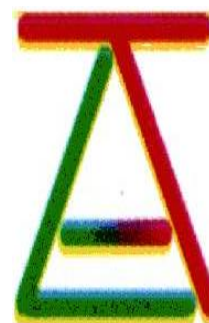


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie



THESE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE DOCTORAT 3^{ème} Cycle science LMD

Spécialité : Génie Electrique

Option : Automatique (modélisation et contrôle des processus)

préparée au Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT)

et présentée par

SOUAD TAHRAOUI

Intitulé :

Diagnostic Des Systèmes Dynamiques à Base
D'observateurs à Entrées Inconnues
(Applications Aux Processus Hydrauliques)

sous la direction du Professeur. Abdelmadjid MEGHEBBAR

soutenue publiquement le 10 décembre 2015 devant la commission composée de

B. CHERKI	Président	Professeur	U.A.B - Tlemcen
A. MEGHEBBAR	Directeur de thèse	Professeur	U.A.B - Tlemcen
H. HAFFAF	Examineur	Professeur	U.A.B - Oran1
M. F. KHELFI	Examineur	Professeur	U.A.B - Oran1

Année universitaire 2015 - 2016

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'études.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été menés au Laboratoire de Recherche en Automatique de Tlemcen (LAT), au sein de l'équipe de Sûreté et Diagnostic, rattachée au groupe thématique Sûreté de fonctionnement et diagnostic des systèmes sous la direction de Monsieur Abdelmajid MEGHEBBAR.

Je tiens à lui témoigner ma profonde gratitude pour l'accueil, le suivi et l'aide précieuse qu'il m'a apporté tout au long de ce travail. Je souhaite exprimer ma plus sincère reconnaissance à Monsieur Abdelmajid MEGHEBBAR pour la confiance qu'il a eu en moi en m'offrant la possibilité d'intégrer leur équipe de recherche. Ses qualités humaines, ses qualités de chercheur, ainsi que sa patience m'ont permis de mener à terme cette thèse. Je tiens à lui faire part de toute ma gratitude pour m'avoir accordé tant de confiance.

Je remercie particulièrement Monsieur Brahim CHERKI doublement, d'avoir accepté d'examiner ce travail et d'assurer la présidence du jury et de m'avoir accepté au laboratoire de recherche du fait qu'il assure la présidence. Je tiens également à adresser mes plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'examiner l'ensemble de ces recherches. Je remercie tout particulièrement Messieurs Mrs M.F. KHELFI et H. HAFFAF pour le temps consacré à la lecture minutieuse de ce manuscrit de thèse. J'ai été très honoré de présenter mes travaux de thèse devant un tel jury. Je vous remercie infiniment.

Je tiens particulièrement à remercier tous les membres du laboratoire d'automatique Tlemcen LAT et tous les doctorants pour leur sympathie et l'ambiance chaleureuse qu'ils ont su entretenir tout au long de mon séjour parmi eux et tout particulièrement Madame KHEDIM Zineb, Monsieur LOUCIF Mourad, Madame BOUBEKEUR Djamila pour ses constantes disponibilités.

Je tiens particulièrement à remercier tous les docteurs BELLAOUR Aberrahmane, KHADRAOUI Sofiane et BENYAHIA Boumediène qui m'ont apporté l'aide au début et à la fin de la thèse. Je remercie de même le professeur BOUMEDIENE Abdelmajid pour ses idées et sa disponibilité.

Un grand merci également à tous ceux qui m'ont soutenu ou qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Les enjeux actuels de l'automatique sont essentiellement l'optimisation de performances et la surveillance des processus qui répondent respectivement aux demandes croissantes en termes de rendement, d'exploitation et de sécurité des installations et des opérateurs. L'enjeu est très important pour la surveillance des systèmes complexes critiques où le déterminisme des tâches de diagnostic et de contrôle de cohérence est une condition sine qua non. Ces objectifs se traduisent par le besoin de lois de commande plus efficaces et par l'intégration de modules de surveillance sophistiqués. L'un comme l'autre requiert la collecte d'une information précise et complète quant à l'état du processus à commander et à surveiller.

Les travaux développés dans le cadre de cette thématique concernent la surveillance et le diagnostic des systèmes à base de modèles dynamiques très perturbés par l'utilisation d'observateurs à entrées inconnues. Notre contribution porte sur le problème de la sensibilité des indicateurs de défauts (actionneurs-capteurs) par rapport à ces entrées inconnues (bruit de mesure-défauts de modélisation et perturbations) par la mise en oeuvre de deux méthodes de génération de capteurs informatiques dites à découplage parfait et à découplage approximatif.

Les applications et la mise en oeuvre de ces méthodes sont testées sur des processus hydrauliques du fait de l'existence réelle de ces systèmes, de la simplicité de leurs modélisations mais aussi qu'ils sont très didactiques.

Mots clés : Surveillance, Diagnostic, Observateurs à Entrées Inconnues, Découplage, LMI.

Abstract

Today's challenges of automatic control engineering focus essentially on performance optimization and monitoring of processes which have to meet the respective growing demands in terms of performance, operation and safety of facilities and operators. The issue is very important for monitoring complex critical systems where the determinism of diagnosis and consistency control tasks is essential. To meet these objectives, more efficient control laws are needed and sophisticated monitoring modules are to be integrated. Each one requires collecting accurate and complete information about the status of the process to be controlled and monitored.

All works developed within this theme deal with the monitoring as well as the diagnosis of systems based on very disturbed dynamic models, using unknown input observers. The present work investigates the problem of sensitivity of fault indicators (actuators - sensors) with respect to these unknown inputs (measurement noise, modeling faults and disturbances) through the implementation of two methods of generating computer sensors. These methods are known as perfect decoupling and approximate decoupling.

The implementation of these methods is tested on hydraulic processes, because these systems exist in reality ; they are simple to model and are very didactical.

Mots clés : Monitoring, Diagnosis, Unknown Inputs Observers, Decoupling, Linear Matrix Inequality.

Notations

LTI	Linéaire à temps invariant
MIMO	Multi-entrée multi-sortie (Multiple Input Multiple Output)
SISO	Mono-entrée mono-sortie (Single Input Single Output)
SNL	Système non linéaire
FDI	fault detection and isolation
DOS	Dedicated Observer Scheme.
GOS	Generalised Observer Scheme.
UIO	Observateur à entrées inconnues (Unknown input observer)
NUIO	Observateur non linéaire à entrées inconnues
LMI	inégalité matricielle linéaire
LMI(s)	Inégalité(s) matricielle(s) linéaire(s)
$M < 0$	Matrice M , dénie négative
$M > 0$	Matrice M , dénie positive
u	Entrées connues
f	Entrée inconnue
g	Constante de gravité terrestre [ms^2]
(\cdot)	Dérivée temporelle de (\cdot)
$(\hat{\cdot})$	Estimation de (\cdot)
$(\cdot)^+$	Pseudo-inverse de (\cdot)
$ (\cdot) $	Valeur absolue de (\cdot)
$\ (\cdot)\ $	Norme de (\cdot)
A^T	transposée de la matrice A
H_1	La norme indexe
H_∞	la norme H_∞
CVX	programmation convexes
SDP	Semi definite program LMI

Table des matières

1	Etat de l'art sur le diagnostic à base modèle	5
1.1	Introduction	5
1.2	Définitions générales	6
1.3	Classification de défaut	9
1.3.1	Emplacement	9
1.3.2	Modélisation	10
1.3.3	Caractéristiques temporelles	10
1.4	Principe de la surveillance	10
1.5	Surveillance utilisant les modèles	11
1.5.1	Redondance physique (matérielle)	12
1.5.2	Redondance analytique (équations différentielles et matrices de transfert)	12
1.6	Détection et isolation des défauts (FDI)	13
1.7	Principe du diagnostic	14
1.7.1	Architecture de diagnostic	14
1.8	Performance d'une procédure de diagnostic	16
1.9	Génération de résidus à base modèles	17
1.9.1	Obtention des tables de signatures	18
1.10	Méthodes de diagnostic à base modèle	18
1.10.1	Approches par les espaces de parité	19
1.10.2	Approches par l'estimation de paramètres	20
1.10.3	Approches à base d'observateurs d'états	22
1.11	Structuration des résidus par un banc d'observateurs	23
1.11.1	Les défauts actionneurs	24
1.11.2	Les défauts capteurs	24
1.12	Les avantages des méthodes de diagnostic à base de modèles	25
1.13	Conclusion	26
2	Observateurs à entrées inconnues	27
2.1	Introduction	27
2.2	Présentation d'un observateur linéaire	28
2.3	Quelques définitions relatives aux observateurs	31
2.3.1	Notion d'observabilité	31
2.3.2	Notion de détectabilité	32
2.3.3	Placement de pôle et convergence	32
2.4	Observateur linéaire invariant à entrées inconnues	33
2.4.1	Observateurs à entrées inconnues qui affectent la sortie	33
2.5	Observateur non linéaire à entrées inconnues	40
2.5.1	Différents types d'observateurs de systèmes non linéaires	41
2.6	Conclusion	42

3	Synthèse d'observateur avec découplage parfait	45
3.1	Introduction	45
3.2	Description mathématique du système à surveillé	46
3.2.1	Système nominal	46
3.3	Découplage parfait des entrées inconnues	49
3.4	Synthèse d'observateur à entrée inconnue UIO avec découplage parfait	49
3.4.1	La structure de l'observateur	50
3.5	Conditions d'existence et procédures pour la mise en œuvre du découplage parfait	51
3.6	Algorithme de synthèse de l'observateur	52
3.7	Calcul théorique de résidu	52
3.8	Analyse par table de signatures	52
3.9	Exemples	54
3.9.1	Exemple 1 (système hydraulique de quatre réservoirs)	54
3.9.2	Exemple 2	60
3.10	Conclusion	67
4	Synthèse d'observateur avec découplage approximatif	69
4.1	Introduction	69
4.2	Formulation du problème d'optimisation de détection robuste au diagnostic	70
4.3	Description	72
4.4	La formulation LMI de H_∞	73
4.5	La formulation LMI de H_-	73
4.6	Conception d'un UIO avec découplage approché optimal	74
4.7	Synthèse mixte H_∞/H_- du générateur de résidus	75
4.7.1	Exemple Illustratif	77
4.7.2	Résultats et Discussion	82
4.8	Conclusion	83
5	Application à la détection de pannes dans un système hydraulique	85
5.1	Introduction	85
5.2	Système à cinq réservoirs	86
5.2.1	Description du système	86
5.2.2	Modèle mathématique du système	86
5.3	Linéarisation du système à cinq réservoirs	88
5.3.1	Calcul du point d'équilibre	88
5.4	Détection de défauts	91
5.4.1	Synthèse de générateur de résidu à base observateur UIO à découplage parfait	91
5.5	Calcul théorique des résidus	93
5.6	Résultat et interprétation	98
5.7	Conclusion	99
A	Publications Internationales	105
B	Inverses généralisées	107

C	Matrice de Hurwitz	109
D	Inégalités Linéaires Matricielles	111
D.0.1	Problèmes LMI	111
D.0.2	Ensembles convexes	111
D.0.3	Fonctions convexes	111
D.0.4	Inégalités Linéaires Matricielles (LMIs)	112
D.0.5	Obtention des LMI	112
D.0.6	Exemple C.1 (Etude de la stabilité)	113
D.0.7	Exemple C.2 (Etudes du gain L_2 des systèmes linéaires)	113
D.1	Résolution des LMI	114
	Bibliographie	115

Table des figures

1.1	Défauts d'un processus physique	9
1.2	Les défauts selon leur représentation	10
1.3	Répartition des défauts selon le comportement temporel	10
1.4	Principe de génération de résidu à base de modèles	11
1.5	Redondance physique	12
1.6	Architecture de redondance physique et analytique	13
1.7	Principe du diagnostic	14
1.8	Système en bon fonctionnement	15
1.9	Système en bon fonctionnement en présence de perturbation	15
1.10	Système en mauvais fonctionnement	15
1.11	Génération de résidus	17
1.12	La démarche FDI	19
1.13	Estimation de paramètres [Frank 1996]	22
1.14	Schéma fonctionnel d'un générateur de résidus à base observateur	23
1.15	Localisation de défauts actionneurs	24
1.16	Localisation de défauts capteurs	25
2.1	Principe de l'observateur	29
2.2	Principe de l'observateur à entrées inconnues	33
3.1	Schéma Block d'observateur à entrée inconnue avec découplage parfait	50
3.2	Exemple 1	55
3.3	Simulink utilisé pour la simulation d'exemple 1	59
3.4	Résidus r_1, r_2 avec perturbation, sans bruit de mesure et sans défaut	59
3.5	Résidus r_1, r_2 avec perturbation, bruit de mesure et sans défaut	59
3.6	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et bruit de mesure et défaut actionneur f_{AC1}	60
3.7	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut actionneur f_{AC2}	60
3.8	Exemple 2	61
3.9	Simulink utilisé pour la simulation d'exemple 2	65
3.10	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et sans défaut	66
3.11	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et bruit de mesure et sans défaut	66
3.12	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec bruit de mesure et avec défaut f_{CA}	66
3.13	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec bruit de mesure et avec défaut f_{CAP}	66
4.1	Schéma bloc de l'observateur UIO avec découplage approximatif	75
4.2	Résidus r_1, r_2 sans perturbation et sans défaut	80
4.3	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et sans défaut	80
4.4	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_1	80
4.5	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_2	81
4.6	Résidus r_1, r_2 sans perturbation et sans défaut	81
4.7	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et sans défaut	81
4.8	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_1	81

4.9	Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_2	82
5.1	Schématisation du système des 5 réservoirs	86
5.2	UIO (DOS) pour la détection de défauts d'actionneurs	95
5.3	La perturbation	96
5.4	Insensibilité des résidus à la perturbation	96
5.5	Résidus r_{11}, r_{12} en présence d'un défaut f_{AC1} sur le premier actionneur et en absence de bruits sur la mesure v_i (UIO ₁).	96
5.6	Résidus r_{11}, r_{12} en présence d'un défaut f_{AC2} sur le deuxième actionneur et en absence de bruits sur la mesure v_i (UIO ₁).	96
5.7	Résidus r_{11}, r_{12} en présence d'un défaut f_{AC1} sur le premier actionneur et en présence de bruits sur la mesure v_i (UIO ₁).	97
5.8	Résidus r_{11}, r_{12} en présence d'un défaut f_{AC2} sur le deuxième actionneur et en présence de bruits sur la mesure v_i (UIO ₁).	97
5.9	Résidu r_1 en présence du défaut actionneur f_{AC1} et f_{AC2} avec bruit de mesure v_i (le second observateur UIO ₂ du banc d'observateurs architectures DOS)	97
5.10	Résidu r_1 en présence du défaut actionneur f_{AC1} et f_{AC2} avec bruit de mesure v_i (le premier observateur UIO ₃ du banc d'observateurs architectures DOS)	97

Introduction générale

Les enjeux actuels de l'automatique sont essentiellement l'optimisation de performances et la surveillance des processus qui répondent respectivement aux demandes croissantes en termes de rendement, d'exploitation et de sécurité des installations et des opérateurs. Ces objectifs se traduisent par le besoin de loi de commande plus efficace et par l'intégration de modules de surveillance sophistiqués. L'un comme l'autre requiert la collecte d'une information précise et complète quant à l'état du processus à commander et à surveiller.

L'estimation d'état constitue un champ de recherche très vaste ayant de nombreuses applications. Parmi ces applications, on peut citer l'utilisation des observateurs d'état pour estimer les états non mesurables d'un système ou pour remplacer des capteurs coûteux ou difficile à maintenir ; ces observateurs sont utilisés pour la commande par retour d'état ou pour le diagnostic du système à partir d'un modèle affecté le plus souvent par des entrées inconnues. Les travaux développés dans le cadre de cette thématique concernent la surveillance et le diagnostic des systèmes à base de modèles dynamiques. La maîtrise des processus technologiques est très souvent rendue difficile en raison d'un nombre important de perturbations difficile à caractériser et à prévoir. En dépit de ces perturbations, les performances des procédures de diagnostic sont assurées en se portant sur l'utilisation d'observateurs à entrées inconnues.

Spécifiquement on s'est intéressé aux observateurs à entrées inconnues avec découplage parfait et à découplage approximatif, ce choix est justifiée par le fait qu'il soit massivement utilisé dans l'industrie en raison de la robustesse et de la souplesse d'utilisation. Les systèmes de diagnostic à base observateur sont les plus efficaces, c'est pourquoi ces technique de diagnostic à base modèle, développées fortement au cours des dernières années, semblent très prometteuses pour l'amélioration de la qualité de détection des défauts et de pouvoir les localiser et pour éviter les fausses alarmes. Pour garantir le fonctionnement sûr des systèmes, au niveau fonctionnel (local) et/ou comportemental (global), une étape essentielle est la mise en œuvre des fonctions de surveillance et de diagnostic fiables. L'enjeu est très important pour la surveillance des systèmes complexes critiques où le déterminisme des tâches de diagnostic et de contrôle de cohérence est une condition sine qua non.

