f\}$, $\{b, c, d, f\}$, $\{b, c, e, f\}$ et $\{c, d, e, f\}$ sont des *ER* dont les degrés de redondance forts et faible sont respectivement égaux à 1 et 3.

Le critère structurel étant satisfait, il nous reste à trouver parmi ces 5 sous ensembles quels sont ceux qui vérifient le critère fiabiliste.

Les probabilités de bon fonctionnement sont données par :

S	R	S	R	S	R
8	m_1	13	M_5	18	M_2
9	m_2	14	M_2	19	M_3
10	m_3	15	M_3	20	M_6
11	0	16	m_6	21	M_4
12	m_4	17	m_5	22	m_6

Tableau 5.9. Probabilités de bon fonctionnement des nœuds marqués

où,

$$m_1 = 3\exp(-2\lambda t) - 3\exp(-3\lambda t) + \exp(-4\lambda t),$$

$$m_2 = 2\exp(-2\lambda t) - \exp(-3\lambda t),$$

$$m_3 = \exp(-\lambda t) + 2\exp(-2\lambda t) - 3\exp(-3\lambda t) + \exp(-4\lambda t),$$

$$m_4 = \exp(-\lambda t) + \exp(-2\lambda t) - 2\exp(-3\lambda t) + \exp(-4\lambda t),$$

$$m_5 = \exp(-\lambda t) \text{ and } m_6 = \exp(-\lambda t) + \exp(-2\lambda t) - \exp(-3\lambda t).$$

et les *MTTNO* sont :

S	R	S	R	S	R
8	$1.87 \cdot 10^5 \text{ H}$	13	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	18	$1.66 \cdot 10^5 \text{ H}$
9	$1.66 \cdot 10^5 \text{ H}$	14	$1.66 \cdot 10^5 \text{ H}$	19	$3.13 \cdot 10^5 \text{ H}$
10	$3.13 \cdot 10^5 \text{ H}$	15	$3.13 \cdot 10^5 \text{ H}$	20	$2.92 \cdot 10^5 \text{ H}$
11	0	16	$2.92 \cdot 10^5 \text{ H}$	21	$2.71 \cdot 10^5 \text{ H}$
12	$2.71 \cdot 10^5 \text{ H}$	17	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	22	$2.92 \cdot 10^5 \text{ H}$

Tableau 5.10. *MTTNO* des derniers nœuds marqués (N_3)

De ce tableau, nous déduisons que seuls les sous ensembles redondants $\{a, b, c, f\}$, $\{a, c, d, f\}$ et $\{b, c, d, f\}$ ont des temps moyens *MTTNO* plus grands que $3 \cdot 10^5 H$. Donc ces 3 sous ensembles satisfont les critères fixés au préalable.

L'algorithme que nous avons proposé nous a permis de trouver 3 sous ensembles de capteurs redondants. Il serait intéressant de trouver la meilleure configuration de capteurs parmi ces trois sous ensembles. Ainsi pour atteindre une telle configuration, d'autres critères supplémentaires peuvent être envisagés. Parmi ceux ci nous pouvons citer le critère de coût du système d'instrumentation ou un critère de qualité d'estimation qui donneront la configuration optimale.

Les étapes de marquage de l'automate qui génère des sous ensembles ER sont données par la figure 5.2.