La notion de "modèle" (implicite ou explicite) se trouve être naturellement la clef de voûte et l'étape primordiale dans la construction de stratégies de diagnostic à base de modèles. La démarche générale consiste à estimer, ou reconstruire, les variables internes et/ou externes dont la déviation en dehors d'une plage de référence est révélatrice de l'apparition d'un phénomène anormal. Le fonctionnement estimé est "comparé" avec un fonctionnement de référence attendu en l'absence de pannes. Cette comparaison peut être effectuée dans l'espace des sorties, ou dans l'espace décrivant l'état interne (état/paramètres) du système et peut être utilisé pour la détection et la localisation de défauts. Les signaux indicateurs sont ensuite structurés (si possible, en prenant en compte des contraintes structurelles de type rang) et traités par un test de décision de façon à fournir les indicateurs de diagnostic. On se rend compte que les observateurs dont le modèle de synthèse correspondant avec des conditions de fonctionnement sain étaient sensibles aux défauts mais il nous était impossible de régler la sensibilité des

observateurs aux défauts à cause de la présence des perturbations.

C'est pourquoi l'utilisation d'observateurs à entrées inconnues peut permettre la résolution de ce problème. Il est en effet possible de régler la sensibilité aux différents défauts et aux perturbations, en introduisant dans les équations de synthèse de l'observateur les matrices d'état des défauts et des perturbations. La prise de décision nécessite la comparaison des résidus à certains seuils obtenus de manière empirique ou théorique.

La robustesse par rapport aux erreurs de modélisation est donc le problème fondamental en diagnostic à base de modèle ; dont il faut déterminer la capacité d'une telle méthode à détecter des défauts avec peu de fausses alarmes (alarme en absence de défaut) du système.

Lorsque les conditions d'un découplage complet (parfait) ne sont pas satisfaites, le problème de génération des résidus robuste peut être formulé comme un problème d'optimisation qui consiste à minimiser la sensibilité des résidus par rapport aux entrées inconnues et maximiser cette sensibilité par rapports aux défauts.

Nous avons focalisé notre étude sur les défauts additifs qui apparaissent au niveau des actionneurs et des capteurs. L'observateur à entrées inconnues a été largement utilisé dans le diagnostic de pannes pour processus et installations industrielles. Pour résoudre le problème d'isolation des défauts de capteurs et d'actionneurs en s'appuyant sur des bancs d'observateurs.

Les travaux présentés dans ce mémoire proposent des techniques de génération de résidus robustes à base observateurs à entrées inconnues ; le but est de minimiser les fausses alarmes et d'identifier les défauts. Les algorithmes générés sont testés à partir des simulations obtenues sur des modèles académiques et d'un modèle d'application plus complexe d'un système hydraulique.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est décomposé en cinq chapitres, qui sont introduits brièvement dans le paragraphe suivant :

✦ **Chapitre 1** Le premier chapitre aborde quelques concepts généraux sur le diagnostic. Il sera notamment consacré aux concepts fondamentaux du diagnostic des systèmes à bases de modèles et aux différentes structures de génération de résidus. L'objectif se résume à définir quelques notions de base sur la détection et la localisation de défauts (le diagnostic), aussi bien du point de vue de la terminologie, que des principes fondamentaux sur lesquels il repose. Les principales approches à base modèle de détection seront énoncées.

✦ **Chapitre 2** Le deuxième chapitre traite la présentation théorique des méthodes de synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes linéaires et pour une classe de systèmes non linéaires. Après avoir rappelé les conditions nécessaires à la synthèse d'observateurs linéaires invariants et leur synthèse, nous présentons des méthodes de conception sous conditions d'observateurs de systèmes linéaires dont les entrées inconnues affectent les mesures ou dont les mesures sont indépendantes des entrées inconnues.

✦ **Chapitre 3** Le troisième chapitre est dédié à l'élaboration d'indicateur de défauts (résidu) au moyen d'observateur à entrées inconnues dans le cas de découplage parfait. Concernant cet observateur, un exemple illustratif d'un modèle académique de la littérature d'un système linéaire multi-variable MIMO est présenté au cours de ce chapitre ou la mise en œuvre de cette technique de génération de résidu robuste. L'utilisation d'observateurs permet ensuite de constituer une matrice de signatures expérimentales où la localisation des défauts peut alors être obtenue en comparant les signatures théoriques et expérimentales.

✦ **Chapitre 4** Le quatrième chapitre propose une nouvelle approche de génération de résidu robuste à base observateur à entrées inconnues basée sur l'idée principale de découplage approché optimal qui permet de résoudre le problème de découplage parfait. En effet, d'une manière ou d'une autre, le découplage parfait ne peut être mis en œuvre que si le nombre de mesures indépendantes est supérieur au nombre d'entrées inconnues indépendantes que l'on souhaite découpler ce qui n'est pas toujours possible. Pour illustrer cette approche, nous montrons, à travers un exemple académique, la méthode et la qualité de l'approximation et de minimisation de la sensibilité aux entrées inconnues en maximisent la sensibilité aux défauts.

✦ **Chapitre 5** L'objectif du cinquième est d'illustrer, à travers un système non linéaire "Processus Hydraulique", la mise en œuvre des techniques de génération des résidus robustes à la présence des entrées inconnues. Le diagnostic de fonctionnements à base des observateurs présentés au cours des chapitres précédents. Ce chapitre permet donc d'évaluer les performances de l'approche proposée de la phase modélisation jusqu'à la phase de mise en œuvre d'une stratégie de diagnostic à base d'observateur à entrées inconnues. La méthode de localisation est basée sur la génération préalable d'une matrice de signatures théoriques des défauts à détecter.

Cette thèse s'achève par une conclusion générale réalisant le bilan de ce travail et évoquant quelques perspectives complémentaires.

Etat de l'art sur le diagnostic à base modèle

Sommaire

1.1	Introduction	5
1.2	Définitions générales	6
1.3	Classification de défaut	9
1.3.1	Emplacement	9
1.3.2	Modélisation	10
1.3.3	Caractéristiques temporelles	10
1.4	Principe de la surveillance	10
1.5	Surveillance utilisant les modèles	11
1.5.1	Redondance physique (matérielle)	12
1.5.2	Redondance analytique (équations différentielles et matrices de transfert)	12
1.6	Détection et isolation des défauts (FDI)	13
1.7	Principe du diagnostic	14
1.7.1	Architecture de diagnostic	14
1.8	Performance d'une procédure de diagnostic	16
1.9	Génération de résidus à base modèles	17
1.9.1	Obtention des tables de signatures	18
1.10	Méthodes de diagnostic à base modèle	18
1.10.1	Approches par les espaces de parité	19
1.10.2	Approches par l'estimation de paramètres	20
1.10.3	Approches à base d'observateurs d'états	22
1.11	Structuration des résidus par un banc d'observateurs	23
1.11.1	Les défauts actionneurs	24
1.11.2	Les défauts capteurs	24
1.12	Les avantages des méthodes de diagnostic à base de modèles	25
1.13	Conclusion	26

1.1 Introduction

C'est une évidence de constater que la commande des systèmes devient de plus en plus complexe, cela est dû à la nature des systèmes, mais aussi à la volonté de contrôler tous les paramètres et toutes les perturbations affectants le système. Dans cette dynamique s'est développée la discipline de la sûreté de fonctionnement. Pour un grand nombre d'applications, il est

nécessaire d'implanter un système de surveillance au niveau des organes de conduite (actionneur, capteur d'instrumentation) afin de détecter, isoler et identifier tout dysfonctionnement.

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom FDI (Fault Detection and isolation). Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible. En effet, de nombreux chercheurs ont approfondi leurs travaux dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

En raison de l'intérêt croissant suscité dans le monde industriel, le diagnostic, né au début des années 1970 [Willsky 1976], est devenu peu à peu un thème de recherche à part entière par l'intérêt croissant tant au niveau du monde industriel que de la recherche scientifique. A l'origine, il se limitait aux applications industrielles à haut niveau de risque pour la communauté comme le nucléaire ou l'aéronautique [Potter 1977], [Daly 1979], [Desai 1979], ainsi qu'aux secteurs d'activité de pointe tels que l'industrie de l'armement ou l'aérospatial [Desai 1976], [Deckert 1998]. En outre, le diagnostic est impliqué dans nombreux domaines industriels de très haute performance, tels que l'aviation, l'aérospatiale, la marine, l'automobile, le ferroviaire où la sécurité, les performances, la productivité, le respect du matériel sont indispensables.

En revanche, le diagnostic fait objet de plusieurs travaux tel que [Deckert 1998], [Chen 1999], [Patton 2000], [Maquin 2000], [Chiang 2001], [Blanke 2003] et [Isermann 2006].

D'autre part la classification des approches à base modèles et celles relatives à l'estimation paramétrique ou d'état a été traité par [Willsky 1976] et [Isermann 1984].

Nous proposons dans ce chapitre de faire un état de l'art sur le diagnostic des défauts. L'importance se portera fondamentalement sur le problème de détection et d'isolation des défauts. Il est question dans un premier temps, de donner les différents concepts et notions rencontrés dans le domaine du diagnostic des défauts, car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base de diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine.

D'autre part, nous insisterons sur la procédure générale de détection et d'isolation des défauts par les méthodes à base de modèle mathématique. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur résidu.

1.2 Définitions générales

Avant d'aller plus loin, il semble intéressant de rappeler les principales terminologies propres (une défaillance, une panne, un état de fonctionnement normal, ..., termes) utilisées en diagnostic des systèmes auxquels nous aurons souvent recours dans la suite. Reposant principalement sur le travail effectué par [Milne 1987] et [Ploix 1998], ainsi que sur l'étude d'ouvrages synthétiques tels que [Brunet 1990], [Zwingelstein 1995], [Cassar 1996], [Ripoll 1999].

– Diagnostic

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Habituellement, le diagnostic est exprimé par les états des composants [Reiter 1987] ou les états des relations de description du comportement [Cassar 1994] donc le diagnostic est la détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut (fonction qui suit la détection et inclut les fonctions de localisation et d'identification).

– **Fonctionnement normal d'un système**

Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales. Le système est dit défaillant dans le cas contraire [Toscano 2011].

– **Défaut**

On appelle un défaut une déviation non permise d'au moins une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normales de fonctionnement. Un défaut est l'écart entre la caractéristique observée et la caractéristique théorique. En absence défaut cet écart est idéalement nul. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs et au niveau du processus. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut. Il est donc clair qu'une défaillance conduit à un défaut. Mais un défaut n'induit pas nécessairement une défaillance. En effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impacts sur cette tâche. L'art du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance de panne.

– **Défaillance**

Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique [Ploix 1998], c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées. Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnostic.

– **Panne**

La panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir la fonction nécessaire. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance. Dans le cadre de maintenance préventive conditionnelle, il est clair que le diagnostic doit permettre de détecter et de localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance ou à une panne qui entraînerait l'arrêt du système [Toscano 2011].

– **Dysfonctionnement**

Exécution d'une fonction du système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou est délivré de manière incomplète.

– **Perturbation**

C'est un signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale.

– **Sensibilité**

Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter. Ces défauts sont généralement caractérisés par une certaine amplitude.

– **Résidu**

Souvent, lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence. Alors le résidu indicateur de défaut basé

sur la déviation entre les mesures et les calculs basés sur un modèle. Un résidu ou un indicateur de défaut exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle. C'est sur la base de sa valeur que la décision de détection est prise ou pas. Un résidu nul implique un fonctionnement normal. En pratique, le résidu est conçu afin d'être nul en moyenne dans un cas de bon fonctionnement. Ses dispersions autour de zéro sont des "restes", des résidus liés aux bruits. En revanche dans un cas avec défaut, le résidu s'éloigne de sa valeur moyenne nulle et permet d'indiquer la présence d'un défaut [Oumayma 2012].

– **Symptôme**

C'est un changement d'une quantité observable par rapport à un comportement normal.

– **Détection de défauts**

La détection de défaut consiste à la détermination de la présence de défauts et de l'instant d'occurrence de ces défauts.

– **Localisation de défauts**

Il s'agit de la détermination du type, de la localisation et de la date d'un défaut détecté. Consiste à remonter d'un ensemble de symptômes à un ensemble de composants défaillants.

– **Identification de défauts**

L'identification est la détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut (fonction qui suit la localisation), il s'agit de déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

– **La robustesse**

Elle détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport à toutes les entrées inconnues. En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les coûts économiques vont conditionner la stratégie de diagnostic [Gertler 1988].

– **Surveillance**

Ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sein de modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Consiste en l'enregistrement de l'information ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication de comportements anormaux. La surveillance de la majeure partie des procédés industriels se limite à des systèmes de traitement d'alarmes. Des valeurs limites sont définies sur des variables clés par des experts du procédé selon des critères de sécurité concernant les hommes, l'installation et son environnement. Les mesures au-delà de ces valeurs limites déclenchent des alarmes. Un système de traitement d'alarmes est donc l'outil de base pour aider l'opérateur dans sa tâche de surveillance. Il reste cependant aux opérateurs à analyser la situation et à prendre une décision adaptée : actions correctives, conduite en mode dégradé, activation d'une procédure d'arrêt d'urgence. L'efficacité de l'opérateur est primordiale que ce soit du point de vue économie ou sécurité. De nombreux facteurs influencent sa performance à répondre à une alarme : le nombre et la fréquence des alarmes, la présentation et la complexité de l'information, son expérience et son entraînement, sa vigilance et sa réaction au stress.

– **Supervision**

Représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriés en vue de maintenir son opération face à des défaillances [Balluchi 2002].

1.3 Classification de défaut

Les défauts affectent un système, ils sont classés selon leur emplacement, leur modélisation, leurs caractéristiques temporelles [Staroswiecki 2001], [Blanke 2003].

1.3.1 Emplacement

Les défauts apparaissent dans les différentes parties d'un système, ils sont classés selon leur emplacement en trois catégories, comme représenté sur la figure 1.1.

– Les défauts capteurs

Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer.

– Les défauts actionneurs

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent une perte totale (défaillance) ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. Un exemple de perte totale d'un actionneur est un actionneur qui est resté "collé" sur une position entraînant une incapacité à commander le système par le biais de cet actionneur. Les défauts actionneurs partiels sont des actionneurs réagissant de manière similaire au régime nominal mais en partie seulement, c'est-à-dire avec une certaine dégradation dans leur action sur le système. (Perte de puissance d'un moteur, fuite dans un vérin, ...).

– Les défauts composants ou systèmes

Ce type de défaut provient du système lui-même ; bien souvent les défauts n'appartenant pas à un défaut capteur ou actionneur sont classés de manière arbitraire dans cette catégorie. Néanmoins, un défaut composant résulte de la casse ou de l'altération d'un composant du système réduisant les capacités de celui-ci à effectuer une tâche. En pratique, ceci revient à considérer une modification des caractéristiques du système proprement dit. (La CTN : résistance à Coefficient de Température Négatif, d'une chaufferie est cassée, un roulement est altéré, ...).

– Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande

Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.

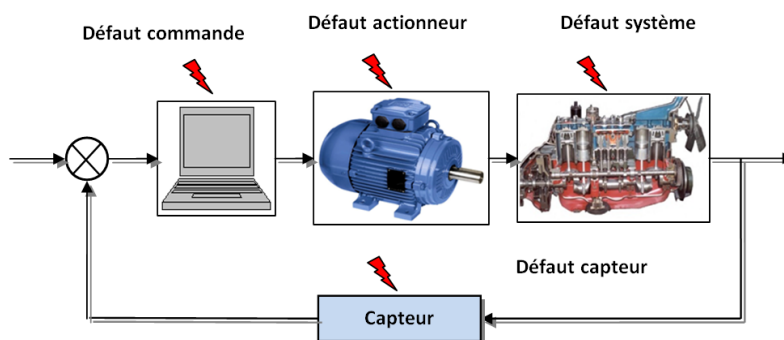


FIGURE 1.1 – Défauts d'un processus physique

1.3.2 Modélisation

En plus, suivant la manière dont les défauts sont modélisés, ils sont classés en additif et multiplicatif, comme représenté sur la figure 1.2

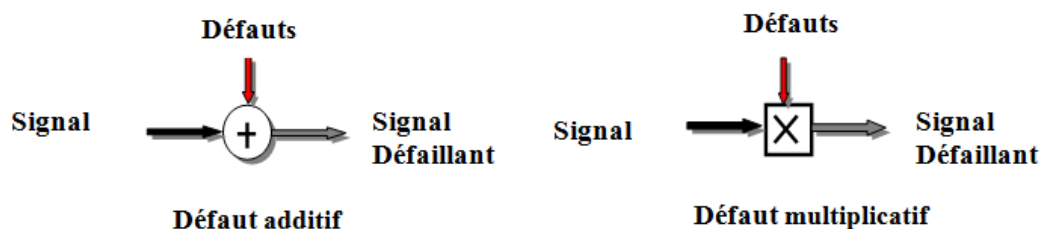


FIGURE 1.2 – Les défauts selon leur représentation

1.3.3 Caractéristiques temporelles

Les défauts sont classés également selon leurs caractéristiques temporelles (voir la figure 1.3) comme brusque, progressif et intermittent. Les défauts brusques (biais) se produisent instantanément souvent à cause de dommages matériels. Habituellement ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé. Les défauts progressifs (dérives) représentent les changements lents des valeurs paramétriques. Souvent dus au vieillissement, ils sont plus difficiles à détecter en raison de leur dynamique lente, mais sont également moins graves. Les défauts intermittents (valeurs aberrantes) sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé [Merahi 2010].

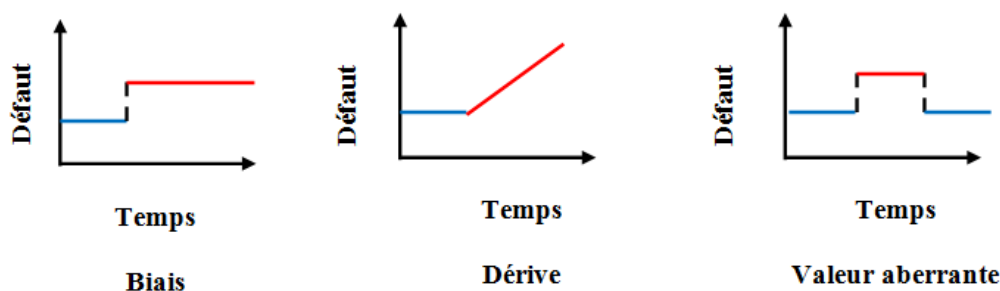


FIGURE 1.3 – Répartition des défauts selon le comportement temporel

1.4 Principe de la surveillance

Un système de surveillance doit permettre de caractériser le mode de fonctionnement d'un système en enregistrant des informations, en reconnaissant et en indiquant les anomalies de comportement. Cette surveillance peut être réalisée en cours exploitation ou hors exploitation et chaque mode présente chacun un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Système de surveillance doit réaliser les trois tâches suivantes :

- ❖ La détection : qui consiste à prendre une décision binaire : soit le système fonctionne correctement, soit une panne s'est produite. Le cas échéant, la procédure doit déterminer l'instant d'occurrence du défaut ayant provoqué la panne.
- ❖ La localisation : qui consiste à déterminer le composant défectueux.
- ❖ L'identification : qui consiste à déterminer le type de la panne en vue de déterminer le type de maintenance ou de correction (accommodation, reconfiguration) à réaliser sur l'installation. Cette étape nécessite souvent la connaissance d'un modèle de la panne.

Beaucoup de systèmes de surveillance n'implémentent que les deux premières tâches. L'identification d'une panne n'est réalisée que lorsqu'une action de reconfiguration de la commande ou des objectifs à atteindre est envisagée. Lorsqu'un algorithme de surveillance ne comporte que ces deux tâches, il est qualifié d'algorithme de FDI (Fault Detection and Isolation).

1.5 Surveillance utilisant les modèles

L'utilisation des modèles pour la surveillance des systèmes date du début des années 70. Depuis, de nombreux articles font régulièrement le point sur l'avancement des différentes approches [Patton 1997], [Jianga 2002] et [Kimmich 2005]. La figure 1.4 illustre le concept général d'un système de diagnostic utilisant un modèle. Ces méthodes reposent sur l'étude de signaux appelés résidus [Akhenak 2004].

Définition. 1.5.1 : *Un résidu est un signal potentiellement indicateur de défauts. Il reflète la cohérence des données vis-à-vis du modèle comportemental du système. Les méthodes de surveillance à base de modèle utilisent la redondance d'information présente sur un système. Deux types de redondance peuvent être distingués : la redondance matérielle et la redondance analytique.*

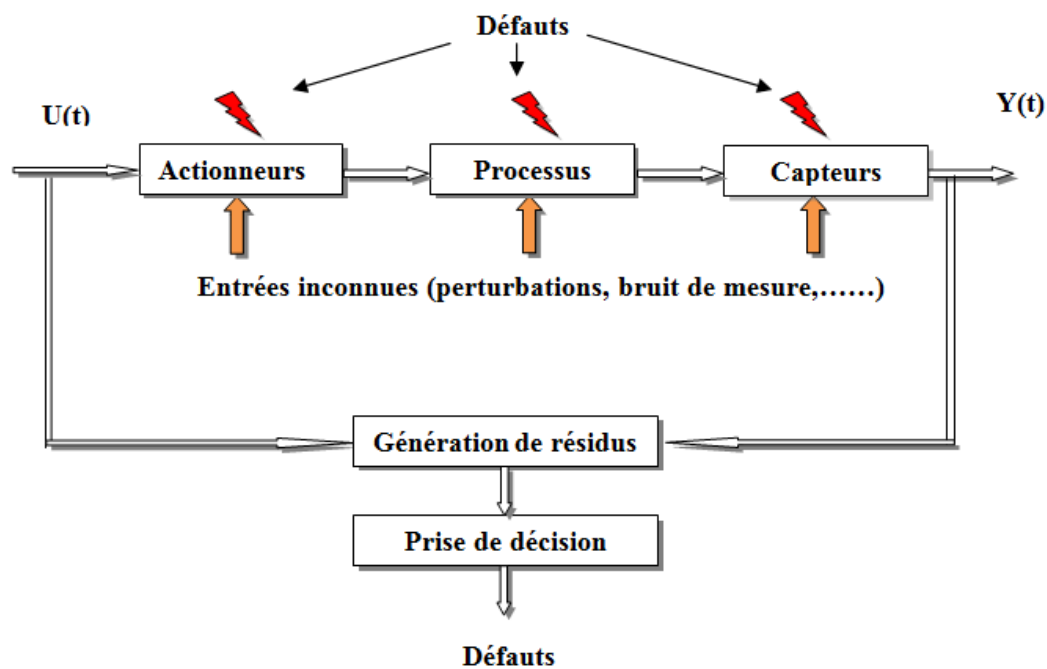


FIGURE 1.4 – Principe de génération de résidu à base de modèles

1.5.1 Redondance physique (matérielle)

Le moyen le plus direct pour obtenir une information fiable sur une même variable est de disposer de plusieurs capteurs la mesurant simultanément. Une redondance à trois permettra notamment d'isoler un capteur défaillant. La redondance physique souffre d'un désavantage majeur : doubler ou tripler le nombre de capteurs revient à augmenter considérablement son coût et à affronter des problèmes d'encombrement liées à l'installation et à la maintenance de ces capteurs (voir figure 1.5).

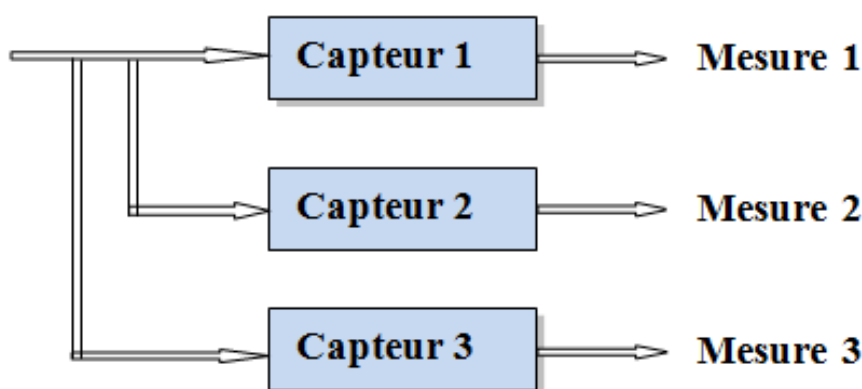


FIGURE 1.5 – Redondance physique

L'ajout de capteurs supplémentaires permettra aussi d'avoir des informations additionnelles à mettre à profit dans le cadre de la redondance analytique.

Un ensemble de capteurs similaires surveillent simultanément une même pièce. Tant que les valeurs délivrées par ces capteurs restent égales entre elles, l'information est considérée comme fiable car il est très improbable que tous les capteurs fassent la même erreur de mesure au même instant. Si une de ces valeurs s'écarte significativement des autres, c'est qu'un problème est apparu, non pas sur la pièce surveillée mais sur le capteur qui délivre cette valeur aberrante. Cette technique est très fiable mais également très chère, car il faut prévoir plusieurs capteurs pour chacun des éléments à surveiller.

1.5.2 Redondance analytique (équations différentielles et matrices de transfert)

Dans ce cas, un élément n'est surveillé que par un seul capteur, mais lorsque l'on détecte un problème sur le couple élément / capteur, on ne peut pas savoir lequel des deux est en cause. Néanmoins, pour un système comportant plusieurs éléments, des relations mathématiques existent entre les différentes informations relevées. L'analyse de la globalité de ces informations par des algorithmes spécifiques permet de préciser, lorsqu'un problème est détecté, si ce problème provient de la pièce en elle-même ou du capteur qui la surveille. Cette technique est légèrement moins fiable que la redondance matérielle. Néanmoins, elle est nettement plus avantageuse aussi bien au niveau financier qu'au niveau de l'espace occupé, car chaque élément à surveiller ne nécessite qu'un seul capteur.

Les informations fournies par redondance matérielle, redondance analytique, voire simultanément par ces deux biais, doivent être traitées puis analysées pour pouvoir caractériser l'endommagement d'une pièce. C'est cette fonction que remplit le système de supervision, (généralement un système informatique dédié), qui joue également le rôle d'interface en présentant les résultats de ce traitement sous une forme facilement compréhensible par un opérateur humain.

Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle [Frank 1994], [Maquin 2000]. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision [Fellouah 2007].

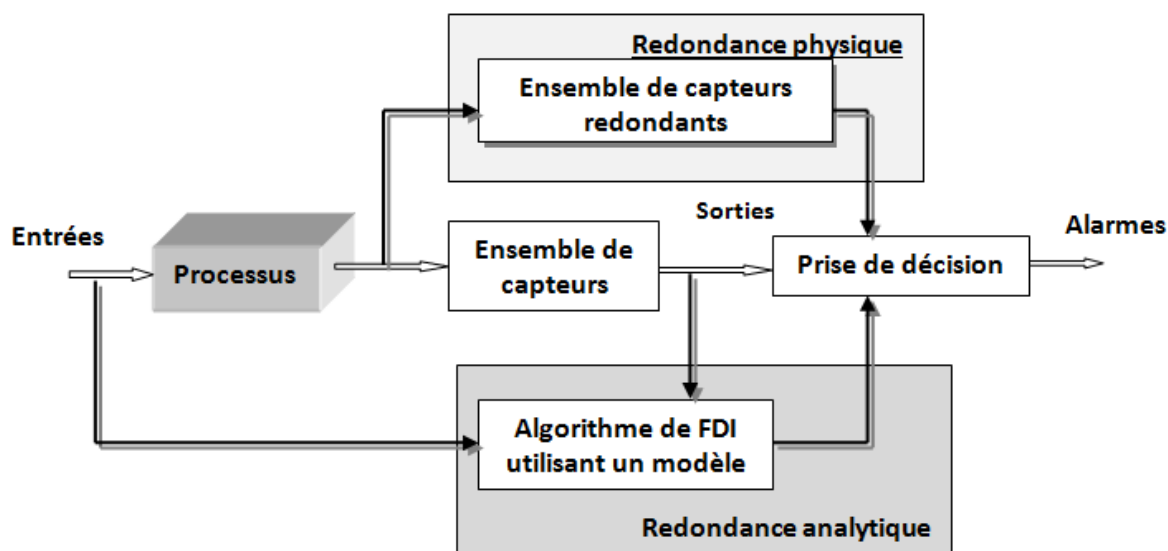


FIGURE 1.6 – Architecture de redondance physique et analytique

1.6 Détection et isolation des défauts (FDI)

Dans le contexte de l'algorithme de détection et d'isolation des défauts FDI un rôle très important. Le problème de la détection et de localisation des défauts dans les procédés industriels intéressent de plus en plus de chercheurs et a fait l'objet de très nombreux résultats et travaux de recherche [Patton 1989], [Ragot 2005], [Isermann 2007], [Chen 1999], [Ragot 2000], [Blanke 2003] et [Akhénak 2004]. Ces développements ont non seulement concerné la formalisation théorique des problèmes rencontrés et leur résolution mais également la mise en œuvre pratique sur des processus réels. En se basant sur les méthodes de FDI à base modèles. Ces méthodes s'appuient sur la comparaison du comportement observé et du comportement prédit par un modèle du système. Ils sont généralement constitués de deux étapes : génération de résidus et évaluation des résidus grâce à un système de décision [Isermann 2007], [Chen 1999] et [Blanke 2003] (voir figure 1.6).

Le rôle de ce système de décision est de déterminer si le résidu est significatif pour décider de l'existence d'un défaut.

1.7 Principe du diagnostic

Le diagnostic détermine comment une faute affecte les sorties du processus. Dans l'approche FDI décrite auparavant, la détection d'erreur et le diagnostic de faute(s) regroupent trois étapes :

- ① détecter l'existence d'une erreur.
- ② localiser la faute.
- ③ caractériser l'amplitude de la faute (identifier)

L'étape de détection et de localisation sont toujours mis en œuvre en surveillance. La localisation est introduite lorsqu'aucune décision d'action sur la commande n'est requise. La localisation et l'identification constituent le diagnostic de fautes. La combinaison des trois fonctions présentées est définie par la stratégie de surveillance ou de supervision mis en œuvre. L'algorithme de diagnostic doit être : insensible aux perturbations, rejeter les bruits, robuste par rapport aux erreurs de modélisation, et sensible par rapport aux défauts (Voir figure 1.7) [Charbonnaud 2004].

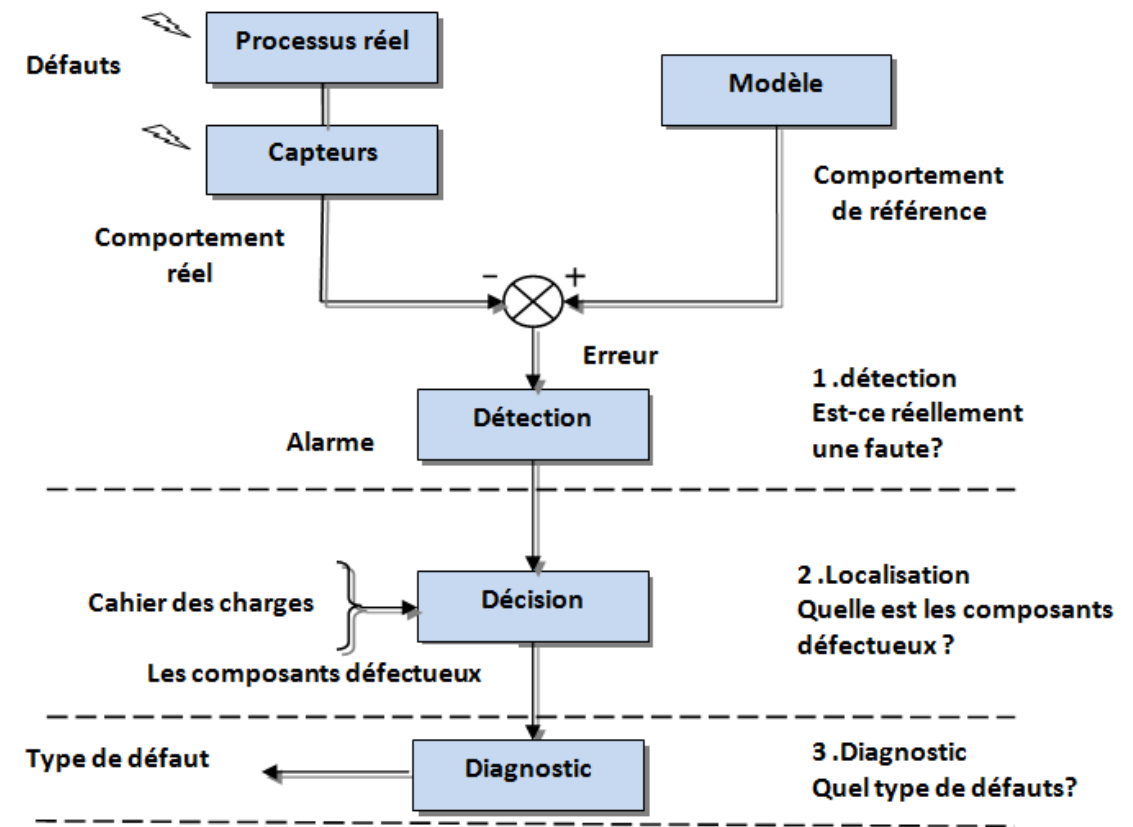


FIGURE 1.7 – Principe du diagnostic

1.7.1 Architecture de diagnostic

Le diagnostic de défauts s'effectue habituellement en combinant un générateur de résidus avec une stratégie d'analyse afin de fournir un ensemble de décisions booléennes sur la présence de défauts, comme illustré en figures 1.8, 1.9 et 1.10.