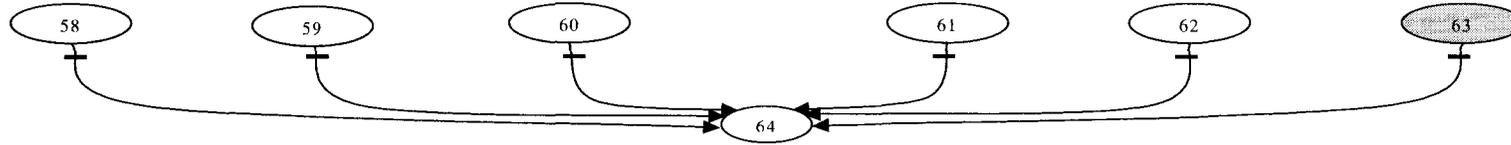


Figure 5.2-a: Marquage du premier niveau N_0

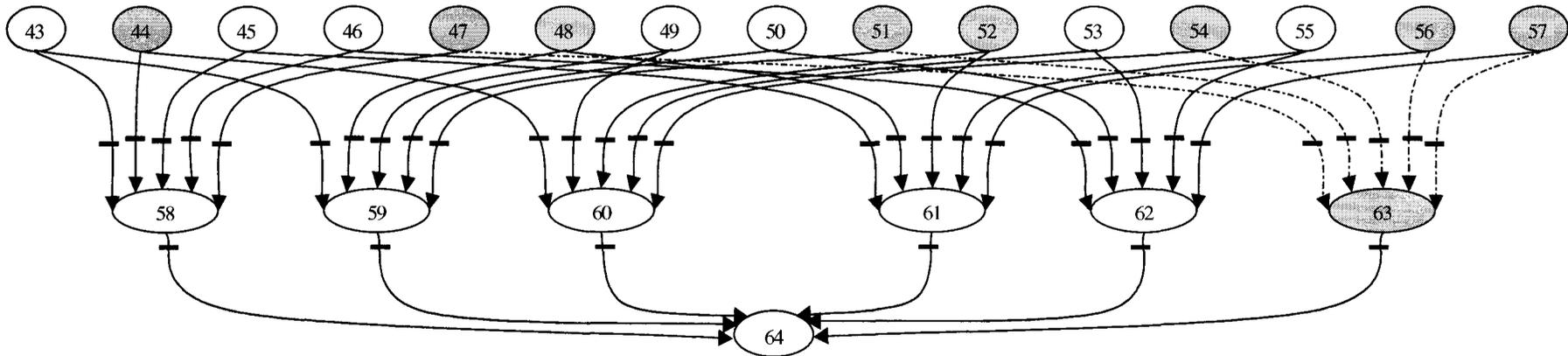


Figure 5.2-b: Marquage du deuxième niveau N_1

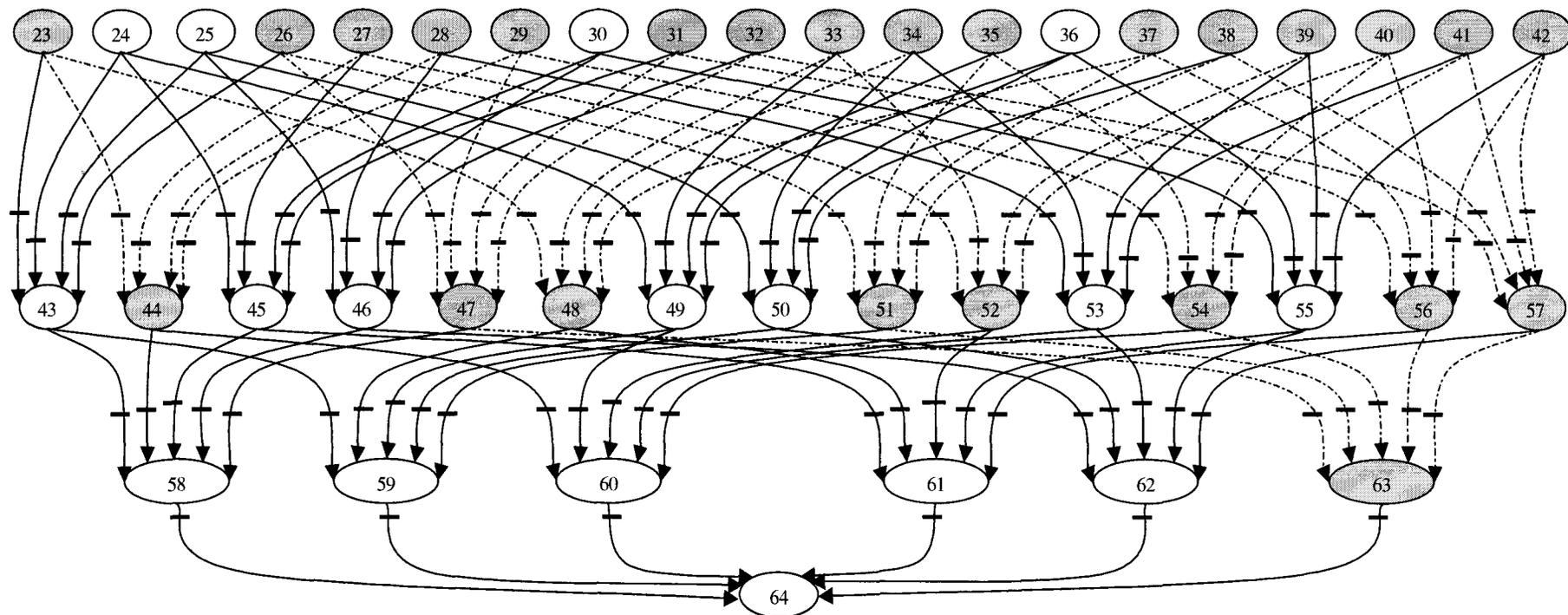


Figure 5.2-c: *Marquage du troisième niveau N_2*

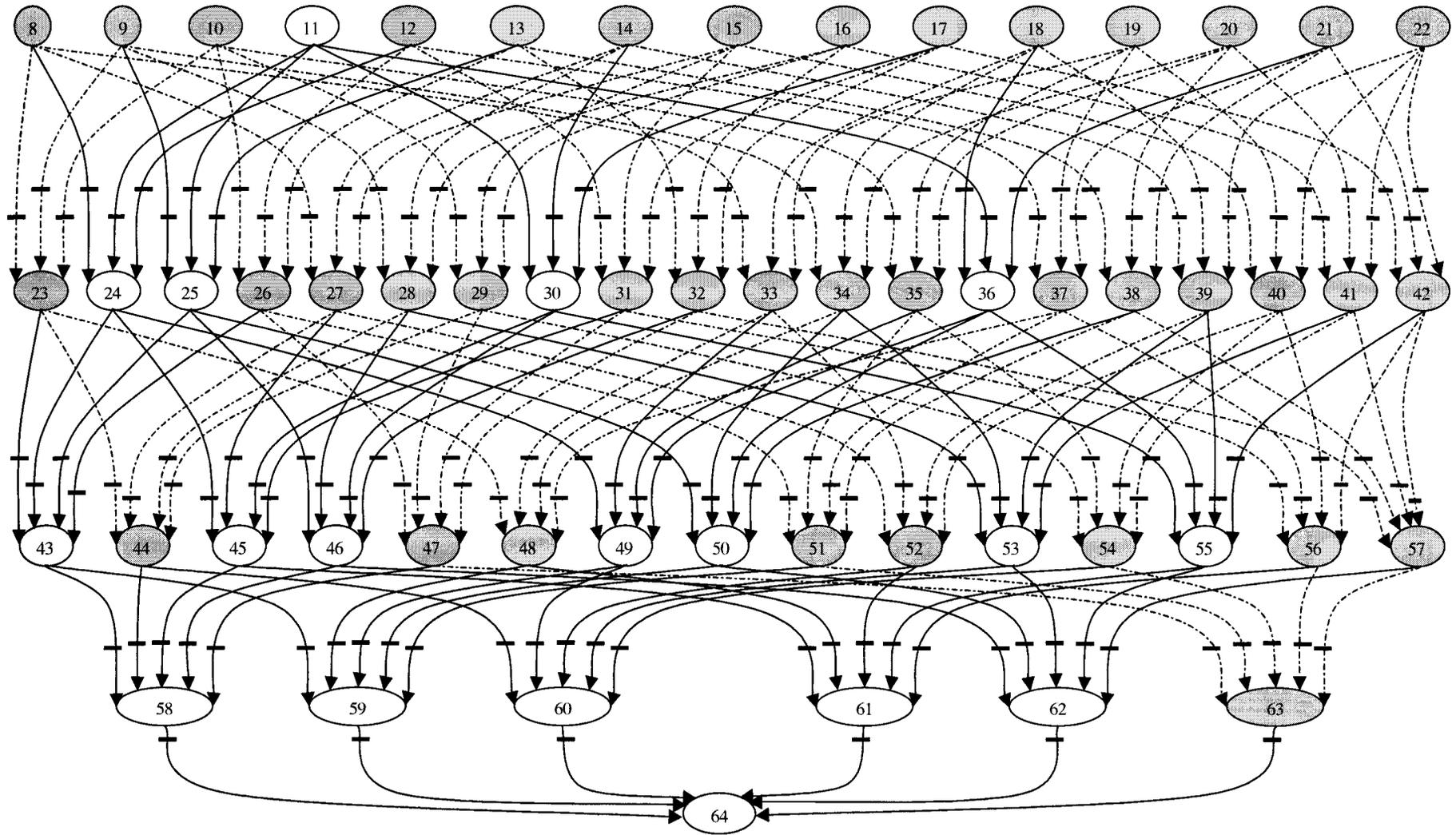


Figure 5.2-d: Marquage du quatrième niveau N_3

5.2 Sélection d'actionneurs d'un processus hydraulique

La figure 5.3. représente une installation composée de 5 cuves identiques placées en cascade [HOBL 00-a]. Les cuves ont une section S égale à 1 m^2 .

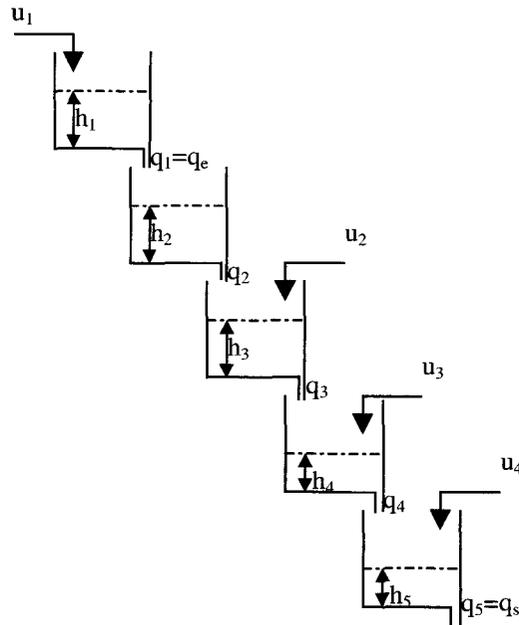


Figure 5.3. *Processus hydraulique à cinq cuves*

En linéarisant le fonctionnement autour du point nominal, le débit de sortie de chaque cuve est proportionnel à la hauteur. Le coefficient de proportionnalité k est égal à $0.25 \text{ m}^2/\text{s}$. En prenant comme vecteur d'état $x = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5]^T$ et de commande $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$, on obtient l'équation d'état suivante :

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{k}{S} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k}{S} & -\frac{k}{S} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k}{S} & -\frac{k}{S} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k}{S} & -\frac{k}{S} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k}{S} & -\frac{k}{S} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{S} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{S} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{S} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{S} \end{bmatrix} u \quad (5.3)$$

La discrétisation du processus continu avec une période d'échantillonnage de 10 ms a donné les matrices d'état et de commande suivantes :

$$A = \begin{pmatrix} 0.9975 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0025 & 0.9975 & 0 & 0 & 0 \\ 3.1172 \cdot 10^{-6} & 0.0025 & 0.9975 & 0 & 0 \\ 2.5977 \cdot 10^{-9} & 3.1172 \cdot 10^{-6} & 0.0025 & 0.9975 & 0 \\ 1.6235 \cdot 10^{-12} & 2.5977 \cdot 10^{-9} & 3.1172 \cdot 10^{-6} & 0.0025 & 0.9975 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 1.2479 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 & 0 \\ 1.0397 \cdot 10^{-8} & 0.01 & 0 & 0 \\ 6.4974 \cdot 10^{-12} & 1.2479 \cdot 10^{-5} & 0.01 & 0 \\ 3.2484 \cdot 10^{-15} & 1.0397 \cdot 10^{-8} & 1.2479 \cdot 10^{-5} & 0.01 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Nous supposons que la matrice de sélection K des variables d'état à commander est donnée par :

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

Comme dans le cas des capteurs, nous allons nous intéresser à une partie des variables d'état à commander soit dans ce cas $z = [x_3 \ x_4 \ x_5] = Kx$. Concrètement, le problème de commande revient à maintenir les trois derniers niveaux H_3, H_4 et H_5 à 0.5 m. Les actionneurs u_1, u_2, u_3 et u_4 sont notés respectivement a, b, c et d .

Nous allons supposer que la probabilité de bon fonctionnement de chaque actionneur k est modélisée par la distribution de Poisson (5.2). De même, les coefficients de fiabilité λ_k d'actionneurs sont définis par $\lambda_k = \lambda = 0.4 \times 10^{-5} H^{-1}$ (H^{-1} représente l'unité *heure*⁻¹).

Le tableau suivant montre la correspondance entre les situations (S) des pertes d'actionneurs et les sous ensembles d'actionneurs J :

S	J	S	J	S	J	S	J
1	{a, b, c, d}	5	{b, c, d}	9	{b, c}	13	{b}
2	{a, b, c}	6	{a, b}	10	{b, d}	14	{c}
3	{a, b, d}	7	{a, c}	11	{c, d}	15	{d}
4	{a, c, d}	8	{a, d}	12	{a}	16	{}

Tableau 5.11. *Codage des situations*

Le problème de sélection d'actionneurs consiste à sélectionner un sous ensemble d'actionneurs lorsqu'on on atteint un niveau où les deux conditions suivantes sont réalisées simultanément :

- les degrés de redondance fort et faible sont respectivement égaux à 1 et 2.
- le temps moyen *MTTNC* (Mean Time To Non Controllability) avant l'apparition des premières défaillances est au moins égal à $3.10^5 H$.

L'exécution de l'algorithme proposé donne les résultats suivants :

Etape INI, (N₀)

Les indices de commandabilité individuels des actionneurs *a*, *b*, *c* et *d* sont respectivement 5, 3, 2 et 1. Les conditions de commandabilité de *c* sont satisfaites pour le nœud 12 et 13 du premier niveau. Le marquage consiste à mettre les nœuds 12 et 13 en gris et, 14 et 15 en blanc.

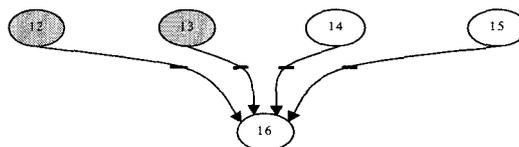


Figure 5.4-a: *Marquage du premier niveau N₀*

Les degrés de redondance fort et faible sont égaux à 0 pour les nœuds 12 et 13 et -1 pour les nœuds 14 et 15.

Les probabilités de bon fonctionnement « **R** » sont données par le tableau suivant :

S	12	13	14	15
R	$\exp(-\hat{\lambda}t)$	$\exp(-\hat{\lambda}t)$	0	0

Tableau 5.12. Probabilités de bon fonctionnement des nœuds marqués

et les *MTTNC* sont donnés par :

S	12	13	14	15
MTTNC	$2.5 \cdot 10^5$ H	$2.5 \cdot 10^5$ H	0	0

Tableau 5.13. *MTTNC* des nœuds du niveau N_0

Etape Marquage $N_0 \rightarrow N_1$

Les nœuds 12 et 13 étant en gris, la propriété 1 permet de marquer en gris les nœuds 6, 7, 8, 9 et 10. Les nœuds 14 et 15 étant en blanc, la propriété 2 permet de marquer le nœud 11 en blanc. La figure 5.4-b représente le marquage des nœuds du niveau N_1 :

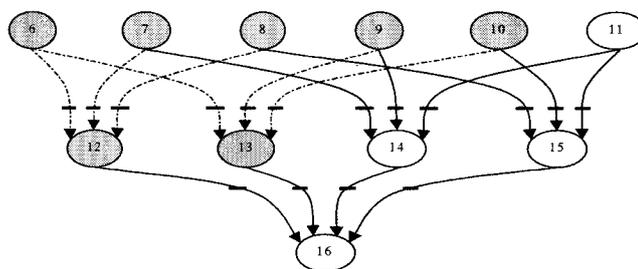


Figure 5.4-b: Marquage du deuxième niveau N_1

En appliquant la *propriétés 3*, les degrés de redondance fort et faible sont respectivement égaux à zéro et 1 pour les nœuds 6, 7, 8, 9 et 10 et -1 pour le nœud 11.