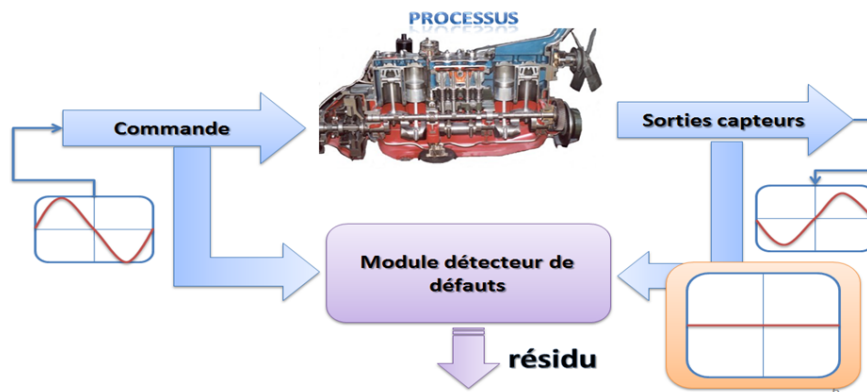


FIGURE 1.8 – Système en bon fonctionnement

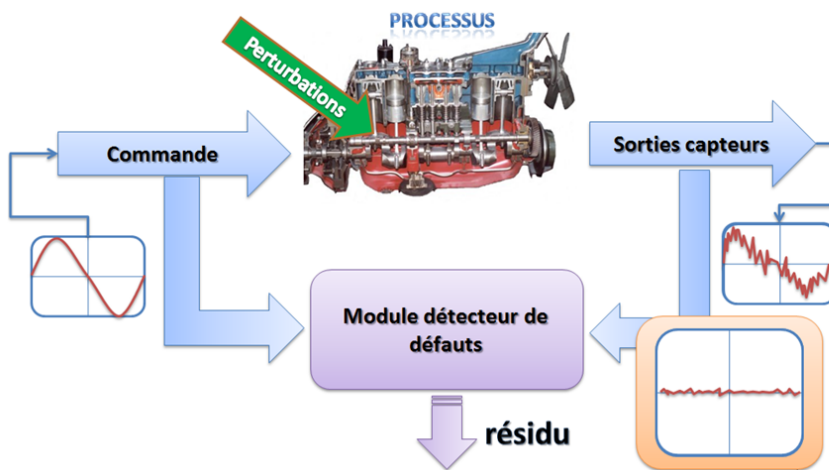


FIGURE 1.9 – Système en bon fonctionnement en présence de perturbation

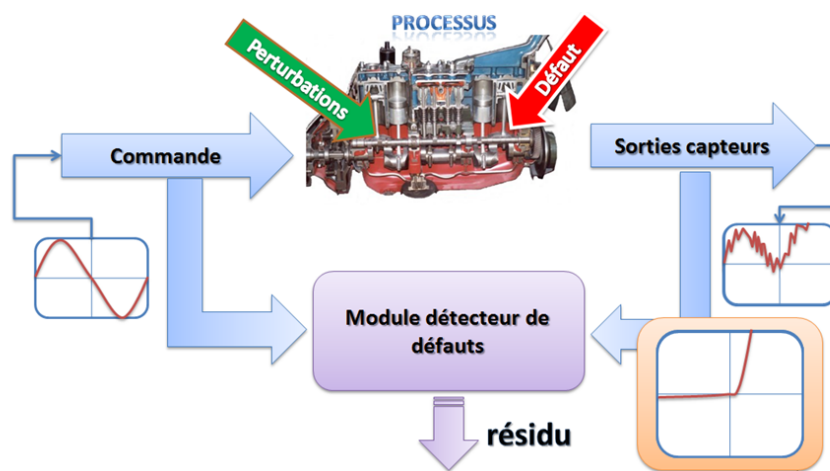


FIGURE 1.10 – Système en mauvais fonctionnement

L'étape de génération des résidus utilise un modèle du système, dans lequel sont injectées les entrées de commande envoyées aux actionneurs et les mesures des sorties provenant des capteurs, pour prédire son comportement attendu et le comparer à la réalité. L'objectif est de fournir un ensemble d'indicateurs quantitatifs de la présence de défauts, les résidus.

La valeur moyenne des résidus doit être proche de zéro en fonctionnement normal, et s'en écarter lorsque qu'apparaissent les défauts auxquels ceux-ci ont été rendus sensibles.

Chaque résidu peut être sensible à un seul défaut, à tous les défauts, ou à un nombre intermédiaire. Ainsi, l'étape finale du processus est une logique de décision qui transforme les fonctions de décision obtenues précédemment en une estimée de la localisation des défauts [Marzat 2011].

1.8 Performance d'une procédure de diagnostic

Comment s'assurer que le système de diagnostic développé soit le plus performant possible ? Pour répondre à une telle question, il convient tout d'abord de définir en vertu de quels critères le système peut être évalué. D'une manière générale, nous pouvons regrouper les différents critères de performance du système de détection de la manière suivante [Ripoll 1999] :

- Détectabilité.
- Isolabilité.
- Sensibilité.
- Robustesse.
- Coût économique.
- Temps de développement.

La notion de **détectabilité** est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'une défaillance sur le procédé. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (résidus) : le générateur de résidu doit, d'une certaine manière, être sensible à la défaillance que l'on souhaite détecter.

L'isolabilité est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une alarme engendre bien souvent de nouvelles alarmes et il devient dès lors difficile de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la structure des résidus et à la procédure de détection elle-même.

La sensibilité caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport de l'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut.

La robustesse détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport à toutes les entrées inconnues. En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les **coûts économiques** vont conditionner la stratégie de diagnostic : le système nécessite-t-il des composants trop chers pour sa conception, **le temps de développement** est-il trop important ? Autant de points à vérifier afin de satisfaire le cahier des charges [Merahi 2010].

1.9 Génération de résidus à base modèles

La première étape d'un système de surveillance à base de modèle consiste à générer des indicateurs de défauts. Ils contiennent des informations sur les anomalies ou dysfonctionnements du système à surveiller. Le principe est de mesurer l'écart entre les mesures des signaux du procédé, et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal. La génération de résidus est un problème crucial pour les systèmes de diagnostic. En effet, c'est de la structure des résidus engendré que dépendra la robustesse de la localisation.

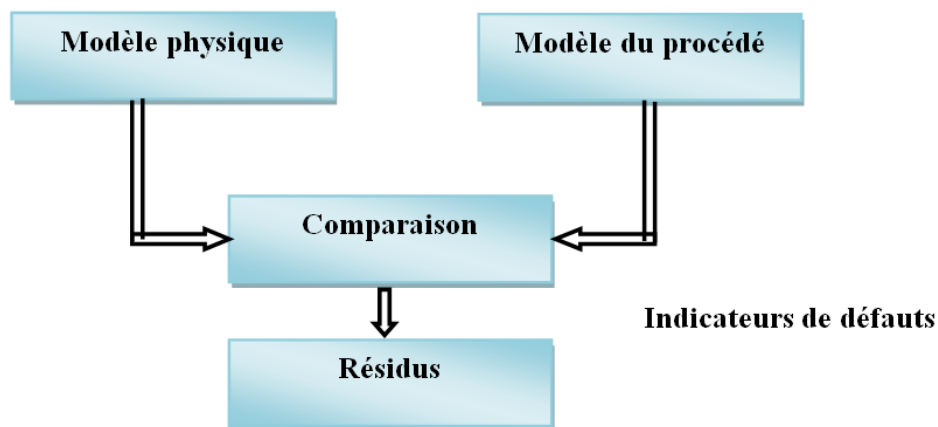


FIGURE 1.11 – Génération de résidus

De façon générale, on forme tout d'abord des résidus de "base" qui dépendent a priori de tous les défauts. Notons ces résidus :

$$r_i = f(f_1, f_2, \dots, f_p) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.1)$$

où f_i est un défaut ou une perturbation indésirable. Il y a plus de résidus que de défauts à détecter ($n \geq p$). Puis on forme, par agrégation, des résidus "secondaires" de façon à faire disparaître l'influence du défaut f_i dans le nouveau résidu. On aboutit ainsi à deux types de résidus [Merahi 2010] :

- **Des résidus structurés.** [Gertler 1993] En réponse à un défaut particulier, seul un ensemble spécifique de résidus sera affecté. Par exemple, un défaut f_i agira sur tous les résidus sauf sur le i ème. Parmi les résidus structurés, on distingue les résidus dédiés et les résidus généralisés.
- **les résidus généralisés** : le résidu r_i dépend de tous les défauts sauf le i ème (Table 1.1).
- **les résidus dédiés** le résidu r_i est sensible à l'unique défaut f_i (Table 1.2).
- **Des résidus de directions privilégiées.** En présence d'un type particulier de défaut, une seule direction du vecteur résidu sera alors affectée (et non pas un plan comme pour les résidus structurés).

1.9.1 Obtention des tables de signatures

Pour aboutir aux tables de signatures précédentes, il y a plusieurs manières de procéder. L'objectif, quelle que soit la table de signature considérée, est de construire un certain nombre de résidus, chacun réagissant (signature élémentaire égale à 1) à un sous ensemble particulier de défauts (détection) et étant découplé (signature élémentaire égale à 0) des autres défauts, ainsi que des incertitudes de modélisation (robustesse) [Stephane 2006].

Résidus	Défaut		
	f_1	f_2	f_3
r_1	0	1	1
r_2	1	0	1
r_3	1	1	0

TABLE 1.1 – Résidus généralise

Résidus	Défaut		
	f_1	f_2	f_3
r_1	1	0	0
r_2	0	1	0
r_3	0	0	1

TABLE 1.2 – Résidus dédiés

1.10 Méthodes de diagnostic à base modèle

En général les méthodes de détection et diagnostic sont classifiées de la façon suivante :

- Les méthodes à base de modèles quantitatifs telles que la redondance analytique [Chow 1984], [Frank 1990], l'espace de parité [Gertler 1990], l'estimation d'état [Willisky 1976] ou l'utilisation de filtre [Chen 1999], [Venkatasubramanian 2003].
- les méthodes à base de modèles qualitatifs telles les bond graphs [Samantaray 2006] et les graphes bipartis [Blanke 2006]. Les performances de ces méthodes dépendent fortement du modèle utilisé. Deux types de modèles peuvent être utilisés : les modèles qualitatifs, déduits d'une abstraction graphique (bond graph, graphes causaux, ou biparti) [Samantaray 2008], [Blanke 2006] ou d'une base de connaissance (logique floue par exemple [Hissel 2007]) du système physique et les modèles quantitatifs (sous forme analytique). Une fois le modèle généré, les indicateurs de défaillances peuvent être déduits à partir du modèle mathématique en mode défaillant et normal sans aucun apprentissage [Touati 2012].
- Les méthodes de diagnostic des défauts utilisées dans le milieu industriel sont très variées. Leur principe général repose sur une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance [Combacau 1991]. Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Fault Detection and Identification) et les méthodes qualitatives issues des communautés IA et SED. Dans la suite, nous proposons une classification des approches à base de modèles [Zwingelstein 1995]. Nous référons le lecteur aux travaux suivants pour avoir plus de détails : [Willisky 1976], [Isermann 1984], [Stephane 1988], [Combacau 1991], [Zemouri 2003] [Chow 1984], [Patton 1989], [Frank 1990], [Isermann 1997], [Maquin 1997] et [Gertler 1998], alors que [Isermann 2006] a fait le point sur les applications industrielles de cette approche.

Ces méthodes reposent sur une comparaison du comportement du système avec le comportement du modèle quantitatif (mathématique) établi [Combacau 2000].

On peut distinguer les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Fault Detection and Isolation). Cette approche fait intervenir les techniques de génération de résidus, de détection et de localisation. Cette approche est schématisée sur la figure 1.12.

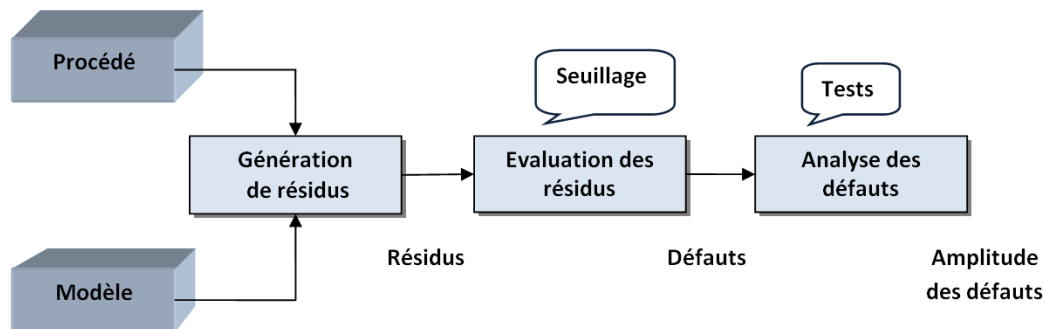


FIGURE 1.12 – La démarche FDI

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état en utilisant des modèles mathématiques du système décrivant le comportement du système. Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors détectée. A ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connues, afin d'isoler et d'identifier la défaillance. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous trouvons principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique. Frank et Sing [Ding 1994] a distingué trois approches pour la génération de résidus :

- Les approches par les espaces de parité.
- Les approches par l'estimation de paramètres.
- Les approches à base d'observateurs d'états.

Dans notre cas nous sommes intéressés aux méthodes à base observateur.

1.10.1 Approches par les espaces de parité

L'espace de parité est l'une des approches classiques qui utilisent l'algèbre comme outil pour but de générer le résidu, l'ensemble de ces valeurs que peuvent prendre les résidus compose un espace de parité. Pour la détection de défauts basée sur l'utilisation de modèle un résidu est un signal temporel en fonction des entrées et des sorties du processus indépendamment le plus possible. A l'absence de défaut ce résidu est statistiquement nul, lors de l'apparition d'un défaut son amplitude évolue de manière significative. En absence de défaut le résidu ne reflète que l'action des bruits aléatoires et centrés. Si un défaut affecte le système et si sa direction n'est colinéaire à celle de l'écart alors son influence se traduira par un changement de la moyenne du résidu [Toscano 2011].

L'équivalence fondamentale entre relation de parité et d'observateur a été établie et démontrée dans [Gertler 1990]. D'autres résultats, certains partiels, d'autres complémentaires, ont été obtenus par [Viswanadham 1987], [Frank 1990], [Magni 1992], [Ding 2008] et autres. Le lien évident entre relation de parité et estimation paramétrique a été souligné dans [Gertler 1995] et [Gertler 1997], également confirmé par d'autres chercheurs, comprenant [Gertler 1995] et sous

une forme peu limitée [Delmaire 1994].

Les équations du modèle sont projetées dans un espace particulier appelé espace de parité, permettant ainsi d'éliminer les inconnues à l'aide de redondances ([Chow 1980], [Chow 1984], [Patton 1991], [Lou 1986], [Potter 1977], [Ragot 1996] et [Ragot 1998]).

Les équations projetées ne font intervenir que des variables mesurables (les entrées et les sorties du système) sur une fenêtre d'estimation. Ces équations s'appellent des relations de redondance analytique (RRA).

L'idée est de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs estimées données par le modèle (on parle de consistance des mesures, de leur parité).

Considérons un modèle général d'équations de mesure :

$$y(k) = Cx(k) + e(k) + Fd(k) \quad (1.2)$$

avec $x \in \mathbb{R}^n$, $y \in \mathbb{R}^m$, $d \in \mathbb{R}^p$, $e \in \mathbb{R}^m$, $C \in \mathbb{R}^{mn}$, $F \in \mathbb{R}^{mp}$

où $y(k)$ est le vecteur des mesures, $x(k)$ le vecteur des variables à mesurer, $d(k)$ le vecteur des défaillances, $e(k)$ le vecteur des bruits de mesure. C est une matrice caractérisant le système de mesure et F est la matrice qui traduit la direction des défaillances.

Le vecteur parité $p(k)$ est défini par projection du vecteur des mesures $y(k)$:

$$p(k) = Wy(k) \quad (1.3)$$

où W est la matrice de projection.

La propriété d'orthogonalité de cette matrice avec la matrice C entraîne :

$$p(k) = We(k) + WFd(k) \quad (1.4)$$

Le vecteur parité est ici la somme de deux composantes. Le premier terme $We(k)$ apporte une contribution aléatoire de statistique (connue si celle du bruit $e(k)$ est connue). Le second terme $WFd(k)$ est une composante déterministe dont la direction est fixée par le rang du capteur en défaut, et l'amplitude est fonction de celle de la défaillance du capteur. En l'absence d'erreurs de mesure $e(k)$ et de défaillances $d(k)$, le vecteur parité est nul. L'ensemble des redondances entre les mesures se traduit par :

$$Wy(k) = 0 \quad (1.5)$$

Il est bien évident que la matrice W ne pourra pas découpler parfaitement les entrées inconnues. Elle doit faire l'objet de travaux d'observabilité.