Les probabilités de bon fonctionnement sont données par le tableau suivant :

S	6	7	8	9	10	11
R	$2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	0

Tableau 5.14. Probabilités de bon fonctionnement des nœuds marqués

et les *MTTNC* sont donnés par :

S	6	7	8	9	10	11
MTTNC	$3.75 \cdot 10^5$ H	$2.5 \cdot 10^5$ H	0			

Tableau 5.15. *MTTNC* des nœuds marqués

Etape Marquage $N_1 \rightarrow N_2$

Les nœuds 6, 7, 8, 9 et 10 sont en gris, il suit de la *propriété 1* que leurs prédécesseurs du niveau N_2 sont en gris.

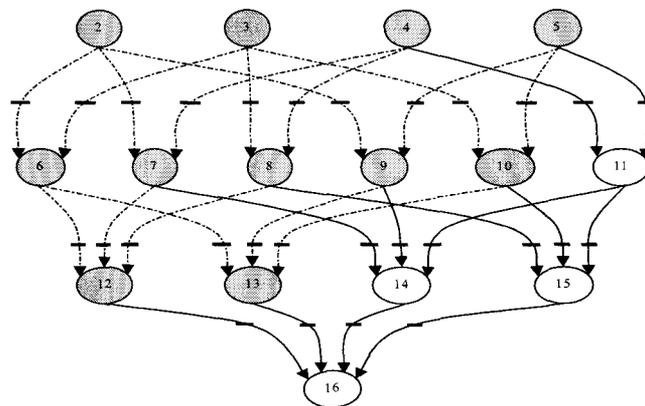


Figure 5.4-c : Marquage du deuxième niveau N_2

Les degrés de redondance de nœuds du niveau N_2 sont donnés par le tableau suivant.

S	2	3	4	5
$d_f(S, e)$	1	1	0	0
$d_F(S, e)$	2	2	2	2

Tableau 5.16. Degrés de redondance des nœuds du niveau N_2

Les sous ensembles $\{a, b, c\}$ et $\{a, b, d\}$ sont des sous ensembles d'actionneurs redondants qui satisfont le critère structurel fixé c'est à dire les degrés de redondance fort et faible respectivement égaux à 1 et 2. Il nous reste à chercher, quel est le sous ensemble d'actionneurs qui satisfait le critère fiabiliste ?

Les probabilités de bon fonctionnement sont :

S	2	3	4	5
R	$2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t)$	$2\exp(-\lambda t) - \exp(-2\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$	$\exp(-\lambda t)$

Tableau 5.17. Probabilités de bon fonctionnement des nœuds marqués

et les *MTTNC* sont donnés par:

S	2	3	4	5
MTTNC	$3.75 \cdot 10^5 \text{ H}$	$3.75 \cdot 10^5 \text{ H}$	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$	$2.5 \cdot 10^5 \text{ H}$

Tableau 5.18. *MTTNC* des nœuds marqués

On remarque que les sous ensembles redondants $\{a, b, c\}$ et $\{a, b, d\}$ ont des temps moyens *MTTNC* plus grands que $3.75 \cdot 10^5 \text{ H}$. Donc ces 2 sous ensembles satisfont les critères fixés au préalable.

L'algorithme que nous avons proposé nous a permis de trouver 2 sous ensembles d'actionneurs redondants. Il serait intéressant de trouver la meilleure configuration d'actionneurs parmi ces deux sous ensembles. Une telle configuration peut être trouvée en

appliquant des critères supplémentaires tels que le coût des actionneurs, la minimisation d'énergie de commande.

5.3 Conclusion

Nous avons appliqué notre algorithme d'une part au placement de capteurs d'un système thermique et d'autre part à la sélection d'actionneurs d'un processus hydraulique.

Sur l'exemple du système thermique, nous remarquons que parmi les 63 sous ensembles de capteurs, nous avons abouti à 3 *ER*. Pour pouvoir trouver la configuration optimale, il est nécessaire d'ajouter un troisième critère comme le coût par exemple.

Les exemples choisis sont des exemples qui sont issus de la littérature, il nous semble intéressant d'appliquer notre algorithme à un système réel tel que le générateur de vapeur du Laboratoire en linéarisant le modèle non linéaire au préalable autour d'un point de fonctionnement.

Conclusion

Nous avons établi au chapitre 3 des propriétés d'observabilité (commandabilité) en présence de pertes de capteurs (actionneurs) en utilisant les indices d'observabilité individuels de capteurs. Ces indices représentent les dimensions des espaces couverts par les capteurs (actionneurs). En se fondant sur ces indices, nous avons défini les notions des sous ensembles de capteurs (actionneurs) minimaux et redondants. Pour évaluer le degré de liberté de recouvrement d'un sous ensemble de capteurs (actionneurs) minimal ou redondant, nous avons utilisé les indices de pseudo-observabilité (pseudo-commandabilité).

Le quatrième chapitre a été consacré à la conception d'un schéma d'instrumentation (d'action) en vue de la tolérance aux fautes en cas de pertes de capteurs (d'actionneurs). L'objectif est de garder les propriétés d'observabilité (de commandabilité) d'une fonctionnelle linéaire de l'état du système. Pour analyser la tolérance aux fautes, nous avons utilisé un graphe multi-niveau contenant toutes les chemins d'accommodation/reconfiguration pour lesquels une fonctionnelle linéaire reste observable (commandable). Pour évaluer la tolérance aux fautes d'un sous ensemble de capteurs (actionneurs), nous avons défini deux critères : structurel (degré de redondance fort et faible) et probabiliste (fiabilité, maintenance). Nous avons proposé ensuite des algorithmes pour le placement de capteurs et la sélection d'actionneurs s'appuyant sur les critères cités précédemment. L'objectif est de trouver les meilleures configurations de capteurs permettant de tolérer des pertes de capteurs (actionneurs).

Dans le cinquième chapitre, nous avons appliqué les algorithmes proposés au placement de capteurs d'un système thermique et à la sélection d'actionneurs d'un système hydraulique.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un nouveau thème au sein du laboratoire LAIL à savoir la tolérance aux fautes. Il concerne l'analyse des propriétés structurelles d'observabilité et de commandabilité d'une fonctionnelle linéaire de l'état en présence de défaillances de capteurs et d'actionneurs.

Dans la première partie de cette thèse, nous avons présenté les concepts généraux de la surveillance qui représentent une étape importante pour assurer le bon fonctionnement des procédures de tolérance aux fautes. Plus ces procédures sont efficaces, plus le degré d'intelligence des techniques de commande et d'estimation est élevé. Pour cette raison, dans un deuxième temps, nous avons présenté quelques méthodes de commande et d'estimation en vue de la tolérance aux fautes et de la supervision. Cette description nous a permis d'élaborer une stratégie distinguant l'**accommodation** de la **reconfiguration**. En effet, une fois le défaut détecté, localisé, une décision doit être prise (accommodation ou reconfiguration) selon la sévérité de celui-ci. L'accommodation est fondée sur le réajustement de la loi de commande (compensation, correction, annulations des effets de défauts) tandis que la reconfiguration consiste à poursuivre ou changer la mission respectivement en reconfigurant le système ou les objectifs.

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons considéré que l'information fournie par les algorithmes de détection et localisation des défaillances est binaire : le capteur (actionneur) est disponible ou non. Dans ce cas, les possibilités d'accommodation des défaillances (possibilité de poursuivre l'estimation, possibilité d'assurer encore le pilotage) se confondent avec la conservation ou non des propriétés structurelles d'observabilité et de commandabilité.

Dans un premier temps, nous avons contribué à l'analyse de la tolérance aux fautes des systèmes d'instrumentation (action) en terme d'observabilité (commandabilité). Nous avons établi des propriétés d'observabilité (commandabilité) en présence de pertes de capteurs

(actionneurs) en utilisant les indices d'observabilité individuels de capteurs. Ces indices, représentant les dimensions des espaces couverts par les capteurs (actionneurs), nous ont permis de construire des sous ensembles de capteurs (actionneurs) minimaux et redondants. De même, les indices de pseudo-observabilité ont été utilisés pour évaluer le nombre de possibilités de recouvrement d'un sous ensemble de capteurs (actionneurs) minimal ou redondant. Des propriétés ont été établies sur la minimalité et la redondance de ces sous ensembles qui constituent des éléments de base pour notre analyse de la tolérance aux fautes. En effet, ces sous ensembles sont organisés selon un graphe orienté (ou un automate), contenant tous les chemins d'accommodation/reconfiguration pour lesquels une fonctionnelle linéaire reste observable (commandable). Les défaillances représentent les transitions des niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs du graphe. Les défaillances simultanées, non considérées dans notre étude, peuvent être modélisées simplement par des transitions franchissant plusieurs niveaux, ce qui nous amène à ajouter des arcs descendants dans le graphe. Le chemin inverse correspond à la remise en service de capteurs ou d'actionneurs précédemment défaillants, c'est-à-dire à des opérations de maintenance curative. La maintenance préventive, quant à elle, réinitialise les valeurs des fonctions de fiabilité. Des propriétés sur ce graphe ont été établies.

Pour évaluer la tolérance aux fautes d'un sous ensemble de capteurs (actionneurs), représenté par un nœud sur le graphe, nous avons défini deux critères, structurel (degré de redondance fort et faible) et probabiliste (fiabilité, maintenance). Le degré de redondance faible représente le nombre maximal de capteurs qu'on peut perdre tout en continuant à estimer une fonctionnelle linéaire tandis que le degré de redondance fort est le nombre maximal des capteurs qu'on peut perdre tout en continuant à estimer une fonctionnelle linéaire, quels que soient ces capteurs perdus.

Dans un deuxième temps, nous avons proposé des algorithmes pour le placement de capteurs et la sélection d'actionneurs s'appuyant sur les deux types de critères cités précédemment. L'objectif est de trouver les meilleures configurations de capteurs permettant de tolérer des pertes de capteurs (actionneurs). Pour y parvenir nous avons utilisé une décision multicritères fondée simultanément sur les degrés de redondance fort et faible et le critère probabiliste.

Ces algorithmes ont été appliqués au placement de capteurs d'un système thermique et la sélection d'actionneurs d'un système hydraulique.

Cette étude donne plusieurs perspectives de développement.

Concernant l'analyse de la tolérance aux fautes, il nous semble intéressant de développer les points suivants :

- calcul fiabiliste des chemins du graphe,
- minimisation des variances des erreurs d'estimation (capteurs) et minimisation d'énergie (actionneurs),
- analyse de l'observabilité (commandabilité) dans le cas des systèmes non linéaires (locale et globale)

Concernant le cas du placement de capteurs ou sélection d'actionneurs, les aspects suivants peuvent être développés :

- amélioration de l'algorithme proposé (rapidité, recherche non systématique des sous ensembles redondants, ...),
- choix de la configuration optimale en utilisant le critère de coût,
- application des algorithmes développés aux systèmes non linéaires tels que le générateur de vapeur du laboratoire (EUDIL) et une plate-forme hydraulique (HEI).