1.10.2 Approches par l'estimation de paramètres

Dans le domaine de diagnostic par estimation paramétrique, de considérables travaux ont été réalisés par [Isermann 1984], [Isermann 1991]. D'autres contributeurs [Stephane 1988] ont apporté une importante contribution, dans ce domaine, concernant le diagnostic de petits défauts paramétriques par l'analyse statistique des résidus obtenus à partir de séries élargies d'observations. [Isermann 2006] fournit un aperçu assez complet des approches récentes sur l'estimation paramétrique pour le diagnostic des processus.

Les méthodes d'estimation paramétriques ont pour principe d'estimer les paramètres du modèle. On entend par paramètre les constantes physiques du système (masse, coefficient de

viscosité,...) ou une agrégation de plusieurs paramètres physiques. Pour ce dernier cas, une correspondance unique doit exister entre les paramètres du modèle et les paramètres du système. Les premières applications sont l'œuvre de Isermann [Isermann 1991], [Isermann 1993].

Isermann décrit la procédure générale pour la détection des défaillances en cinq étapes [Isermann 1984] :

- Modélisation mathématique du procédé selon des équations du type :

$$y(t) = f(u(t), \theta) \quad (1.6)$$

dans lesquelles $u(t)$ représente les commandes du système et θ les paramètres du modèle.

- description des relations entre les constantes physiques p supposées connues et les paramètres du modèle θ :

$$\theta = g(p) \quad (1.7)$$

- estimation $\hat{\theta}$ des paramètres du modèle à partir de l'équation (1.7) et des mesures des entrées et des sorties du système :

$$\hat{\theta} = h(y(1), \dots, y(t), u(1), \dots, u(t)) \quad (1.8)$$

- estimation \hat{p} des paramètres du système à partir de l'équation (1.7) :

$$\hat{p} = g^{-1}(\hat{\theta}(t)) \quad (1.9)$$

- théorie de la décision pour détection d'une défaillance ou non, en prenant en compte les aspects non déterministes (bruits de capteurs ou erreurs de modélisation). Le vecteur résidu est obtenu en faisant la différence entre les paramètres estimés et les valeurs nominales, soit à partir des paramètres physiques, soit à partir des paramètres du modèle :

$$r(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t) \quad (1.10)$$

Ou

$$r(t) = p(t) - \hat{p}(t) \quad (1.11)$$

Pour des valeurs nominales non connues, une approche consiste à construire le vecteur résidu à partir des seuls paramètres estimés mais à des temps t différents. Par exemple :

$$r(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t - k) \quad (1.12)$$

Ou

$$r(t) = p(t) - \hat{p}(t - k) \quad (1.13)$$

Ce dernier cas suppose que les paramètres restent constants dans des conditions de fonctionnement nominales.

Il existe plusieurs méthodes estimant les paramètres. Citons pour exemple l'estimation par projection orthogonale, l'estimation Bayésienne, l'estimation au sens du maximum de vraisemblance ou l'estimation au sens des moindres carrés [Ripoll 1999].

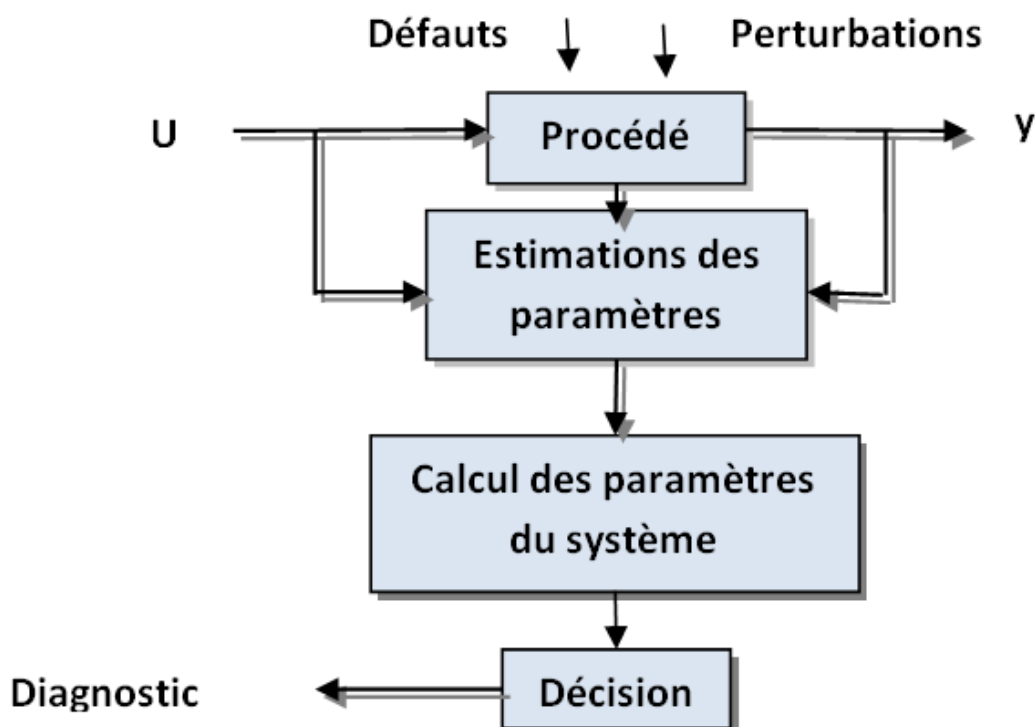


FIGURE 1.13 – Estimation de paramètres [Frank 1996]

1.10.3 Approches à base d'observateurs d'états

Cette partie propose une stratégie de diagnostic à base d'observateur qui est notre objectif de la thèse et ils sont les plus couramment utilisés. Dans la recherche d'observateurs linéaires, en temps continu ou discret, à entrées inconnues a suscité ces dernières années une abondante littérature, en raison d'applications potentielles dans divers domaines, comme le diagnostic. On rappelle ci-dessous quelques-uns des articles les plus marquants.

Des observateurs dédiés au diagnostic ont été étudiés dans la littérature (observateurs à entrées inconnues). Ils ont démontré leur intérêt pour une détection et une localisation de défaut au niveau macroscopique dès lors que les défauts et perturbations peuvent être représentées. Nous avons cherché à étudier ce que ces observateurs permettent d'obtenir dans le cas de défauts actionneurs ou capteurs dans des systèmes hydrauliques.

L'idée originale de diagnostic par observateurs provient probablement de R.V.Beard [Beard 1971] et Robert Clark de l'Université de Washington [Clark 1975]. Ils ont été rejoints par une longue lignée de chercheurs, comprenant Paul Frank d'Allemagne [Frank 1980], [Massoumnia 1986], [Massoumnia 1989], [Viswanadham 1987], [Patton 1989] et [White 1987]. On trouvera dans [Patton 2000] les développements récents sur ce thème ainsi qu'une liste assez exhaustive de références.

Cette méthode se base sur la reconstruction de la sortie du processus à l'aide d'observateurs, de la comparer avec la sortie mesurée, puis à utiliser l'écart entre ces deux fonctions est utilisé comme résidu [Beard 1971], [Jones 1973], [Clark 1975], [Massoumnia 1989], [Stephane 1988], [White 1987], [Olin 1991], [Frank 1990], [Frank 1991] et [Ding 1993].

L'idée principale des méthodes de génération du vecteur de résidus r à base d'observateurs est d'estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. r est alors généré en formant la différence (éventuellement filtrée) entre les sorties estimées et les sorties réelles.

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (1.14)$$

L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la figure 1.14.

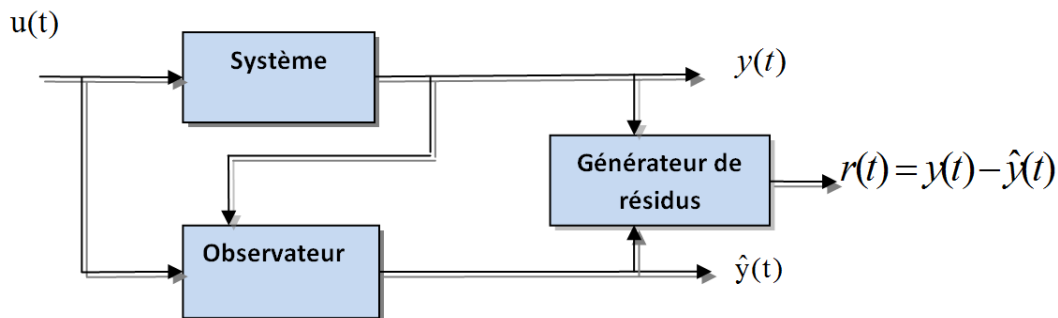


FIGURE 1.14 – Schéma fonctionnel d'un générateur de résidus à base observateur

Par la suite, une stratégie de localisation à base un banc d'observateurs est présenté.

1.11 Structuration des résidus par un banc d'observateurs

La détection d'un défaut nécessite un seul observateur pour générer le résidu, mais il y a un inconvénient lorsque nous entamons l'étape de localisation, puisque La forme des résidus de reconstruction de sortie montre leur dépendance vis-à-vis des défauts à détecter comme ces derniers sont multiples, ce qui nous empêche de localiser la source du défaut. La situation idéale étant qu'un résidu soit sensible à un défaut particulier. Cette structuration, qui correspond à un découplage, peut être effectuée par un banc d'observateurs, ces observateurs construits selon que l'on souhaite détecter des défauts d'actionneurs ou de capteurs à partir d'une partie des entrées ou une partie des sorties du système. Chaque observateur du banc d'observateur est synthétisé pour qu'il soit sensible à un sous ensemble de défauts f_i et insensible aux autres.

Le nombre d'observateurs à intégrer dans le banc dépend du nombre de défauts à détecter et à isoler. Trois possibilités sont envisagées :

- Les défauts doivent être détectés mais pas localisés : dans cette configuration le banc d'observateur est composé d'un unique observateur qui doit être affecté par tous les défauts et insensible aux perturbations.
- Cas de défauts uniques : ce cas de figure, très fréquemment étudié, est moins restrictif qu'il n'y paraît. En effet, il est rare (mais pas impossible) que plusieurs capteurs, actionneurs ou composants du système tombent en panne simultanément. Le banc d'observateurs sera alors constitué d'autant d'observateurs qu'il y a de défauts à isoler. Chacun de ces observateurs sera synthétisé de manière à être sensible à tous les défauts sauf un. Ainsi, le i ème observateur sera obtenu en considérant le i ème défaut f_i comme entrée inconnue. La table de codage des défauts sera alors composée de 1 à l'exception d'une diagonale de 0.

- Cas de défauts multiples : la détection et la localisation de tous les défauts, lorsque ceux-ci peuvent intervenir simultanément, nécessitent de pouvoir découpler chaque observateur de tous les défauts sauf un, la table de codage des défauts sera alors composée de 0 à l'exception d'une diagonale de 1.

Les défauts sur une installation peuvent survenir à trois niveaux : les composants du système (défauts internes), les actionneurs et enfin les capteurs. Suivant la position du défaut, il est possible d'adapter la construction du banc d'observateurs pour améliorer les performances du système de surveillance.

1.11.1 Les défauts actionneurs

Dans la représentation par l'espace d'état, ces défauts sont modélisés par un terme additif sur les composantes de la matrice de commande.

Deux configurations sont envisagées :

- **Défauts uniques** : Dans ce cas, le banc d'observateurs à entrées inconnues peut être construit suivant l'architecture GOS (Generalized Observer Scheme) présentée sur la figure 1.15a. Le i ème observateur est piloté par toutes les entrées sauf la i ème et toutes les sorties. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de toutes les entrées sauf ceux de la i ème, chaque résidu issu d'un UIO est insensible à un défaut actionneur particulier et sensible à tous les autres. Il est donc possible de détecter et localiser les défauts actionneurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.
- **Défauts multiples** : le banc d'observateurs pourra être construit suivant l'architecture DOS (Dedicated Observer Scheme) présentée sur la figure 1.15b. Le i ème observateur est piloté par la i ème entrée et toutes les sorties ; les $(m - 1)$ autres entrées sont considérées comme inconnues et la sortie de ce i ème observateur est insensible aux défauts des entrées non utilisées donc chaque résidu issu d'un UIO est sensible à un et un seul défaut actionneur ce qui permet de détecter et localiser les défauts même quand ceux-ci surviennent simultanément.

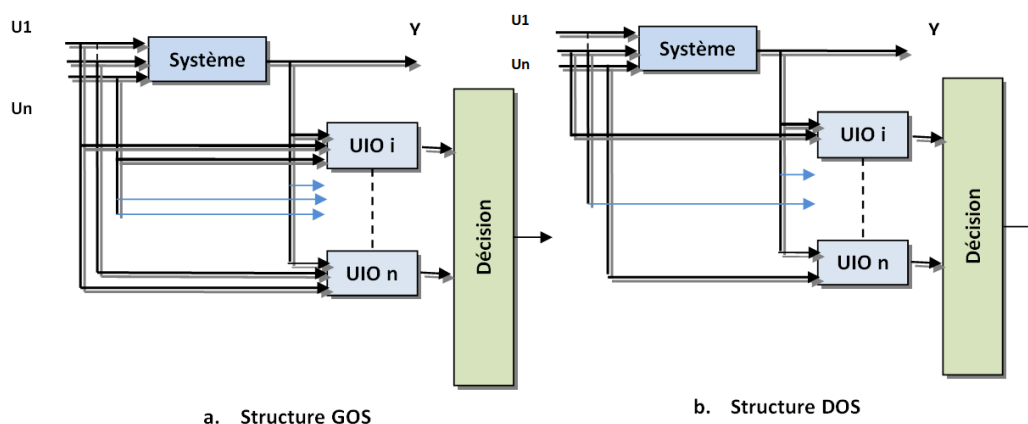


FIGURE 1.15 – Localisation de défauts actionneurs

1.11.2 Les défauts capteurs

En représentation d'état, ces défauts sont modélisés par des termes additifs sur les composantes de la matrice de sortie. Deux hypothèses sont encore envisageables pour la construction

d'un banc d'observateurs suivant que les hypothèses de défauts uniques ou défauts multiples sont retenues.

- **Défauts uniques** : dans ce cas, le banc d'observateurs peut être construit selon l'architecture GOS présentée à la figure 1.16a le i ème observateur est piloté par toutes les sorties sauf la i ème, et toutes les entrées. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de toutes les capteurs sauf ceux de la i ème. Il est donc possible de détecter et de localiser les défauts capteurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.
- **Défauts multiples** : le banc d'observateurs peut être construit selon le schéma DOS présenté sur la figure 1.16b le i ème observateur est piloté par la i ème sortie et toutes les entrées ; la sortie de ce i ème observateur est insensible aux défauts des sorties non utilisées donc chaque résidu issu d'un observateur est sensible à un et un seul défaut capteur ce qui permet de détecter et localiser les défauts capteurs même lorsqu'il surviennent de façon simultanée.

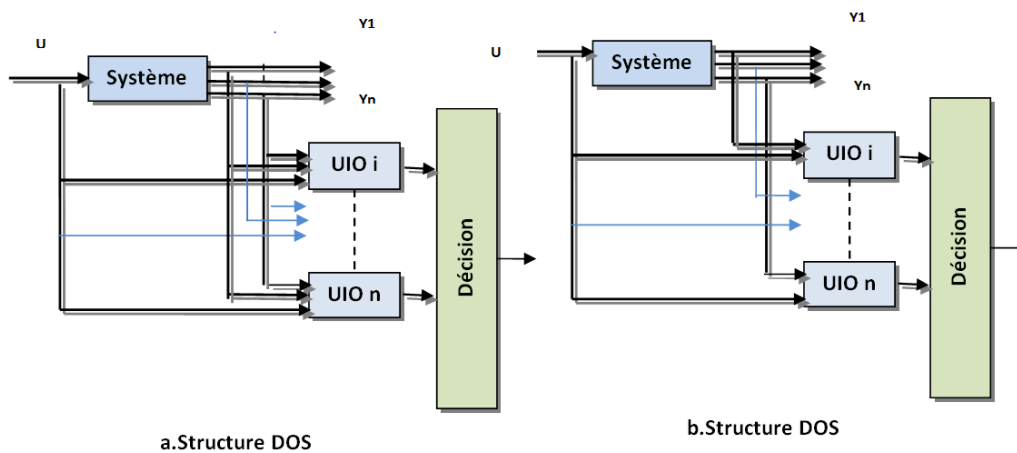


FIGURE 1.16 – Localisation de défauts capteurs

1.12 Les avantages des méthodes de diagnostic à base de modèles

Les approches à base de modèles s'appuient sur des modèles comportementaux explicites du système soumis au diagnostic. Un grand avantage de ces approches par rapport aux approches relationnelles et de traitement de données, réside sur le fait que seule l'information du comportement normal du procédé est prise en compte par l'intermédiaire d'un modèle de référence. La précision du modèle, liée aux besoins de la surveillance et aux critères de performance du diagnostic, définit le choix de l'utilisation de modèles quantitatifs selon [Travé-Massuyès 1997].

Avantages

- Applicable aux systèmes linéaires et non linéaires
- Méthodes très répandues
- Possibilité de découpler les réponses des entrées inconnues
- Méthode plus robuste aux bruits de mesures
- La connaissance sur le système est découplée de la connaissance de diagnostic
- Il s'agit de connaissance de conception plutôt que d'exploitation

- Les fautes et les symptômes ne doivent pas être anticipés
- Le coût de développement et de maintenance est moindre
- Les modèles fournissent un support adéquat pour l'explication (structure du système explicitement représentée).

Inconvénients

- Nécessité d'avoir un modèle précis et complet
- Mal adaptée au processus complexe
- Erreur de diagnostic due aux perturbations
- Pas de garantie de détection si le type de défaut n'a pas été modélisé
- Adaptabilité difficile aux changements de processus et manque de méthode générale dû au caractère
- local du modèle (appliqué au système étudié)

1.13 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons fait un tour d'horizon plus ou moins rapide des principales techniques de détection et de localisation de défauts dans les systèmes dynamiques. Une terminologie était nécessaire et une recherche bibliographique des méthodes dites analytiques ou à base de modèles non exhaustive ont été présentées.

Le chapitre suivant est un chapitre de transition où nous introduisons l'ensemble des outils mathématiques nécessaires à l'estimation et à l'observation d'état.

Observateurs à entrées inconnues

Sommaire

2.1	Introduction	27
2.2	Présentation d'un observateur linéaire	28
2.3	Quelques définitions relatives aux observateurs	31
2.3.1	Notion d'observabilité	31
2.3.2	Notion de détectabilité	32
2.3.3	Placement de pôle et convergence	32
2.4	Observateur linéaire invariant à entrées inconnues	33
2.4.1	Observateurs à entrées inconnues qui affectent la sortie	33
2.5	Observateur non linéaire à entrées inconnues	40
2.5.1	Différents types d'observateurs de systèmes non linéaires	41
2.6	Conclusion	42

2.1 Introduction

UN système industriel est souvent soumis à des perturbations qui ont comme origine des bruits dus à l'environnement du processus, des incertitudes de mesures, des défauts de capteurs ou d'actionneurs ; ces perturbations pouvant affecter la sûreté de fonctionnement des équipements ou du personnel de l'installation et leur estimation peut servir à concevoir un système de commande capable d'en minimiser les effets. Les perturbations sont appelées entrées inconnues lorsqu'elles affectent l'entrée du processus et leur présence peut rendre difficile l'estimation de l'état du système. Les observateurs à entrées inconnues permettent en général d'estimer les variables d'état et les variables d'entrées inconnues, permettant ainsi d'effectuer des synthèses de commande par retour d'état avec rejet de perturbation, mais aussi de résoudre des problèmes de détection et localisation de défauts ce qui est le cas ici.

Plusieurs travaux ont été réalisés concernant l'estimation de l'état et de la sortie en présence d'entrées inconnues ; ils peuvent être regroupés en deux catégories. La première suppose la connaissance a priori d'informations sur ces entrées non mesurables ; en particulier, Johnson [Johnson 1975] propose une approche polynomiale et Meditch [Meditch 1971] suggère d'approcher les entrées inconnues par la réponse d'un système dynamique connu. La deuxième catégorie procède soit par estimation de l'entrée inconnue [Xiong 1998], soit par son élimination complète des équations du système [Dassanake 2000] et [Valcher 1999].

Parmi les techniques ne nécessitant pas l'élimination des entrées inconnues, plusieurs auteurs ont proposé des méthodes de conception d'observateur capable de reconstruire entièrement l'état d'un système linéaire en présence d'entrées inconnues [Wang 1975], [Moreno 2001],

[Kobayashi 1982], Lyubchik [Lyubchik 1993] et Liu [Liu 2002] utilisent une méthode d'inversion de modèle pour l'estimation d'état.

Parmi les techniques qui permettent l'élimination des entrées inconnues, celle de Kudva [Kudva 1980] s'intéresse, dans le cas des systèmes linéaires, aux conditions d'existence de l'observateur d'un système à entrées inconnues en se basant sur la technique d'inverse généralisée de matrice. Guan [Guan 1991] a procédé à l'élimination des entrées inconnues des équations d'état d'un système linéaire continu. Beaucoup d'autres variantes existent, mais la grande majorité d'entre elles ont été développées pour des systèmes linéaires. Koenig [Koenig 1996] a présenté une méthode simple pour concevoir un observateur à action proportionnelle et intégrale pour des systèmes singuliers à entrées inconnues. Des conditions suffisantes d'existence de cet observateur ont été établies.

Des observateurs d'ordre réduit ont été considérés par plusieurs auteurs durant ces dernières années [Yang 1988], [Zasadzinski 2000] et [Koenig 2001]. Cependant, Yang et Wilde [Yang 1988] ont démontré que l'observateur à entrées inconnues d'ordre plein peut avoir une vitesse de convergence plus rapide que l'observateur d'ordre réduit.

L'utilisation d'observateurs à entrées inconnues pour le diagnostic de défaut et les systèmes de surveillance de processus a également attiré beaucoup d'attention [Watanabe 1982], [Saif 1993], [Dassanake 2000], [Koenig 2001] et [Guerra 2004]. Dassanayake [Dassanake 2000] a considéré un observateur, en éliminant les entrées inconnues dans les équations d'état, pour pouvoir détecter et isoler plusieurs défauts de capteurs, en présence d'entrées inconnues, sur un moteur (turbo-réacteur).

Le but de ce chapitre est la présentation d'un état de l'art sur la construction des observateurs linéaires à entrées inconnues. Il présente également la méthode de synthèse des observateurs des systèmes non linéaires à entrées inconnues, basée sur la technique d'observation à entrée inconnue, caractérisant des classes de systèmes linéaires plusieurs entrées et plusieurs sorties (MIMO).

Ainsi, ce chapitre à caractère théorique et bibliographique, nous présentons des méthodes de synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes linéaires et pour une classe de systèmes non linéaires. Après avoir rappelé les conditions nécessaires à la synthèse d'observateurs linéaires invariants et leur synthèse, nous présentons des méthodes de conception sous conditions d'observateurs de systèmes linéaires dont les entrées inconnues affectent les mesures ou dont les mesures sont indépendantes des entrées inconnues.

2.2 Présentation d'un observateur linéaire

Soit la structure de la représentation d'état est commune à tous les systèmes linéaires et un système continu linéaire à coefficients constants est décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Ou pour tout instant t , $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^u$ et $y(t) \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie du système. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times u}$ et $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ représentent les matrices constantes connues du système. Ces matrices (A,B,C) sont directement calculées à partir des équations de fonctionnement du système.

Il arrive souvent que toutes les variables d'état d'un système ne soient pas accessibles à la mesure. L'idée est donc de reconstruire l'état à partir des informations disponibles, c'est-à-dire la sortie et l'entrée de commande. On utilise pour cela un système dynamique permettant de construire l'état : un observateur.

Un observateur ou reconstituteur d'état est un système dynamique qui permet d'obtenir une estimation de la valeur courante de l'état non mesuré d'un système à partir des informations antérieures sur les entrées et la sortie de ce dernier.

Avant de construire l'observateur, il faut étudier l'observabilité du système par la matrice d'observabilité O_{AC} .

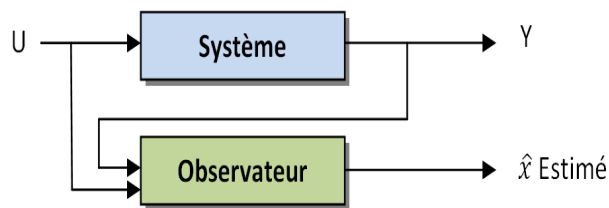


FIGURE 2.1 – Principe de l'observateur

Si la matrice d'observabilité est de rang plein $\text{rang}(O) = n$ alors le système (2.1) est observable. On appelle un observateur du système Σ un estimateur qui permet de construire une estimation \hat{x} de l'état par l'intermédiaire d'une variable telle que $z = T\hat{x}$ sous la forme suivante :

$$\text{OBS} : \begin{cases} \dot{z} &= Nz + Mu + Ly \\ \hat{x} &= T^{-1}z \end{cases} \quad (2.2)$$

Où $z \in \mathbb{R}^n$ et $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ est l'estimation du vecteur d'état x .

$N \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $M \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$ sont des matrices qu'il faut choisir de sorte que l'erreur d'observation soit asymptotiquement nulle.

Les propriétés d'un observateur est la convergence.

Remarque. 2.2.1 *Si la dimension de z est inférieure à la dimension de x , l'observateur est dit d'ordre réduit. Si z et x ont la même dimension, l'observateur est dit d'ordre complet (tout l'état est estimé).*

Dans le cadre où l'observateur à d'ordre complet, nous pouvons choisir $T = I$ ce qui donne :

$$z = \hat{x}$$

Nous posons alors l'erreur d'estimation $e = x - \hat{x}$

L'évolution de la dynamique de cette erreur est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ &= Ax + Bu - (Nz + Mz + Ly) \end{aligned}$$

Nous remplaçons x par $e + \hat{x}$ et y par Cx pour obtenir

$$\dot{e} = (A - LC)e + (A - N - LC)\hat{x} + (B - M)u \quad (2.3)$$

L'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro si et seulement si les matrices N , M et L sont choisies de sorte que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\begin{cases} A - LC & \text{est une matrice stable (matrice de Hurwitz)} \\ A - LC - N & = 0 \\ B - M & = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

L'équation (2.3) devient alors :

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (2.5)$$

On va maintenant étudier les conditions de détermination des matrices N , M et L vérifiant les équations (2.4).

– **Détermination de la matrice M**

On a $B - M = 0$. On peut donc poser $M = B$ (B est la matrice de commande du système (2.3)).

– **Détermination de la matrice L**

D'après l'équation (2.5), la matrice L est choisie de telle sorte que l'erreur d'observation soit asymptotiquement stable.

Conformément au théorème de Lyapunov la convergence de l'observateur est garantie s'il existe une fonction $V(e)$ uniformément équivalente à la norme euclidienne, telle que

$$\forall e \neq 0 \quad \begin{cases} V(e) > 0 \\ \dot{V}(e) < 0 \end{cases}$$

Prenons $V(e) = e^T X e$ ou $X = X^T$ est une matrice symétrique définie positive à déterminer. Les conditions précédentes sur la fonction $V(e)$ et sa dérivée peuvent alors s'écrire

$$\forall e \neq 0 \quad \begin{cases} X > 0 \\ (A - LC)^T X + X(A - LC) < 0 \end{cases}$$

et en appliquant le complément de Schur [Niculescu 2001], [Scorletti 2006] et [Hassibi 1999], on obtient

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & (A - LC)^T X + X(A - LC) \end{pmatrix} < 0 \quad (2.6)$$

On remarque que l'inégalité (2.6) est bilinéaire par rapport aux variables L et X . Une méthode de résolution consiste à procéder au changement de variable : $W = XL$.

L'inégalité obtenue après ce changement de variables s'écrira

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & A^T X + X(A - LC) \end{pmatrix} < 0 \quad (2.7)$$

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & A^T X + XA - (C^T W^T + WC) \end{pmatrix} < 0$$

La solution du problème initial est obtenue en deux étapes. On résout tout d'abord l'inégalité matricielle linéaire par rapport aux inconnues X et W puis on déduit la valeur du gain

$$L = X^{-1}W$$

– Détermination de la matrice N

Une des conditions est (2.4) est $A - LC - N = 0$. On en déduit

$$N = A - LC$$

Ainsi, l'observateur d'ordre complet (2.2) peut s'écrire :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} &= (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \\ &= A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \end{cases} \quad (2.8)$$

La détermination de la matrice de gain de l'observateur L peut également se faire par placement de pôles.

Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques définitions relatives aux observateurs [Liu 2007].

2.3 Quelques définitions relatives aux observateurs

2.3.1 Notion d'observabilité

La notion d'observabilité est donc essentielle lorsqu'on va procéder à l'élaboration d'observateurs, ce qui constitue l'objet du prochain chapitre.

Définition. 2.3.1 [Borne 1992] Un système est complètement observable si, quel que soit l'instant initial t_1 , l'état initial x_1 à t_1 , et l'instant final t_2 différent de t_1 , la seule connaissance de sa sortie $y(t)$ et de son entrée $u(t)$ sur l'intervalle $t_1 \leq t \leq t_2$ permet de connaître l'état initial x_1 .

Définition. 2.3.2 [Borne 1992] Un SLS est complètement observable si et seulement si, en régime autonome ($u \equiv 0$), l'observation d'une sortie $y(t)$ uniformément nulle pour $t_1 \leq t \leq t_2$ n'est possible que pour un état x_1 (à t_1) nul.

Pour un SLS parfaitement connu, et puisqu'on suppose que l'entrée $u(t)$ est connue et que la matrice B n'intervient pas dans les critères d'observabilité, on peut donc ramener l'étude de l'observabilité à l'étude de la paire (A, C) . On dira donc indifféremment que "la paire (A, C) est complètement observable", ou que "le SLS est complètement observable".

D'après la définition 2.3.1, on peut définir différents critères d'observabilité :

Théorème. 2.3.1 [Borne 1992] Soit la matrice d'observabilité définie par

$$O_{(AC)} = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$$

L'observabilité du système est liée au rang de la matrice $O_{A,C}$. Si elle est de rang n le système est observable.

2.3.2 Notion de détectabilité

Lorsque la paire (A, C) n'est pas complètement observable, il faut étudier la détectabilité de cette même paire (A, C) . Nous reviendrons sur cette notion de détectabilité dans les sections suivantes car la détectabilité est très utile lors du dimensionnement des observateurs.

Théorème. 2.3.2 Les valeurs propres de $A - LC$ peuvent être fixées arbitrairement si et seulement si (A, C) est observable.

Définition. 2.3.3 [O'Reilly 1983] Le système (2.3) est détectable si et seulement si les états non observables sont stables.

2.3.3 Placement de pôle et convergence

Afin de dimensionner l'observateur d'ordre plein, il faut déterminer une matrice L telle que les valeurs propres de $A - LC$ soient toutes à parties réelles strictement négatives.

Théorème. 2.3.3 [Luenberger (1971)] Les valeurs propres de $(A-LC)$ peuvent être fixées arbitrairement si et seulement si (A, C) est observable.

Remarque. 2.3.1 Usuellement, par souci de simplicité de mise en œuvre, le critère d'observabilité utilisé est le critère portant sur le rang de la matrice d'observabilité. On considérera par la suite que l'observabilité d'un système sera systématiquement testée avec ce critère. Ainsi, pour le théorème précédent, le test d'observabilité est :

$$\text{rang} = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} = \text{rang}(O_{A,C}) = n$$

Remarque. 2.3.2 Lorsqu'un système n'est pas observable, on ne peut fixer arbitrairement les dynamiques de l'observateur. Lorsque l'on ne peut assigner les dynamiques, on ne peut pas garantir la stabilité de l'observateur. En effet, afin que l'observateur soit stable, il faut que les valeurs propres de la matrice fondamentale de l'observateur ($A-LC$) dans le cas d'un observateur d'ordre plein) soient à parties réelles négatives. Cependant si le système n'est pas observable mais détectable cela signifie que toutes ou une partie des dynamiques de l'observateur sont stables mais ne sont pas choisies [Wonham 1985]. Dans ce cas, la paire (A, C) est dite stabilisable ou détectable.

Théorème. 2.3.4 [Wonham 1985] Un observateur stable pourra être dimensionné si et seulement si la paire (A, C) est détectable. Afin de choisir convenablement les dynamiques de l'observateur (valeurs propres de $A-LC$), on peut se baser sur les travaux de [Kailath 1980]. Cependant en pratique, on choisit une dynamique pour l'erreur de reconstruction plus rapide que celle du

processus en boucle ouverte. Toutefois, on est limité au niveau de la grandeur de ces dynamiques choisies. Idéalement, on devrait prendre des dynamiques très grandes afin d'assurer une convergence rapide et précise. Cependant, on ne peut utiliser que des gains réalisables, ce qui restreint le choix de L , et de plus, plus la valeur du gain sera élevée plus les bruits influenceront sur la reconstruction de l'état.

2.4 Observateur linéaire invariant à entrées inconnues

Plusieurs travaux ont été réalisés pour l'estimation des entrées inconnues dans le cadre des systèmes dynamiques linéaires [Guan 1991], [Maquin 1994], [A. Stotsky 2001], [Daafouz 2006] et [Darouach 2009]. [Edwards 2000] ont proposé deux méthodes s'appuyant sur des observateurs à mode glissant, pour détecter et estimer les défauts de capteurs. [Liu 2002] ont présenté, en utilisant un observateur de Luenberger, l'estimation des états inconnus d'un système dynamique linéaire soumis à des perturbations. L'algorithme d'estimation de ces perturbations est basé sur l'inversion de la dynamique du système.