Annexe A [WU 00]

a) Modes du deuxième ordre des systèmes linéaires dynamiques stables

On considère le modèle d'un système linéaire déterministe discret suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

où $x \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathcal{R}^m$ le vecteur d'entrée, $y \in \mathcal{R}^p$ le vecteur de sortie. et les matrices A , B et C sont de dimensions appropriées.

Une mesure combinée d'observabilité et de commandabilité a été établie par Moore *et al.* [MOOR 81] pour le modèle (1). Un ensemble de n modes du deuxième ordre (σ_i , $i=1, \dots, n$) avec $\sigma_i \geq \sigma_{i+1}$ peut être facilement calculé en deux étapes.

- trouver les matrices du gramien de commandabilité W_c et d'observabilité W_o données par les équations :

$$\begin{cases} AW_c + W_c A^T + BB^T = 0 \\ A^T W_o + W_o A + C^T C = 0 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

- calculer les valeurs propres $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$ de $W_c W_o$, où σ_i sont les modes du deuxième ordre du modèle.

Les σ_i sont appelés aussi les valeurs singulières de l'opérateur de Hankel associé à ce modèle [FRAN 1987]. Ces modes sont strictement positifs. Dans le cas contraire, il existe un modèle d'ordre plus réduit tels que les modes sont strictement positifs et qui fournit les mêmes caractéristiques *entrées-sorties*.

b) Reconfigurabilité

Soit ϕ un vecteur des paramètres de dimension N reflétant l'occurrence d'une défaillance sur le système. Ce vecteur se trouve dans un espace euclidien représenté par H .

Supposons que le modèle en défaut est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\phi)x(t) + B(\phi)u(t) \\ y(t) = C(\phi)x(t) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

où $\phi=0$ signifie absence de défaillance.

Soit S un espace inclus dans H , la reconfigurabilité ρ_S sur S est définie par :

$$\rho_S \equiv \min_{\phi \in S \subseteq H} \sigma_{\min}(\phi). \quad (\text{A.4})$$

On peut aussi définir la condition de reconfigurabilité sur S par :

$$\kappa_S \equiv \max_{\phi \in S \subseteq H} \frac{\sigma_1(\phi)}{\sigma_2(\phi)} \quad (\text{A.5})$$

Pour une application particulière, on peut spécifier une valeur minimale acceptable σ_{\min} pour lequel un espace S correspondant (contenant l'origine $\phi=0$) peut être déterminé. Cette propriété de reconfigurabilité peut être utilisée dans le cas de placement d'actionneurs (ou de capteurs).

Annexe B

Degré de redondance par rapport à une variable.

Turbatte (1994) et Maquin (1994b) ont défini deux types de degrés de redondance d'une variable : le degré de redondance principal et le degré de redondance faible.

a) Degré de redondance principal

Redondance de degré 0 :

- Une variable mesurée ou non mesurée est redondante principalement de degré 0 s'il existe au moins une configuration telle que la panne d'un seul capteur du processus rende cette variable non observable.

Redondance principale de degré k :

- Une variable mesurée redondante principalement de degré k ($k \geq 1$) est une variable qui reste observable lors de la défaillance simultanée du capteur mesurant cette variable et de $k-1$ capteurs quelconques du processus.
- Une variable non mesurée redondante principalement de degré k ($k \geq 1$) est une variable qui reste observable lors de la défaillance simultanée de k capteurs quelconques du processus.

b) Degré de redondance faible

- Une variable mesurée ou non mesurée redondante faiblement de degré k ($k \geq 1$) est une variable qui reste observable lors de la défaillance simultanée d'un groupe de k capteurs du processus. C'est à dire qu'elle reste observable lors de la défaillance de certains capteurs du processus.

Annexe C [LUON 97]

a) Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité (E, composant, sous-système, système ou équipement) à accomplir une fonction requise, dont l'accomplissement est nécessaire pour la fourniture d'un service donné, dans des conditions données, pendant une durée donnée. Mathématiquement, on définit la fiabilité par la probabilité que l'entité accomplisse une certaine tâche ou fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée :

$$R(t) = P(\text{E non défaillante sur } [0, t]) \quad (\text{C.1})$$

b) La disponibilité

C'est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné, en supposant que la fourniture extérieure soit assurée. Cette quantité est mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné :

$$A(t) = P(\text{E non défaillante à l'instant } t) \quad (\text{C.2})$$

c) La maintenabilité

Dans des conditions données (des défaillances), c'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie, avec des procédures et des moyens prescrits. Mathématiquement, c'est la probabilité que la maintenance d'une entité E accomplisse dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t, sachant que l'entité est défaillante à l'instant $t=0$:

$$M(t) = P(\text{E est réparée sur } [0, t]) \quad (\text{C.3})$$

d) La sécurité

C'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou dramatiques. L'aptitude contraire est dénommée l'insécurité.

L'évaluation quantitative de la sûreté de fonctionnement est basée sur plusieurs paramètres qui sont :

MTTF (Mean Time To Failure) : durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance

MTTR (Mean Time To Repair) : durée moyenne de réparation

MUT (Mean Up Time) : durée moyenne de fonctionnement après réparation

MDT (Mean Down Time) : durée moyenne d'indisponibilité. Cette phase est très sensible (détection de la panne, réparation de la panne et remise en service)

MTBF (Mean Time Between Failure) : durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

Ces paramètres peuvent être organisés schématiquement de la façon suivante :

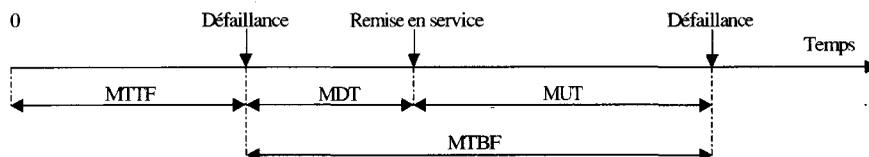


Figure C. Représentation de *MTTF*, *MUT*, *MDT*, *MTBF*

Quantitativement, le MTTF est défini en fonction de la fiabilité par :

$$MTTF = \int_0^{+\infty} R(t)dt, \text{ où } R(t) \text{ est la fiabilité.} \quad (C.4)$$

Tandis que, le MTTR est donné par :

$$MTTR = \int_0^{+\infty} (1 - M(t))dt, \text{ où } M(t) \text{ est la maintenabilité.} \quad (C.5)$$

Annexe D

Les termes, défaut, défaillance et panne sont définis par la Commission Electronique Internationale (74) et normés selon AFNOR XNF 06-501 (Afnor 77).

Le défaut, est considéré comme tout écart entre la caractéristique d'une entité et la caractéristique voulue. Généralement, c'est la non-conformité dans des objectifs souhaités.

La défaillance, est définie comme la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

La panne, est définie comme l'inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Une panne vient toujours à la suite d'une défaillance.

Les défaillances, défauts et pannes peuvent être classées selon leurs dates d'apparition dans la vie du système. Expérimentalement, la représentation fréquente d'un taux de défaillance d'une entité prend la forme d'une courbe dite "en baignoire" schématisant la vie normale d'une entité.

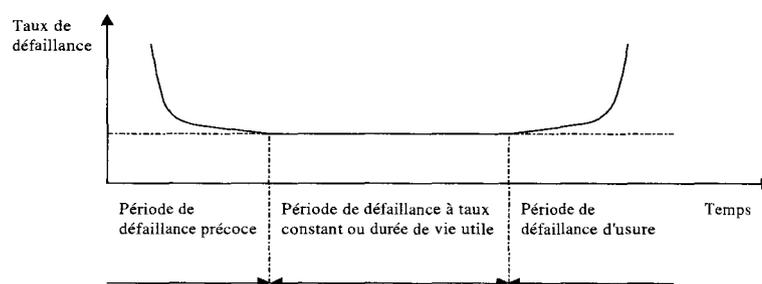


Figure D. Evolution du taux de défaillance d'une entité

La période des défaillances précoces représente la jeunesse de l'entité, tandis que la vieillesse se manifeste par des défaillances d'usure qui sont probablement prévisibles. La vie utile de l'entité correspond à l'intervalle de temps où le taux de défaillances maintient un

certain niveau quasiment constant. Cet intervalle de temps définie joue un rôle important pour évaluer la fiabilité d'un système.

Théoriquement, on définit le taux de défaillances comme la proportion ramenée à l'unité de temps, des entités qui, avant survécu à un instant t , ne sont plus en vie à l'instant $t+\Delta t$. Autrement dit, c'est la limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'une défaillance d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t+\Delta t]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro en supposant l'entité n'a pas eu de défaillance sur $[0, t]$.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(\text{entité est défaillante entre } t \text{ et } t+\Delta t, \text{ sachant qu'elle n'a pas eu de}$$

défaillance sur $[0, t]$).

Le taux de réparation est la limite, si elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour que l'instant T d'achèvement de la réparation d'une entité soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t+\Delta t]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque Δt tend vers zéro en supposant que l'entité a été en panne sur $[0, t]$.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(\text{entité est réparée entre } t \text{ et } t+\Delta t, \text{ sachant qu'elle a été en panne}$$

$[0, t]$).

Pour des taux de défaillance et de réparation constants, la fiabilité et la maintenabilité sont données respectivement par $R(t) = e^{-\lambda t}$ et $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$.

Références Bibliographiques

- [AAM 83] Aam S., Holten L., Gjerde O., Design of the measurement system for state estimation in the Norwegian high-voltage transmission network, *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, vol. 102, pp. 3769-3777, 1983.
- [AHME 91] Ahmed-Zaid F., Ioannou P., Gousman K., Rooney R., Accommodation of failures in the F-16 aircraft using adaptive control, *IEEE Con. Sys. Mag.*, vol. 11, no. 1, pp. 73-78, 1987.
- [AITO 90] Aitouche A., Détection et localisation de défaillances de capteurs. Thèse de Doctorat de L'Université de Nancy I, 1990.
- [AITO 00-a] Aitouche A., **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Tolérance aux fautes de capteurs en vue de la maintenance, *IMPAC 2000*, Octobre 2000, Boumerdès, Algérie, 2000.
- [AITO 00-b] Aitouche A., **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Optimisation du placement de capteurs d'une colonne à distiller, *Symposium International sur les Hydrocarbures et la Chimie*, Mai 2000, Boumerdès, Algérie, 2000.
- [AITO 01] Aitouche A., **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Tolérance aux Fautes de Capteurs. *Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation (C'2I 2001)*, *Systèmes et Micro-Systèmes pour la caractérisation*, Ed. Hermes, Vol.2, pp 469-476, 2001.
- [ALI 93] Ali Y., Narasimhan S., Sensor network design for maximizing reliability of linear processes, *AIChE Journal.*, vol. 39, pp. 820-828, 1993.
- [ALI 95] Ali Y., Narasimhan S., Sensor network design for maximizing reliability of linear processes, *AIChE Journal.*, vol. 41, pp. 2237-2249, 1995.
- [ALI 96] Ali Y., Narasimhan S., Sensor network design for maximizing reliability of bilinear processes, *AIChE Journal.*, vol. 42, pp. 2563-2575, 1996.
- [AMDE 90] Anderson B. D. O., Moore J. B., Optimal control : Linear quadratic methods, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.
- [ANTS 98] Antsaklis P. J., Nerode A., Special issue on hybrid control systems, *IEEE-TAC*, vol. 43, pp. 453-587, 1998.
- [ARBE 79] Arbel A., Gupta N. K., Optimal actuator and sensor locations in oscillatory systems, *13th Asilomar Conference Pacific Groove, CA*, 1979.
- [ARBE 82] Arbel A., Sensor placement in optimal filtering and smoothing problems, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-27, no. 1, pp. 94-98, 1982.
- [ARIA 75] Ariatti F., Marzio L., Ricci P., Designing state estimation in view of reliability, *Proceedings of PSCC Conference*, Cambridge, vol. 2, pp. 3-8, 1975.
- [BAGA 95] Bagajewicz M. J., Optimal sensor location in process plants, *5th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, ESCAPE'95*, BLED, Slovenia, June 11-14, 1995.
- [BANA 91] Banavar R. N., Speyer J. L., A linear-quadratic game approach to estimation and smoothing, *Proc. of the American Control Conference*, Boston, MA, pp. 2818-2822, 1991.
- [BARM 88] Barmish B. R., New tools for robustness analysis, *Proc. 27th CDC*, Austin, pp. 1-6, 1988.

- [BASA 91] Basar T., Optimal performance level for minimax filters, predictors and smoothers, *Systems & Control Letts*, vol. 16, pp. 309-317, 1991.
- [BASS 87] Basseville M., Benveniste A., Moustakides V., Rougée A., Detection and diagnosis of changes in the eigenstructure of nonstationary multivariable systems, *Automatica*, vol. 23, pp. 479-789, 1987.
- [BASS 93] Basseville M., Nikiforov I. V., Detection of abrupt changes : theory and applications, Prentice Hall, Information and System Sciences Serie, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [BEAR 71] Beard R. V., Failure accommodation in linear systems through self-reorganisation, Man Vehicule Lab., MIT, Cambridge, report n° MVT-71-1, 1971.
- [BENV 87] Benveniste A., Basseville M., Moustakides G., The asymptotic local approach to change detection and modal validation, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-32, pp. 583-592, 1987.
- [BERG 83] Berge C., Graphes, Gauthier-Villars, 400 pages, 1983.
- [BERN 89] Bernard J. A., Use of a rule-based system for process control, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 3-13, 1989.
- [BERN 89] Bernstein D. S., Haddad W. M., Steady-state Kalman filtering with an H_∞ error bound, *Systems & Control Letts*, vol. 12, pp. 9-16, 1989.
- [BERN 91] Bernstein D. S., Haddad W. M., Mixed H_2/H_∞ regulation and estimation : The discrete-time case, *Systems & Control Letts*, vol. 16, pp. 61-71, 1991.
- [BHAT 78] Bhattacharyya S. P., Observer design for linear systems with unknown inputs, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-23, pp. 483-484, 1978.
- [BILL 87] Billoir T., Elaboration de diagnostic technique par génération et propagation de suspicions et accusations, 7^{ème} Journées Internationales : Les systèmes experts et leurs applications, Avignon, 1987.
- [BOLZ 96] Bolzern P., Colaneri P., De Nicolao G., Optimal robust filtering with time-varying parameter uncertainty, *Int. J. Control.*, vol. 63, no. 3, pp. 557-576, 1996.
- [BOLZ 99] Bolzern P., Colaneri P., De Nicolao G., H_∞ robustness of adaptive filters against measurement noise and parameter drift, *Automatica*, vol. 35, no. 9, pp. 1509-1520, 1999.
- [BOUD 96] Boudaoud N., Masson M. H., Dubuisson B., One line diagnosis of a technological system : a fuzzy pattern recognition approach, In 13th IFAC Congress, San Francisco, USA, August 1996.
- [BOUD 00] Boudaoud N., Masson M. H., Diagnosis of transient states : A pattern recognition approach, *APII-JESA*, vol. 34, no. 5, pp. 689-708, 2000.
- [BRUN 90] Brunet J., Labarrère M., Jaume D., Rault A., Vergé M., Détection et diagnostic de pannes, *Traité des nouvelles technologies, série Diagnostic et Maintenance*, Hermès, Paris, 1990.
- [CAGL 88-a] Caglayan A. K., Allen S. M., Wehmuller K., Evaluation of a second generation reconfiguration strategy for aircraft flight control systems subjected to actuator failure surface damage, *Proc. Nat. Aero. & Electr. Conf.*, Dayton, May 1988, pp. 520-529, 1988.

- [CAGL 88-b] Caglayan A. K., Rahnamai K., Allen S. M., Detection, identification and estimation of surface damage/actuator failure for high performance aircraft, *Proc. of the American Control Conference*, Atlanta, GA, 1988.
- [CARP 99] Carpentier T., Placement de capteurs pour la surveillance des processus complexes, Thèse de Doctorat de l'Université de Lille I, 1999.
- [CEA 78] Commissariat à l'Energie Atomique, Statistique appliquée à l'exploitation des mesures. Masson, 1978.
- [CHEM 80] Chemouil P., Wahdan A. M., Output feedback control of systems with slow and fast modes, *Large Scale Systems*, vol. 1, pp. 257-264, 1980.
- [CHEN 70] Chen C. T., Introduction to Linear System Theory. New York : Holt, Rinehart and Winston, 1970.
- [CHEN 96-a] Chen J., Patton R. J., Zhang H.-Y., Design of unknown input observers and robust fault detection filters, *Int. J. Contr.*, vol. 63, no. 1, pp. 85-105, 1996.
- [CHEN 96-b] Chen J. , Patton R. J., Optimal filtering and robust fault diagnosis of stochastic systems with unknown disturbances, *IEE Proceedings. Control Theory and Applications*, vol. 143, no. 1, pp. 31-36, 1996.
- [CHEN 97] Cheng C.-F., Design of robust observation schemes for uncertain large scale systems, *IEE Control theory and applications*, vol. 144, no. 5, pp. 369-374, 1997.
- [CHOW 80] Chow E. Y., Willsky A. S., Issues in the development of a general design algorithm for reliable failure detection, In: *19th IEEE CDC*, Albuquerque, pp. 1006-1012, 1980.
- [CHOW 84] Chow E. Y., Willsky A. S., Analytical redundancy and the design of robust detection systems, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-29, no. 7, pp. 603-614, 1984.
- [CLAR 75] Clark R. N., Fosth D. C., Walton W. M., Detecting instrument malfunctions in control systems, *IEEE Trans. Aero. Elect. Sys.*, vol. 11, no. 4, pp. 465-473, 1975.
- [CLAR 78] Clark R. N., Instrument fault detection, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 456-465, 1978.
- [CROW 83] Crowe C. M., Garcia Campos Y. A., Hrymak A., Reconciliation of process flow rates by matrix projection, Part 1 : the linear case, *AIChE Journal*, vol. 29, no. 6, pp. 881-888, 1983.
- [DARO 86] Darouach M., Observabilité et validation des données des systèmes de grande dimension, application à l'équilibrage des bilans de mesures, Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, Nancy, 1986.
- [DARO 94-a] Darouach M., Zasadzinski M., Full-order observers for linear systems with unknown inputs, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-39, pp. 606-609, 1994.
- [DARO 94-b] Darouach M., On the novel approach to the design of unknown inputs observers, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-39, pp. 698-699, 1994.
- [DARO 96] Darouach M., Zasadzinski M., Hayar M., Reduced-order observer design for descriptor systems with unknown inputs, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-41, no. 7, pp. 1068-1072, 1996.

- [DECK 77] Deckert J. C., Desai M. N., Deyst J. J., Willsky A. S., F-8 DFBW Sensor failure identification using analytical redundancy, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-22, no. 5, pp. 795-803, 1977.
- [DECL 91] Declerck P., Staroswiecki M., Characterization of the canonical components of a structural graph for fault detection in large scale industrial plants, In : *ECC'91, European Control Conference*, Grenoble, France, 1991.
- [DELM 94] Delmaire G., Cassar J. P., Staroswiecki M., Comparison of identification and parity space approaches for failure detection in single-input single output, In: *33th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida, pp. 2279-2285, 1994.
- [DENO 97] Denoeux T., Analysis of evidence-theoretic decision rules for pattern classification. *Pattern Recognition*, vol. 30, no. 7, pp. 1095-1107, 1997.
- [DENO 98] Denoeux T., Application du modèle des croyances transférables en reconnaissance de formes. *Traitement du signal (In press)*, 1998.
- [DEO 74] Deo N., Graph theory with application to engineering and computer sciences, *Mc Graw Hill*, New York, 478 pages, 1974.
- [DING 90] Ding X., Frank P.M., Guo L., Robust observer design via factorization approach, In: *29th IEEE Conference on Decision and Control*, Honolulu, 1990.
- [DING 94-a] Ding X., Frank P.M., Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault detection, *Automatica*, vol. 30, pp. 789-804, 1994.
- [DING 94-b] Ding X., Frank P.M., Comparison of observer-based fault detection approaches and synthesis, *IFAC Symposium SAFEPROCESS'94*, Helsinki, 1990.
- [DORR 95] Dorr R., Détection de défauts de capteurs par redondances matérielle et analytique. Application aux centrales nucléaires, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1995.
- [DOYL 92] Doyle J. C., Francis B. A., Tannebaum A. R., *Feedback control theory*, Macmillan, New York, 1992.
- [DUBU 90] Dubuisson B., *Diagnostic et reconnaissance des formes*, Hermès, Paris, 1988.
- [DUGA 88] Dugard L., Landau I. D., *Commande adaptative : méthodologie et applications*, *Traité des nouvelles technologies, série Automatique*, Hermès, Paris, 1988.
- [EVAN 70] Evans F. A., Wilcox J. C., Experimental strapdown redundant sensor inertial navigation system, *Journal of Spacecraft Rockets*, vol. 7, pp. 1070-1074, 1970.
- [FETZ 75] Fetzer E. E., Anderson P. M., Observability in the state estimation of power system, *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, pp. 1981-1988, 1975.
- [FRAN 87] Frank P. M., Fault diagnosis in dynamic systems via state estimation – A survey. System fault diagnosis, Reliability end related knowledge-based approaches, Tzafestas e.a. Eds, D. Reidel Pub., vol. 1, pp. 35-98, 1987.
- [FRAN 90] Frank P. M., Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – A survey and some new results, *Automatica*, vol. 26, pp. 459-474, 1990.