Les travaux de [Wang 1975] proposent des observateurs d'ordre réduit pour les systèmes linéaires comportant des entrées connues et inconnues. [Kudva 1980] donne les conditions d'existence de cet observateur sous forme de contraintes de rang.

Dans [Seliger 1991], les entrées inconnues représentent des perturbations et des incertitudes de modélisation. L'article de [Gaddouna 1994] propose des solutions pour la détection de défauts et la génération de résidus.

2.4.1 Observateurs à entrées inconnues qui affectent la sortie

L'observateur à entrées inconnues est développé pour estimer l'état d'un système en présence d'entrées inconnues. Dans le cas où les entrées inconnues affectent la sortie du système, il est possible de les éliminer en procédant à un changement de variables.

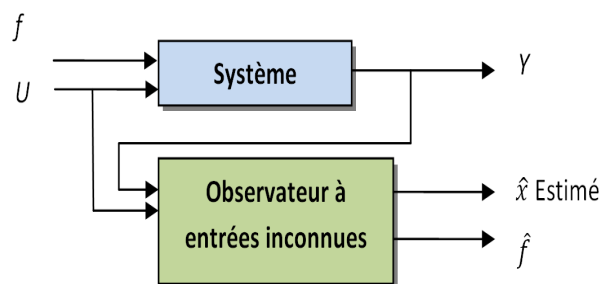


FIGURE 2.2 – Principe de l'observateur à entrées inconnues

Le système linéaire invariant suivant représente le cas où la sortie y est affectée par les entrées inconnues :

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} &= Ax + Rf \\ y &= Cx + Df \end{cases} \quad (2.9)$$

$x \in \mathbb{R}^n$ est la matrice d'état, $f \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrées inconnues et $y \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur de sorties.

$A \in \mathbb{R}^{(n \times n)}$ est la matrice d'état, $R \in \mathbb{R}^{(n \times m)}$ est la matrice de commande associée aux entrées inconnues, $c \in \mathbb{R}^{(p \times n)}$ est la matrice d'observation et $D \in \mathbb{R}^{(p \times m)}$ est la matrice d'influence des entrées inconnues sur les mesures.

On suppose que la matrice D est de rang plein colonnes $\text{rang}(D) = m$. Comme les entrées connues n'interviennent pas dans la synthèse de l'observateur, seule les entrées inconnues sont considérées par le système. Un observateur à entrées inconnues existera si et seulement si le système (2.8) est à minimum de phase [Boutayeb 2002].

C'est-à-dire que le système (2.9) est détectable.

Nous développons dans ce qui suit la synthèse de l'observateur linéaire invariant dans le cas où le nombre d'entrées inconnues est inférieur au nombre de sorties ($m < p$) et dans le cas où le nombre d'entrées inconnues est égal au nombre de sorties ($m = p$). La matrice d'observation C est supposée de rang plein en lignes sans être obligatoirement sous la forme

$$C = (I_p, \quad 0, \quad \dots)$$

2.4.1.1 Nombre d'entrées inconnues inférieur au nombre de mesures ($m < p$) :UIO₁

Le nombre d'entrées inconnues est inférieur au nombre de mesures. La forme des deux matrices C et D donne l'accès à un réarrangement des sorties puisque la matrice D est de rang plein colonnes. La sortie du système (2.9) peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_1 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} D_1 \\ D_1 \end{pmatrix} f \quad (2.10)$$

D_1 est une matrice carrée inversible d'ordre m et D_2 est une matrice de taille $(p - m) \times m$.

L'entrée inconnue f peut être estimée à partir de la première ligne de (2.10) par :

$$f = D_1^{-1}(y_1 - C_1 x) \quad (2.11)$$

Il est possible de poser le changement de variable qui permet d'exprimer une nouvelle sortie du système en fonction des deux autres

$$\begin{aligned} \bar{y}_2 &= y_2 - D_2 D_1^{-1} y_1 \\ &= (C_2 - D_2 D_1^{-1} C_1) x \end{aligned} \quad (2.12)$$

En utilisant l'expression de f (2.11) et en utilisant la nouvelle sortie \bar{y}_2 (2.12), le système (2.9) peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\Sigma \begin{cases} \dot{x} &= (A - R D_1^{-1} C_1) x + R D_1^{-1} y_1 \\ &= F x + G y_1 \\ &= (C_2 - D_2 D_1^{-1} C_1) x \\ &= H x \end{cases} \quad (2.13)$$

La construction des états non mesurables est alors celle d'un système classique d'entrée connue y_1 et de sortie \bar{y}_2 , dont la synthèse a été présentée à la section 2.3.1.

Finalement, les estimées de l'état et de l'entrée inconnue du système (2.8) sont données par l'observateur suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{UIO}_1 : \quad \hat{x} = (A - R D_1^{-1} C_1) \hat{x} + R D_1^{-1} y_1 + L(\bar{y}_2 - (C_2 - D_2 D_1^{-1} C_1) \hat{x}) \\ \quad \hat{f} = D_1^{-1}(y_1 - C_1 \hat{x}) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

2.4.1.2 Nombre d'entrées inconnues égal au nombre de mesures ($m = p$) : UIO₂

L'objectif est ici de concevoir un observateur d'ordre plein à entrées inconnues pour le système (2.8) lorsque le nombre d'entrées inconnues est égal au nombre de mesures [Boutayeb 2002] et [Liu 2007].

$$\begin{cases} \text{UIO}_2 : \dot{\hat{z}} = Nz + Ly \\ \hat{x} = z \end{cases} \quad (2.15)$$

$\hat{x} = z \in \mathbb{R}^n$ est l'estimation du vecteur d'état.

$N \in \mathbb{R}^{(n \times p)}$ et $L \in \mathbb{R}^{(n \times p)}$ sont des matrices à déterminer de telle sorte que l'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéros.

Nous posons l'erreur d'estimation $e = x - \hat{x}$ dont la dynamique s'écrit

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{z}} \\ &= Ax + Rf - (Nz + Ly) \end{aligned}$$

Nous remplaçons z par $x - e$ et y par $Cx + Df$ pour obtenir la dynamique d'erreur suivante :

$$\dot{e} = Ne + (A - LC - N)x + (R - LD)f \quad (2.16)$$

L'erreur d'observation converge asymptotiquement vers zéro si et seulement si les matrices N et L sont choisies de sorte que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\begin{cases} N \text{ est une matrice stable (matrice de Hrwitz)} \\ A - LC - N = 0 \\ R - LD = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Sous ces hypothèses, l'équation (2.16) devient alors

$$\dot{e} = Ne \quad (2.18)$$

La matrice D étant carrée et inversible, on peut en déduire que $L = RD^{-1}$ puis que

$$N = A - RD^{-1}C$$

L'entrée inconnue f peut être estimée, si l'état est connu, à partir de la sortie du système (2.8) sous la forme suivante :

$$f = D^{-1}(y - Cx) \quad (2.19)$$

Dans le cas où le nombre d'entrées inconnues est égal au nombre de mesures, les estimées de l'état et de l'entrée inconnue du système (2.8) sont données par les relations suivantes :

$$\text{UIO}_2 \begin{cases} \dot{\hat{x}} = (A - RD^{-1}C)\hat{x} + RD^{-1}y \\ \hat{f} = D^{-1}(y - C\hat{x}) \end{cases} \quad (2.20)$$

2.4.1.3 Observateurs pour les mesures indépendantes des entrées inconnues : UIO₃

Le système dynamique linéaire invariant dont les mesures ne sont pas soumises à l'influence des entrées inconnues peut être décrit par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} &= Ax + Bu + Rf \\ y &= Cx \end{cases} \quad (2.21)$$

$x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathbb{R}^u$ est le vecteur des entrées connues, $f \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur des entrées inconnues et $y \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur des sorties.

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'état, $B \in \mathbb{R}^{n \times u}$ est la matrice de commande associée aux entrées connues, $R \in \mathbb{R}^{n \times m}$ est la matrice d'influence des entrées inconnues sur l'état et $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ est la matrice d'observation.

On suppose que la matrice R est de rang plein colonnes et que les matrices C et R ont les structures suivantes :

$$\begin{aligned} C &= (I_p \ 0 \ . \ . \ . \ 0) \\ R &= \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} \\ \text{rang}(R) &= m \end{aligned} \quad (2.22)$$

Les résultats que nous présentons dans cette section sont notamment traités dans plusieurs travaux [Darouach 1994], [Yang 1988], [Guan 1991] et [Liu 2007] où ils sont exploités pour la synthèse du gain de l'observateur des systèmes linéaires à entrées inconnues.

Un observateur à entrées inconnues existe pour le système (2.21) si et seulement si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

$$\text{rang}(C_R) = \text{rang}(R_1) = m$$

$$\forall s \in \mathbb{C}, \text{Re}(s) \geq 0, \text{rang} \begin{pmatrix} sI_n & R \\ C & 0 \end{pmatrix} = n + m$$

Considérons l'observateur d'ordre plein :

$$\begin{cases} \dot{Z} = Nz + Mu + Ly \\ \hat{x} = z - Ey \end{cases} \quad (2.23)$$

$z \in \mathbb{R}^n$ est une variable interne à l'observateur, $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ est l'estimation du vecteur d'état. $N \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $M \in \mathbb{R}^{n \times u}$, $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $E \in \mathbb{R}^{n \times p}$ sont des matrices à déterminer de telle sorte que l'erreur d'observation soit asymptotiquement nulle.

La dynamique d'évolution de l'erreur d'observation $e = x - \hat{x}$ s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ &= (I + EC)\dot{x} - \dot{z} \end{cases}$$

Nous remplaçons \dot{x} et \dot{z} par leurs expressions, nous obtenons :

$$\dot{e} = (I + EC)(Ax + Bu + Rf) - (Nz - Ly)$$

Par construction, nous avons $\hat{x} = z - Ey$ qui peut également s'écrire $z = \hat{x} + Ey$

$$\dot{e} = (I + EC)(Ax + Bu + Rf) - (N\hat{x} - Mu + (LC + NEC)x)$$

En posant

$$P = I + EC \quad (2.24)$$

On obtient

$$\dot{e} = Ne + (PB - M)u + PRF + (PA - NP - LC)x \quad (2.25)$$

L'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro si et seulement si les matrices N , L , M et E sont choisies de sorte que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\begin{cases} N \text{ est une matrice stable (matrice de Hurwitz)} \\ PR = (I + EC)R = 0 \\ M = PB = (I + EC)B \\ LC = PA - NP \end{cases} \quad (2.26)$$

Sous ces conditions, l'équation (2.24) devient alors

$$\dot{e} = Ne \quad (2.27)$$

Nous allons maintenant étudier les conditions de détermination des matrices N , E et L permettant de vérifier les relations (2.26).

– Détermination de la matrice E

La matrice E est déterminée à partir de la deuxième équation de (2.26). On a $(I + EC)R = 0$. On peut en déduire que $ECR = -R$. Une solution numérique possible (non unique) peut s'écrire en utilisant l'expression de la pseudo-inverse de la matrice CR , de rang plein ligne

$$\begin{aligned} (CR)^+ &= (CR)^T[(CR)(CR)^T]^{-1} \\ E &= -R(CR)^+ + Y(I - (CR)(CR)^+) \end{aligned} \quad (2.28)$$

où Y est une matrice arbitraire.

– Détermination de la matrice P

La matrice P peut s'exprimer à partir de l'équation (2.24) et en utilisant le résultat précédent (2.28).

$$\begin{aligned} P &= I + (-R(CR)^+ + Y((CR)(CR)^+))C \\ &= I + YC - (I + YC)R(CR)^+C \\ &= (I + YC)[I - R(CR)^T[(CR)(CR)^T]^{-1}C] \end{aligned} \quad (2.29)$$

– Détermination de la matrice M

La matrice M est déterminée à partir de la troisième relation de (2.26) et l'expression de P (2.29)

$$M = (I + YC)[I - R(CR)^T[(CR)(CR)^T]^{-1}C]B \quad (2.30)$$

– **Détermination de la matrice L**

La matrice L est déterminée à partir de la dernière relation de (2.26)

$$NP + LC - PA = 0$$

En utilisant l'expression de P (2.26),

$$N(I + EC) + LC - PA = 0$$

il est possible de procéder au développement suivant :

$$\begin{aligned} N &= PA - NEC - LC \\ &= PA - (NE + L)C \\ &= PA - KC \end{aligned} \quad (2.31)$$

Posons la variable K telle que

$$K = NE + L \quad (2.32)$$

Nous remplaçons N par son expression (2.31) dans l'équation (2.32) et nous trouvons :

$$K = (PA - KC)E + L$$

ce qui donne l'expression de la matrice L :

$$L = K(I + CE) - PAE \quad (2.33)$$

On remarquera que la détermination de la matrice L nécessite la détermination de la matrice N par l'intermédiaire de la matrice K .

– **Détermination de la matrice la matrice N**

Pour que l'erreur d'observation soit asymptotiquement stable, la matrice N doit être choisie judicieusement (2.27). Conformément au théorème de Lyapunov la convergence de l'observateur est garantie s'il existe une fonction $V(e)$ telle que

$$\forall e \neq 0 \begin{cases} V(e) > 0 \\ \dot{V}(e) < 0 \end{cases}$$

Prenons $V(e) = e^T X e$ ou $X = X^T$ est une matrice symétrique définie positive à déterminer.

Les conditions précédentes sur la fonction $V(e)$ et sa dérivée peuvent alors s'écrire

$$\forall e \neq 0 \begin{cases} X > 0 \\ N^T X + X N < 0 \end{cases}$$

en appliquant le complément de Schur [Niculescu 2001], [Scorletti 2006], [Boyd 1994] et [Hassibi 1999], on obtient.

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & N^T X + X N \end{pmatrix} < 0 \quad (2.34)$$

Comme $N = PA - KC$ (équation (2.31))

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & (PA - KC)^T X + X(PA - KC) \end{pmatrix} < 0$$

La matrice P est calculée selon (2.29) avec Y une matrice arbitraire.

On remarque que l'inégalité (2.34) est bilinéaire par rapport aux variables K et X . Une méthode de résolution consiste à procéder à un changement de variable $W = XK$ pour obtenir l'inégalité suivante :

$$\begin{pmatrix} -X & 0 \\ 0 & (PA)^T X + X(PA) - (C^T W^T + WC) \end{pmatrix} < 0$$

La solution du problème initial est alors obtenue en deux étapes. On résout tout d'abord l'inégalité matricielle linéaire par rapport aux inconnues X et W . On déduit ensuite la valeur du gain K .

$$K = X^{-1}W$$

Ceci permet de déterminer les matrices L et N :

$$\begin{cases} N = PA - KC \\ L = K(I + EC) - PAE \end{cases} \quad (2.35)$$

L'entrée inconnue f peut s'exprimer si l'état est connu à partir de la sortie du système (2.21) et de la pseudo-inverse de la matrice d'influence des entrées inconnues sur l'état.

$$f = R^+(\dot{x} - Ax - Bu) \quad (2.36)$$

En utilisant le résultat de l'observateur \hat{x} (2.23), l'entrée inconnue peut alors être estimée à partir de :

$$f = R^+(\dot{z} - E\dot{y} - A\hat{x} - Bu)$$

Finalement, les estimées de l'état et de l'entrée inconnue du système (2.21) sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{z} &= Nz + Mu + Ly \\ \hat{x} &= z - Ey \\ \hat{f} &= R^+(z - Ey - A\hat{x} - Bu) \end{cases} \quad (2.37)$$

L'un des objectifs principaux des approches à base d'observateurs est la génération des signaux résidus sensibles aux défauts et découplés d'un certain nombre de perturbations reflétées par des entrées inconnues. Le problème de découplage d'entrées inconnues est un problème classique et peut être résolu à l'aide d'une technique de placement de structure propre [Patton 2000]. Lorsque les conditions d'un découplage complet ne sont pas satisfaites, le problème de génération de résidus robuste peut être formulé comme un problème d'optimisation qui consiste à minimiser la sensibilité des résidus par rapport aux entrées inconnues et maximiser cette sensibilité par rapport aux défauts. C'est ainsi que des techniques d'optimisation H_∞ [Ding 2000] et celles basées sur des techniques LMI [Wang 2007] ont été proposées et sont devenues des thèmes actifs.

Une comparaison réalisée dans [Yang 1988] atteste que les observateurs d'ordre réduit présentent une moins bonne convergence que les UIO d'ordre plein, ceci du fait de degrés de liberté moindres dans le choix des dynamiques. [Darouach 2009] ont présenté une procédure de construction d'UIO d'ordre plein où les conditions d'existence sont bien mises en évidence. Les travaux de [Darouach 1994] montrent que ces conditions d'existence sont équivalentes à celle établies dans [Hou 1992].