- [FRAN 91] Frank P. M., Enhancement of robustness in observer-based fault detection, *IFAC Symposium SAFEPROCESS'91, Baden-Baden, Germany*, 1991.
- [FREL 92] Frelicot C., Un système adaptatif de diagnostic prédictif par reconnaissance des formes floues. PhD thesis, Univ. de Technologie de Compiègne, Compiègne, 1992.
- [FREL 96] Frelicot C., A fuzzy-based adaptive pronostic system. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 30, no. 2-3, pp. 281-299, 1996.
- [GADD 96] Gaddouna B., Giuliani S., Ragot J., Design of observers for descriptor systems affected by unknown inputs, *International journal of systems science*, vol. 27, no. 5, pp. 465-471, 1996.
- [GAO 90] Gao Z., Antsaklis P. J., Pseudo-inverse method for reconfigurable control with guaranteed stability, *11th IFAC World Congress*, Tallin, 1990.
- [GAO 91] Gao Z., Antsaklis P. J., Stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems, *International Journal of Control*, vol. 53, no. 3, pp. 717-729, 1991.
- [GARC 89] Garcia H. E., Learning automata in a reconfigurable controller, M.S.E.E. Thesis, The Pennsylvania State University, December, 1989.
- [GARC 91] Garcia H. E., Ray A., Edwards R. M., Reconfigurable control of power plants using automata, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 85-92, 1991.
- [GERT 90] Gertler J. Singer D., A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation, *Automatica*, vol. 26, no. 2, pp. 381-388, 1990.
- [GERT 91] Gertler J., Analytical Redundancy methods in fault detection and isolation – survey and synthesis, *IFAC Symposium SAFEPROCESS'91, Baden-Baden, Germany*, vol.1, pp. 9-21, 1991.
- [GERT 95] Gertler J., Diagnosing parameters faults : from parameter equation to parity relations, *Proceedings of the American Control Conference*, Seattle, USA, 1995.
- [GHOS 83] Ghosh B. K., Byrnes C. I., Simultaneous stabilization and simultaneous pole-placement by nonswitching dynamic compensation, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-28, no. 6, pp. 735-741, 1983.
- [GRIM 88] Grimble M. J., H_∞ design of optimal linear filters, In : *Linear Circ., Syst. and Signal Processing : Theory and Application*, C. I. Byrnes, C. F. Martin and R. E. Seaks (Eds.) North-Holland, Amsterdam, pp. 533-540, 1988.
- [GRIM 96] Grimble M. J., Robust filter design for uncertain systems defined by both hard and soft bounds, *IEEE Trans. signal process.*, vol. 44, no. 5, pp. 1063-1071, 1996.
- [HAND 89] Handelman D. A., Stengel R. F., Combining expert system and analytical redundancy concepts for fault-tolerant flight control, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 12, no. 1, pp. 39-45, 1989.
- [HAUT 83] Hautus M. L. J., Strong detectability and observers, *Linear Algebra and its applications*, vol. 50, pp. 353-369, 1983.
- [HIMM 78] Himmelblau D. M., Fault Detection and diagnosis in chemical and petrochemical processes, Elsevier, 1978.

- [HINK 71] Hinkley D. V., Inference about the change-point from cumulative sum-tests, *Biometrika*, vol. 11, pp. 1-21, 1971.
- [HOBL 00-a] **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Aïtouche A., Fault Tolerance with respect to Actuator Failures in LTI Systems, In: *the Proceedings of IFAC Symposium SAFEPROCESS'2000*, vol. 2, pp. 804-809, Budapest, Hungary, 2000.
- [HOBL 00-b] **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Aïtouche A., Fault Tolerant Sensor Network Design Using Redundancy Degrees, In: *the Proceedings of IFAC Symposium (4th) Intelligent Components and Instruments for Control Application-SICICA 2000*, pp. 93-98, Buenos Aires, Argentina, 2000.
- [HOBL 00-c] **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Aïtouche A., Fault Tolerant Actuator Selection Using Redundancy Degrees, In: *the IEE Conference CONTROL'2000*, Cambridge, UK, 2000.
- [HOBL 00-d] **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Aïtouche A., Optimal Design of Fault Tolerant Sensor networks, In: *the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 467-472, Anchorage Hilton, Anchorage, Alaska, USA, 2000.
- [HOBL 00-e] **Hoblos G.**, Aïtouche A., Staroswiecki M., Tolérance aux fautes d'actionneurs, In: *CIMASI 2000*, Octobre 2000, Casablanca, Maroc, 2000.
- [HOBL 00-f] **Hoblos G.**, Staroswiecki M., Aïtouche A., Sur la tolérance aux fautes de capteurs et d'actionneurs, *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, n°3, 2001.
- [HÖFL 94] Höfling T., Pfeufer T., Detection of additive and multiplicative faults – Parity space vs. Parameter estimation, *IFAC Symposium SAFEPROCESS'94*, pp. 593-544, 1994.
- [HORO 85] Horowitz I., Arnold P. B., Houppis C. H., YF-16-CCV Flight control system reconfiguration design using quantitative feedback theory, *Proc. Nat. Aero. & Electr. Dayton*, May, 578-585.
- [HOU 92] Hou M., Müller P. C., Design of observers for linear systems with unknown inputs, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-37, pp. 871-875, 1992.
- [HOWI 91] Howitt G., Luus R., Simultaneous stabilization of linear single-input systems by linear state feedback control, *Int. J. Cont.*, vol. 54, no. 4, pp. 1015-1030, 1991.
- [HUAN 90] Huang C. Y., Stengel R. F., Restructurable control using proportional-integral implicit model-following, *J. Guid., Cont. Dyn.*, vol. 13, no. 2, pp. 303-309, 1990.
- [HUBE 84] Huber R. R., McCulloch B., Self-repairing flight control system, *SAE Technical paper series 841552, Aerospace Congress and Exposition*, Long Beach, California, pp. 1-20, 1984.
- [IMMO 94] Immonen P. J., Classification and placement of measurements through LP/MIP algorithms, *IFAC/IMACS Symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPROCESS'94*, ESPOO, Finland, June 13-15, 1994.
- [ISER 84] Isermann R., Process fault detection based on modeling and estimation methods : a survey, *Automatica*, vol. 20, no. 4, pp. 387-404, 1984.
- [ISER 91] Isermann R., Freyermuth B., Process fault diagnosis based on process model knowledge – Part I : Principles for fault diagnosis with parameter estimation, *Transaction of the ASME*, vol. 113, pp. 620-626, 1991.

- [JONE 73] Jones H. L., Failure detection in linear systems. Ph. D. dissertation, MIT, Cambridge, 1973.
- [KALM 60] Kalman R. E., A new approach to linear filtering and prediction problems, *Trans. ASME Ser. D., J. Basic Eng.*, vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [KALM 61] Kalman R. E., Bucy R. S., New results in linear filtering and prediction theory, *Trans. ASME Ser. D., J. Basic Eng.*, vol. 83, pp. 95-108, 1961.
- [KAMI 95] Kaminer I., Pascoal A. M., Khargonekar P. P., Coleman E. E., A velocity algorithm for the implementation of gain-scheduled controllers, *Automatica*, vol. 31, no. 8, pp. 1185-1192, 1995.
- [KEAT 95] Keating M. S., Pachter M., Houppis C. H., QFT applied to fault-tolerant flight control system design, *Proc. ACC*, Seattle, 1995.
- [KELL 98-a] Keller J. Y., Darouach M., Caramelle L., Kalman filter with unknown inputs and robust two-stage filter, *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 29, no. 1, pp. 41-47, 1998.
- [KELL 98-b] Keller J. Y., Darouach M., Reduced-order Kalman filter with unknown inputs, *Automatica*, vol. 34, no. 11, pp. 1463-1468, 1998.
- [KHAR 92] Khargonekar P. P., Rotea M. A., Mixed H_2/H_∞ filtering, *Proc. 31st IEEE Conf. Decision and Control*, Tucson, AZ, pp. 2305-2210, 1992.
- [KOGI 75] Koglin H. J., Optimal measuring system for state estimation, *Proc. of the PSCC Conference*, Cambridge, U.K., 1975.
- [KRET 87] Kretsovalis A., Mah R. S. H., Effect of Redundancy on Estimation Accuracy in Process Data Reconciliation, *Chem. Eng. Sci.*, vol. 42, pp. 2115-2121, 1987.
- [KRST 94] Krstic M., Kokotovic P. V., Observer based schemas for adaptive nonlinear state feedback control, *International Journal of Control*, vol. 59, no. 6, pp. 1373-1381, 1994.
- [KUDV 80] Kudva P., Viswanadham N., Ramakrishna A., Observers for linear systems with unknown inputs, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-25, pp. 113-115, 1980.
- [KURE 83] Kurek J., The state reconstruction for linear systems with unknown inputs, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-36, pp. 511-515, 1983.
- [KWAK 93] Kwakernaak H., Robust control and H_∞ -optimisation : Tutorial Paper, *Automatica*, vol. 29, pp. 255-273, 1993.
- [LABA 80] Labarrère M., Détection de pannes de capteurs d'avions par utilisation de la redondance analytique, Nato Advisor Group for Aerospace Research and Development, Lecture series n° 109, Neuilly-sur-seine, France, pp. 4.1-4.17, 1980.
- [LAND 93] Landau I. D., Cyrot Ch., Rey D., Robust control design using the combined pole placement/sensibility function shaping method, *Proc. of European Cont. Conf. ECC'97*, Brussels, Belgium, Plenary Lectures and Mini-Courses, pp. 170-130, 1993.
- [LAND 97] Landau I. D., Lozano R., M'Saad M., Adaptive Control, Springer, Communications and Control Engineering Series, 1997.
- [LARM 93] De Larminat P., Automatique, commande des systèmes linéaires. Traité des nouvelles technologies, série Automatique, Hermès, Paris, 1993.

- [LAWR 95] Lawrence D., Rugh W., Gain scheduling dynamic linear controllers for non-linear plant, *Automatica*, vol. 31, no. 3, pp. 381, 1995.
- [LEBA 82] Lebart L., Morineau A., Fenelon J. P., Traitement des données statistiques. Dunod, 1982.
- [LEVI 90] Levine J., Marino R., On Fault-Tolerant Observers, *IEEE Trans. Automat. contr.* vol. AC-35, pp. 623-627, May 1990.
- [LUEN 71] Luenberger D. G., An Introduction to Observers, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-16, no. 1, pp. 596-602, 1971.
- [LUON 94] Luong M., Maquin D., Huynh C.T., Ragot J., Observability, Redundancy, Reliability and Integrated design of Measurement System, *SICICA'94*, Budapest, Hungary, 1994.
- [LUON 95] Luong M., Maquin D., Huynh C.T., Ragot J., Observability, Reliability and sensor positioning, *AIChE Spring National Meeting*, Houston, USA, 1995.
- [LUON 96] Luong M., Conception de l'architecture d'un système d'instrumentation sous contraintes de diagnostic, de fiabilité, et de disponibilité, *Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine*, Nancy, 1996.
- [M'SAA 96] M'Saad M., Chebassier J., Commande prédictive des systèmes, Commande optimale : conception optimisée des systèmes, Diderot, 1996.
- [MADR 92] Madron F., Veverka V., Optimal selection of Measuring Points in Complex Plants by Linear Models, *AIChE J.*, vol. 38, no. 2, pp. 227-236, 1992.
- [MAGN 94-a] Magni J. F., Manouan A., Robust flight control design by eigenstructure assignment, In *Proc. IFAC Symposium on Robust Control Design*, RIO, September, 1994.
- [MAGN 94-b] Magni J. F., Mouyon P., On residual generation by observer and parity space approaches, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-39, pp. 441-447, 1994.
- [MAH 76] Mah R. S. H., Stanley G. M., Downing D. M., Reconciliation and rectification of process flow and inventory data, *Industrial Engineering Chemistry Process Design Development*, vol. 15, no. 1, pp. 175-183, 1976.
- [MAQU 86-a] Maquin D., Ragot J., Fayolle M., Darouach M., Observabilité des systèmes linéaires à mesures manquantes – Application à l'établissement de bilans cohérents, *Revue de l'Industrie Minérale, Les Techniques*, pp. 53-56, 1986.
- [MAQU 86-b] Maquin D., Fayolle M., Darouach M., Ragot J., Le positionnement de capteurs dans les systèmes industriels de grande dimension, *Proceedings of IMACS Congress*, Villeneuve d'Ascq, France, 1986.
- [MAQU 87-a] Maquin D., Darouach M., Fayolle M., Ragot J., Localizations of sensors in large scale industrial systems, In *Applied Modelling and Simulation of Technological Systems* (Edited by Borne and Tzafests), pp. 33-39, Elsevier, Netherlands, 1987.
- [MAQU 87-b] Maquin D., Observabilité, diagnostic et validation de données des procédés industriels, *Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I*, Nancy, 1987.
- [MAQU 95] Maquin D., Luong, M., Ragot J., Some ideas about the design of measurements systems, *European Control Conference, ECC'95*, ROME, September, 1995.
- [MARI 90] Marino M., Adaptive observer for single-output nonlinear systems, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-35, no. 9, pp. 1054-1085, 1990.

- [MARI 92] Marino M., Tomei P., Adaptive observers for a class of multi-output non linear systems, *Int. J. Adaptive Contr. Signal Processing*, vol. 6, pp. 353-365, 1992.
- [MASS 96] Masson M. H., Dubuisson B., Frélicot C., Conception d'un modèle de reconnaissance des formes floues pour le diagnostic. *RAIRO-APII-JESA*, pp. 319-341, 1996.
- [MASS 86] Massoumnia M. A., A geometric approach to the synthesis of failure detection filters, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-31, no. 9, pp. 839-846, 1986.
- [MAZZ 95] Mazzour E. H., Héraud N., Alfonsi M., Observabilité et estimation d'état des systèmes bilinéaires complets, *Diagnostic et sûreté de fonctionnement*, vol. 5, no. 4, pp. 359-383, 1995.
- [MAZZ 96] Mazzour E. H., Héraud N., Alfonsi M., Utilisation des relations de redondance analytique pour la tolérance de défaillances de capteurs, *RAIRO-APII-JESA, European Journal of Automation*, vol. 30, no. 9, pp. 1273-1288, 1996.
- [McDO 73] McDonald J. P., Kwatny H. G., Design and analysis of boiler-turbine-generator controls using optimal linear regulator theory, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-18, no. 3, pp. 202-209, 1973.
- [MEDV 91] Medvedev A., Toivonen H. T., Investigation of finite memory observer structure, Process Control Laboratory, Dept. Of Chemical Engineering, Abo Akademi, Report 91-6, 1991.
- [MEYE 93] Meyer M., Enjalbert M., Aide au positionnement de capteurs sur des procédés complexes, *Entropie*, vol. 179, pp. 31-39, 1993.
- [MEYE 94] Meyer M., Le Lann J.M., Koehert B., Enjalbert M., Optimal selection of sensor location on a complex plant, using a graph oriented approach, *Supplement to Computer Chemical Engineering*. vol. 18, pp. S535-S540, 1994.
- [MOER 89] Moerder D. D., Halyo N., Broussard J. R., Caglayan A. K., Application of precomputed control laws in a reconfigurable aircraft flight control system, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 12, no. 3, pp. 325-333, 1989.
- [MONT 85-a] Monticelli A., Wu F. F., Network observability : theory, *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, vol. 104, pp. 1042-1048, 1985.
- [MONT 85-b] Monticelli A., Wu F. F., Network observability : identification of observable islands and measurement placement, *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, vol. 104, pp. 1035-1041, 1985.
- [MONT 86] Monticelli A., Wu F. F., Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, vol. 1, pp. 201-208, 1986.
- [MURA 96] Murad G. A., Postlethwaite I., Gu D.-W., A robust design approach to integrated controls and diagnostics, *13th IFAC World Congress*, San Francisco, June, pp. 199, 1996.
- [NETT 88] Nett C. N., Jacobson C. A., Miller A. T., An integrated approach to controls and diagnostics : the a parameter controller, *Proceedings of ACC'88*, pp. 824-835, 1988.
- [MORA 93] Morari M., Zafiriou E., Robust process control, Prentice Hall International, Englewood Cliffs, N. J., 1989.

- [MORS 90] Morse W. D., Ossman K. A., Model-following reconfigurable flight control system for the AFTI/F-16, *J. Guid., Cont. Dyn.*, vol. 13, no. 6, pp. 969-976, 1990.
- [NAGP 91] Nagpel K. M., Khargonekar P. P., Filtering and smoothing in an H_∞ setting, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-36, pp. 152-166, 1991.
- [NARE 74] Narendra K., Thathachar M. A. L., Learning automata – A survey, *IEEE Trans. Sys., Man., Cybern.*, vol. SMC-4, no. 4, pp. 323-334, 1974.
- [NARE 89a] Narendra K., Thathachar M. A. L., Learning automata : An introduction, Prentice-Hall, 1990.
- [NARE 89b] Narendra K. S., Annaswamy A., Stable adaptive systems, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.
- [NOUR 93] Noura H., Fonte C., Robert M., Fault tolerant control using simultaneous stabilization, *Proceedings of IEEE SMC'93*, Le Touquet, France, 1993.
- [NOUR 94] Noura H., Sauter D., Aubrun C., A fault detection and accommodation method applied to an inverted pendulum. thermal plant, *Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications*, 24th-26th August 1994, Glasgow, Scotland.
- [NUNI 97] Nuninger W., Kratz F., Ragot J., Structural equivalence between direct residuals based on parity space and indirect residuals based on unknown inputs observers, *Proceedings of IFAC Symposium Safeprocess'97*, vol. 1, pp. 462-467, Kingston Upon Hull, United Kingdom, 1997.
- [OCHI 91] Ochi Y., Kanai K., Design of restructurable flight control systems using feedback linearisation, *J. of Guid., Cont. and Dyn.*, vol. 14, no. 5, pp. 903-911, 1991.
- [OCHI 93] Ochi Y., Application of feedback linearisation method in a digital restructurable flight control system, *J. of Guid., Cont. and Dyn.*, vol. 16, no. 1, pp. 111-117, 1991.
- [OSTR 85] Ostroff A. J., Techniques for accommodating control effector failures on a Mildly statically unstable airplane, *Proc. of the American Cont. Conf.*, pp. 906-913, 1985.
- [OUTS 93] Outsloup A., The great principles of CRONE Control, *Proceedings of IEEE SMC'93*, Le Touquet, France, 1993.
- [OUTS 94] Outsloup A., La robustesse : analyse et synthèse de commandes robustes, *Traité des nouvelles technologies, série Automatique*, Hermès, Paris, 1994.
- [PATT 89] Patton R. J., Fault detection – Theory and Application, Prentice Hall, New York, 1989.
- [PATT 91] Patton R. J., Chen J., A re-examination of the relationship between parity space and observer-based approaches in fault diagnosis, *Revue Européenne de Diagnostic et Sécurité de Fonctionnement*, vol. 1, no. 2, pp. 183-200, 1991.
- [PATT 97] Patton R. J., Fault Tolerant Control, the 1997 Situation, In: *IFAC Safeprocess'97*, Kingston Upon Hull, United Kingdom, vol. 2, pp. 1033-1055, 1997.
- [PETE 87] Petersen I. R., A procedure for simultaneously stabilizing a collection of single input linear systems using non-linear state feedback control, *Automatica*, vol. 23, no. 1, pp. 33-40, 1987.
- [PHUA 77] Phua K., Dillon T. S., Optimal choice of measurements for state estimation, *Power Industry Computer Applications Conference*, pp. 431-440, 1977.

- [PORT 70] Porter B., Singular perturbation methods in the design of full-order observers for multivariable linear systems, *Int. J. Control*, vol. 26, no. 4, pp. 589-594, 1977.
- [POTT 77] Potter J. E., Suman M. C., Thresholdless redundancy managements with arrays of skewed instruments integrity in electronic flight control systems, *AGARDOGRAPH*, vol. 224, no. 15, pp. 1-1, 1977.
- [QIU 93] Qiu Z., Gertler J., Robust FDI systems and H_∞ -optimization – Disturbances and tall fault case, In: *32th IEEE Conference on Decision and Control*, San Antonio, 1993.
- [RAGO 90] Ragot J., Maquin D., Turbatte H. C., Aide au positionnement de capteurs dans les systèmes linéaires et bilinéaires, *Rapport CRAN/ELF*, Nancy, 1990.
- [RAGO 92] Ragot J., Maquin D., Bloch G., Sensor Positioning for processes described by linear processes. *Diagn. Sûreté Fonct.*, vol. 2, no. 2, pp. 115, 1992.
- [RATT 85] Rattan K. S., Evaluation of control mixer concept for reconfiguration of flight control system, *Proc. Nat. Aero. & Electr.*, Dayton, pp. 560-569, 1985.
- [RAZA 85] Raza S. J., Silverthorn J. T., Use of the pseudo-inverse for the design of a reconfigurable flight control systems, *Proc. Nat. Aero. & Electr.*, Dayton, pp. 349-356, 1985.
- [SAEK 82] Saeks R., Murray B., Fractional representation, algebraic geometry, and the simultaneous stabilization problem, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-27, no. 4, pp. 895-903, august, 1982.
- [SAVK 97] Savkin A. V., Petersen I. R., Robust filtering with missing data and a deterministic description on noise and uncertainty, *International Journal of Systems Sciences*, vol. 28, no. 4, pp. 373 – 378, 1997.
- [SHAK 90] Shaked U., H_∞ - minimum error state estimation of linear stationary processes, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-35, pp. 554-558, 1990.
- [SHAK 92] Shaked U., Theodor Y., H_∞ - optimal estimation : A tutorial, *Proc. 31st IEEE Conf. Decision and Control*, Tucson, TX, pp. 2278-2286, 1992.
- [SHAM 92] Shamma J., Athans M., Gain scheduling : Potential hazards and possible remedies, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 101-107, 1992.
- [SHI 96] Shi P., Robust filtering for uncertain systems with sampled measurements, *Int. J. Sys. Science*, vol. 27, no. 12, pp. 1403-1415, 1996.
- [SHI 97] Shi P., Wang Y., Xie L., Robust filtering for interconnected uncertain systems under sampled measurements, *J. Dyn. Sys., Meas., and Contr.*, vol. 119, no. 2, pp. 337-340, 1997.
- [STAN 81-a] Stanley G. M., Mah R. S. H., Observability and redundancy in process data estimation, *Chemical Engineering Science*, vol. 36, pp. 259-272, 1981.
- [STAN 81-b] Stanley G. M., Mah R. S. H., Observability and redundancy classification in process networks, *Chemical Engineering Science*, vol. 36, pp. 1941-1954, 1981.
- [STAR 91] Staroswiecki M., Cocquempot V., Cassar J. P., Observer-based and parity space approaches for failure detection and identification, *Proceedings of the IMACS Symposium MCTS*, pp. 536-541, 1991.

- [STAR 99] Staroswiecki M., **Hoblos G**, Aitouche A., Fault tolerance analysis of sensor systems, *38th IEEE CDC'99 (Conference on Decision and Control)*, vol. 4, pp. 3581-3586, Phoenix, Arizona, USA, 1999.
- [STAR 00] Staroswiecki M., Gehin, A. L., From control to supervision, *Proceedings of IFAC Symposium Safeprocess'2000*, vol. 1, pp. 312-323, Budapest, Hungary, 2000.
- [STEI 87] Stein G., Athans M., The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-32, pp. 105-114, IEEE, New York, 1987.
- [SUN 91] Sun W., Nagpal K. M., Khargonekar P. P., H_∞ control and filtering for sampled-data systems, *Proc. of the American Control Conference*, Boston, MA, pp. 1652-1657, 1991.
- [SYR 93] Syrmos V.L, Lewis F.L., Output feedback eigenstructure assignment using two sylvester equations, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-38, pp. 495-499, IEEE, New York, 1993.
- SUN 91] Sun W., Nagpal K. M., Khargonekar P. P., H_∞ control and filtering for sampled-data systems, *Proc. of the American Control Conference*, Boston, MA, pp. 1652-1657, 1991.
- [TABL 79] El Tablawi T. A., El Hagry M. T., State estimation of power systems – Part 1 : Optimum meter placement, *Control of Power Systems Conference and Exposition Conference Record*, pp. 35-39, New York, USA, 1979.
- [TAKA 99] Takahashi R. H. C., Palhares R. M., PERES P. L. M., Discrete-time singular observers : h_2/h_∞ optimality and unknown inputs, *Int. J. Contr.*, vol. 72, no. 6, pp. 481-492, 1999.
- [TAKH 87] Takh M., Speyer J. L., A parameter robust LQG design synthesis with applications to control of flexible structures, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-30, IEEE, New York, 1987.
- TURB 91-a] Turbatte H.C, Maquin D., Cordier B., Huynh C. T., Analytical Redundancy and Reliability of Measurement System, *SAFEPROCESS'91, IFAC-IMACS Symposium on fault detection supervision and safety for technical process*, Baden-Baden, Germany, vol. 5, pp.49-54, 1991.
- [TURB 91-b] Turbatte H.C, Maquin D., Ragot J., Recherche de l'architecture d'instrumentation la plus fiable d'un procédé modélisé par des équations de bilan linéaires, *Rapport CRAN/ELF*, Nancy, 1991.
- [TURB 92] Turbatte H.C, Conception d'architectures d'instrumentation sous contraintes d'observabilité et de fiabilité. Application à des plates-formes pétrolières, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1996.
- [TYLE 94] Tyler M., Morari M., Optimal and robust design of integrated control and diagnosis modules, *Proceedings of ACC'94*, 1988.
- [VACL 69] Vaclavek, V., Studies on system engineering III. Optimal Choice of the Balance Measurements in Complicated Chemical Engineering Systems, *Chemical Engineering Systems.*, vol. 24, pp. 947-955, 1969.
- [VERM 84] Verma M., Jonkheere E., L_∞ -compensation with mixed sensibility as a broad-band matching problem, *Systems and Control Letters*, vol. 14, pp. 295-306, 1984.
- [VIDY 82] Vidyasagar M., Viswanadham K., Algebraic design techniques for reliable stabilization, *IEEE Trans. Automat. contr.*, vol. AC-27, no. 5, pp. 1085-1095, 1982.

- [VISW 87] Viswanadham N., Scrinander R., Fault detection using unknown-input observer, *Control-Theory and Advanced Technology*, vol. 3, pp. 91-101, 1987.
- [WILL 76] Willsky A. S., A survey of design methods for failure detection in dynamic systems, *Automatica*, vol. 12, pp. 601-611, 1976.
- [WU 98] Wu H. S., Sufficient conditions for robust stability of LQG optimal control systems including delayed perturbations A comparison of characteristic locus and H_∞ design methods for VSTOL flight control system design, *Journal of optimization theory and applications*, vol. 96, no. 2, pp. 437-451, 1998.
- [WÜNN 90] Wünnenberg J., Observer-based fault detection in dynamic systems, Ph. D Thesis, University of Duisburg, Germany, 1990.
- [XIE 93] Xie L., De Souza C. E., H_∞ State estimation for linear periodic systems, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-38, pp. 1704-1707, 1993.
- [YAES 89] Yaesh I., Shaked U., Game theory approach to optimal linear estimation in the minimum H_∞ norm sense, *Proc. 28th IEEE CDC*, Tampa, FL, pp. 421-425, 1989.
- [YAES 91] Yaesh I., Shaked U., A transfer function approach to the problems of discrete-time H_∞ optimal control and filtering, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-36, pp. 1267-1271, 1991.
- [YAES 92-a] Yaesh I., Shaked U., Game theory approach to optimal linear state estimation and its relation to H_∞ norm estimation, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-37, pp. 828-831, 1991.
- [YAES 92-b] Yaesh I., Shaked U., Game theory approach to state estimation of linear discrete-time processes and its relation to H_∞ optimal estimation, *Int. J. Contr.*, vol. 55, pp. 1443-1452, 1992.
- [YEDA 88] Yedavalli R. K., Stability robustness measures under dependent uncertainty, *Proceedings of ACC'88*, pp. 820-823, 1988.
- [YOUL 74] Youla D. C., Bongiorno J. J., Lu C. N., Single-loop feedback-stabilization of linear multivariable dynamical plants, *Automatica*, vol. 10, pp. 159-173, 1974.
- [ZHEN 97] Zheng C., Patton R. J., Chen J., Robust fault-tolerant systems synthesis via LMI, In: *IFAC Safeprocess'97*, Kingston Upon Hull, United Kingdom, vol. 1, pp. 347-352, 1997.
- [ZHOU 87] Zhou K., Khargonekar P. P., Stability robustness bounds for linear space models with structured uncertainty, *IEEE Trans. Aut. Contr.*, vol. AC-32, no. 7, pp. 621-623, 1987.
- [ZIDO 99] Zidong W. H., Jihong Z. H., Unbehauen H., Robust filter design with time-varying parameter uncertainty and error variance constraints, *Int. J. Control.*, vol. 72, no. 1, pp. 30-38, 1999.
- [ZOUH 95] Zouhal L. M., Denoeux T., A comparison between fuzzy and evidence-theoretic k -NN rules for pattern recognition. In *Proceedings of EUFIT'95*, vol. 3, pp. 1319-1325, Aachen, August 1995.
- [ZWIN 95] Zwingelstein G., Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels, *Traité des nouvelles technologies, série Diagnostic et Maintenance*, Hermès, Paris, 1995.