Considérons l'observateur d'ordre plein (UIO₃) ou l'avantage est qu'il fournit un degré de liberté dans la conception du générateur de résidus pouvant être utilisé afin d'améliorer la localisation de défaut.

Nous allons présenter les deux méthodes d'observateurs à entrée inconnue à rang plein (UIO₃) et à rang réduit découplage approximatif dans les deux chapitres qui se suivent car elles sont la base de nos travaux.

2.5 Observateur non linéaire à entrées inconnues

Dans le cadre des systèmes dynamiques non linéaires, plusieurs travaux ont été réalisés pour l'estimation des entrées inconnues. L'objectif est l'estimation complète du vecteur d'état x et des entrées inconnues f malgré la présence de ces dernières.

[Liu 2007] applique la technique des observateurs de type grand gain pour l'estimation des entrées inconnues dans un réacteur. [Boutayeb 1995] proposent une approche qui consiste à transformer le système non linéaire initial (satisfaisant la condition de Lipschitz) en système singulier dans la dynamique duquel les entrées inconnues n'interviennent pas. [Sharma 2004] proposent une extension de [Koenig 2002] aux systèmes non linéaires affectés par des perturbations sur l'entrée et la sortie. L'idée repose, à nouveau sur une séparation entre les perturbations et le reste du système par une série de transformations des équations d'état et de sortie. Lorsque cette séparation est achevée, un observateur est construit pour la partie sans perturbation. [Kalsi 2010] traite le problème des entrées inconnues pour les systèmes non linéaires lipschitziens et [Pertew 2005] utilise des techniques d'optimisation H_∞ pour la synthèse de l'observateur [Ouahi 2011].

Dans le sous-paragraphe suivant nous allons nous intéresser au cas de systèmes non linéaires à entrées inconnues.

2.5.1 Différents types d'observateurs de systèmes non linéaires

La synthèse d'observateurs de l'état des systèmes non linéaires est naturellement plus difficile et encore largement ouvert que celle des systèmes linéaires. A notre connaissance il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthode universelle pour la synthèse de ces observateurs. Nous allons voir qu'il n'existe pas de méthode universelle pour la synthèse de tels observateurs, les approches envisageables sont :

- Les méthodes fondées sur une transformation non-linéaire, basée sur l'algèbre de Lie, permettent de mettre le système sous une forme canonique quasi linéaire. L'objectif est de trouver un changement de coordonnées, an que la dynamique de l'erreur d'estimation devienne linéaire. Une telle transformation étant faite, les techniques d'observation des systèmes linéaires peuvent être utilisées pour estimer l'état du système transformé, et donc l'état du système original en utilisant le changement de coordonnées inverse. Des conditions nécessaires et suffisantes pour un système non linéaire transformé sous une forme canonique ont été établies dans [Krener 1983], [Krener 1985], [Sharma 1987], [Phelps 1991], [Kazantzis 1998] et [Hou 1999].
- Des méthodes sont basées sur une linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement. C'est par exemple le cas du filtre de Kalman étendu et de l'observateur de Luenberger étendu. Ces observateurs ont été établis dans [Chen 1993], [Boutayeb 1997], [Reif 1998] et [Aubry 1998]. C'est le cas du filtre de Kalman étendu et l'observateur de Luenberger étendu, le calcul du gain de l'observateur se fait par l'intermédiaire du système linéarisé autour de la trajectoire estimée. Malgré la restriction à la convergence locale de cette méthode, elle est largement utilisée dans la pratique et donne généralement de bons résultats.
- Observateurs à grand gain : Un observateur de type grand gain est synthétisé pour une classe de systèmes non-linéaires uniformément observables ([Gauthier 1992], [Gauthier 1994]) [Gauthier 1981], [Farza 1993], [Raghavan 1994], [Rajamani 1998], [Kreisselmeier 2003], [Farza 2009] et [Farza 2010]. Le principe repose sur l'introduction d'un gain d'observation qui dépend d'un paramètre μ . Le nom 'grand gain' est dû au fait que le gain de l'observateur est suffisamment grand pour affaiblir la non-linéarité du système. Notons cependant qu'avec l'observateur à grand gain, le choix d'un paramètre μ suffisamment grand assure une convergence sûre et rapide, avec en contrepartie une grande sensibilité au bruit d'observation.
- Une autre catégorie d'observateurs à grand gain est développée par Thau [Thau 1973] et complétée par Kou et al. [Kou 1975], où les conditions suffisantes pour la stabilité globale de l'observateur sont établies. La classe de systèmes considérée est en général composée d'une partie linéaire et d'une autre non linéaire mais supposée être lipschitzienne. Notez que cette classe de systèmes a pour particularité la représentation d'une vaste gamme de processus physiques.
- D'autres types d'observateurs ont été proposés. Citons d'abord l'observateur de Luenberger généralisé [Arcak 2001], [Arcak 2002], [Fan 2002] et [Fan 2003]. Dans ce cas, la conception de ce type d'observateurs consiste à ajouter un deuxième gain à l'observateur de Luenberger

à l'intérieur de la partie non linéaire du système. cet observateur consiste à ajouter un deuxième gain à l'intérieur de la partie non linéaire du système. Citons également les techniques d'observation basées sur la théorie de la contraction comme outil d'analyse de la convergence entre l'observateur et le modèle [Jouffroy 2004] et [M. Benallouch 2007].

- Observateurs basés sur l'approche ensembliste [Lohmiller 1998],[Lohmiller 2000], [Lohmiller 2005], [Rifai 2006].l'observateur est basé sur une méthode de contraction d'ensembles. Cette technique mène à de nouvelles conditions de synthèse différentes de celles fournies par les techniques précédentes.

Leur application à un système non linéaire exige une linéarisation du modèle autour d'un point de fonctionnement.

Des observateurs dédiés au diagnostic ont été étudiés dans la littérature, (espace de parité, observateurs à entrées inconnues, observateurs généralisés). Ils ont démontré leur intérêt pour une détection et une localisation de défaut au niveau macroscopique dès lors que les défauts et perturbations peuvent être représentés comme des entrées additives intervenant sur l'état et la sortie. Les limites de leur capacité de détection et de localisation en fonction du nombre d'entrées sont également connues. Nous avons cherché à étudier ce que ces observateurs permettent d'obtenir dans le cas de défauts sur un système hydraulique. L'estimation d'état en non linéaire est couramment abordée à partir du modèle linéarisé autour d'un point de fonctionnement ou d'une trajectoire, afin d'exploiter les résultats précédents. Cela a donné naissance à l'observateur UIO. étant donné que la linéarisation implique une perte d'information dommageable, l'utilisation d'observateurs complètement non linéaires a été étudiée dans le contexte du diagnostic [Garcia 1997]. Toutefois, aucune structure générale ne s'est dégagée et le réglage de ces méthodes reste complexe.

Ce type d'observateur UIO peut s'avérer pertinent dans de nombreuses applications, comme la détection de défauts, qui sont généralement considérés comme des entrées inconnues par exemple [Marzat 2011] :

- le décryptage chaotique dans les systèmes de communication.
- Applications UIO dans le domaine aérospatiales Petit avion avion [Chen 1994], [Park 2004], [Amato 2006], [Bateman 2008], Voilure tournante [Freddi 2009], Avion civil [Alwi 2006], Avion De combat [Wang 2007], Satellite [Patton 2007].

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de rappeler les différentes phases nécessaires à l'analyse et la synthèse d'observateurs à entrées inconnues. Elles peuvent se décomposer succinctement en : étude de la observabilité (le positionnement de capteurs et actionneurs), étude de la synthèse de l'UIO (nombre et valeurs des modes fixes et libres, choix des paramètres). Ceci a permis d'étudier les caractéristiques de chaque observateur et d'en faire une comparaison. Il n'y a pas de différence notable dans les résultats de simulation. Néanmoins l'approche par pseudo-inverse est plus restrictive que les autres au niveau de la condition d'existence. Notons aussi que ces méthodes sont souvent employées dans le cas monovariable SISO. Une comparaison dans le cas multivariable MIMO serait certainement plus intéressante dans les chapitres qui se suivent. En ce qui concerne les problèmes résolus par ces techniques, on peut principalement citer les problèmes d'estimations des défauts de type actionneurs et capteurs. Le prochain chapitre va être consacré à l'élaboration d'une nouvelle méthode d'observateur à entrées inconnues. Pour réaliser cet UIO, les résultats

théoriques obtenus seront comparés avec les résultats de la simulation.

Synthèse d'observateur avec découplage parfait

Sommaire

3.1 Introduction	45
3.2 Description mathématique du système à surveillé	46
3.2.1 Système nominal	46
3.3 Découplage parfait des entrées inconnues	49
3.4 Synthèse d'observateur à entrée inconnue UIO avec découplage parfait	49
3.4.1 La structure de l'observateur	50
3.5 Conditions d'existence et procédures pour la mise en œuvre du découplage parfait	51
3.6 Algorithme de synthèse de l'observateur	52
3.7 Calcul théorique de résidu	52
3.8 Analyse par table de signatures	52
3.9 Exemples	54
3.9.1 Exemple 1 (système hydraulique de quatre réservoirs)	54
3.9.2 Exemple 2	60
3.10 Conclusion	67

3.1 Introduction

ON présente dans ce chapitre la méthode de génération de résidus à base observateur à entrées inconnues avec découplage parfait.

Le problème de l'estimation d'état d'un système est d'une importance pratique considérable, que ce soit pour la mise en œuvre d'une loi de commande ou pour l'élaboration d'une stratégie de diagnostic. Le principe de base de la génération de résidus à l'aide d'observateurs est de réaliser une estimation des sorties du système à partir des grandeurs accessibles à la mesure, c'est-à-dire les entrées et les sorties. Le vecteur résidu est alors construit comme l'écart entre la sortie estimée et sortie mesurée, c'est-à-dire à l'aide de l'erreur de l'estimation sur la sortie.

Il est fréquent, lors de la modélisation d'un système, de faire intervenir des entrées qui ne sont pas mesurables. On utilise alors le vocable d'entrées inconnues pour les désigner et la reconstruction de l'état de tels systèmes ne peut se faire que sous certaines conditions, les observateurs portent le nom d'observateurs à entrées inconnues. Dont le principe de construction d'un observateur à entrées inconnues consiste à rendre l'erreur d'estimation indépendante des perturbations non mesurables. Considérons un système à surveiller ou l'observateur à entrées inconnues (UIO)

peut résoudre le problème de la sensibilité aux différents défauts et aux perturbations, en introduisant leurs matrices d'états dans les équations de synthèse de l'observateur de génération des résidus, dont la prise de décision nécessite la comparaison de l'indicateur des défauts avec le seuil obtenu de manière empirique ou théorique.

Les observateurs à entrées inconnues UIO ont été introduits dans la détection de défauts par [Viswanadham 1987], [Hou 1992], [J. Chen 1996] et [Duan 2001]

Dans ce contexte, la génération des résidus des systèmes à base de modèles linéaires a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant cet observateur d'état, parmi ces chercheurs [Ding 2002], [Jiang 2005], [Johansson 2006] [Meseguer 2010], [Khan 2011], [Chen 1999], [Mangoubi 1998], [Rank 1999], [Zolgadri 2006], [Termehchy 2013] et [Cristofaroa 2014]

L'observateur à entrées inconnues (UIO) a été largement utilisé dans le diagnostic de pannes pour processus et installations industrielles, on peut citer par exemple [Oscar 2005], [Hui 2005], [Anzurez-Marin 2008] et [Bagherpour 2013].

Nous traitons le problème du découplage parfait, à l'aide de deux exemples de la détection des défauts par découplage parfait des entrées inconnues.

3.2 Description mathématique du système à surveillé

Cette section décrit la description mathématique à base d'espace d'état du système à surveillé en utilisant un générateur de résidu.

3.2.1 Système nominal

Un modèle mathématique d'un système dynamique à surveiller au fonctionnement nominal est décrit par un espace état du modèle comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax + Bu(t) \\ y(t) &= Cx + D(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

où, $x \in \mathbb{R}^n$ désigne le vecteur d'état du système $u \in \mathbb{R}^r$ et $y \in \mathbb{R}^m$ représentent l'entrée et les vecteurs de mesure, respectivement. A, B, C, D sont des matrices de dimensions appropriées du système.

Le problème de génération de la génération de résidus peut alors être posé de la manière suivante :

Etant donnée les entrées et les sorties du système, on suppose qu'il est possible de générer en utilisant le modèle (3.1) un ensemble des signaux, appelés résidus, notés $r(t) \in \mathbb{R}^q$, permettant de mettre en évidence l'apparition d'un éventuel défaut sur le processus.

Cette tâche est d'autant plus difficile que le modèle mathématique du système est imparfait, ce qui est toujours le cas en pratique. En effet le modèle (3.1) ne prend en compte, ni les incertitudes de modélisation toujours présentes, ni les différentes perturbations aux quelles le système est inévitablement soumis. Cela nécessite par conséquent une certaine robustesse du générateur de résidus par rapport à ces différentes incertitudes. Le terme de robustesse des résidus doit être comme une insensibilité de ceux-ci par rapport aux incertitudes de modélisations et des perturbations non mesurables. L'obtention de cette insensibilité passe nécessairement par la prise en compte des incertitudes sur le comportement du système nominal.

Une hypothèse très courante est de considérer ces différentes incertitudes comme entrées inconnues agissant sur la dynamique de l'état et les sorties. On adopte alors généralement le modèle permettant la prise en compte des diverses incertitudes.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax + Bu(t) + D_x d(t) \\ y(t) &= Cx + D(t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où $d(t)$ est le vecteur des perturbations généralement dénommé le vecteur des entrées inconnues, il renferme toutes les variables d'entrées non mesurables ou supposées être telles.

La matrice D_x représente la matrice d'action des perturbations $d(t)$, elle est supposée connue et de rang plein colonne.

Bien entendu, l'accroissement de la robustesse vis-à-vis des perturbations ne doit pas se faire au détriment de la sensibilité des résidus vis-à-vis des défauts que l'on souhaite détecter et localiser. Ceci ne peut être fait que si l'on dispose d'un modèle faisant apparaître l'effet des défauts $f(t)$ sur le comportement du système nominal. De façon analogue au cas des entrées inconnues, l'influence des défauts sur le comportement du système peut être modélisée comme une perturbation agissant de manière additive sur la dynamique de l'état et des sorties.

– **Système en présence des défauts actionneurs :**

Un modèle mathématique du système contrôlé, permettant la prise en compte des incertitudes et avec additifs défauts d'actionneur est décrit par le modèle d'espace d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) &= Cx + D(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^r$ et $y \in \mathbb{R}^m$ ainsi que A, B, C, D sont définis comme étant identiques à dans (3.1).

$f \in \mathbb{R}^l$ représente un vecteur de défauts d'actionnement variant dans le temps. Les colonnes de la matrice $F_x \in \mathbb{R}^{n \times l}$ désignent la distribution des défauts actionneurs indépendants.

– **Systèmes en présence des défauts capteurs :**

Un modèle mathématique du système contrôlé, permettant la prise en compte des incertitudes et avec additifs défauts capteurs est décrit par le modèle d'espace d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax + Bu(t) + D_x d(t) \\ y(t) &= Cx + D(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^r$ et $y \in \mathbb{R}^m$ ainsi que A, B, C, D sont définis comme étant identiques à dans (3.1). $f \in \mathbb{R}^l$ représente un vecteur de défauts d'actionnement variant dans le temps. Les colonnes de la matrice $F_y \in \mathbb{R}^{(n \times y)}$ désignent la distribution des défauts capteur indépendant [Sun 2013].

– **Systèmes en présence des défauts de capteurs et des défauts actionneurs**

Le système défectueux (3.3) et (3.4) peut être intégrés dans une expression pour un système avec les deux défauts actionneurs et capteurs additifs. Toutefois, cela ne veut pas dire que les

défauts actionneurs et des capteurs se produisent simultanément. L'expression intégrée est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) &= Cx + D(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Une représentation d'entrée-sortie de matrice de transfert pour le système (3.5) est décrite comme :

$$y(t) = G_u(s)U(s) + G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s) \quad (3.6)$$

Notons

- G_u est une matrice de transfert multivariable ne dépendant que de s . Elle peut être écrite sous forme d'une factorisation première à gauche.
- G_f est une matrice de transfert de défauts multivariable connue.
- G_d la matrice de transfert de perturbations connue.

Ou :

$$\begin{cases} G_u(s) &= C(sI - A)^{-1}B \\ G_f(s) &= C(sI - A)^{-1}F_x + F_y \\ G_d(s) &= C(sI - A)^{-1}D_x \end{cases} \quad (3.7)$$

Le problème est alors de construire un dispositif appelé générateur de résidus (observateur), permettant d'élaborer, à partir des grandeurs d'entrées et de sorties mesurés sur le système, un vecteur d'indicateur de défauts ou vecteur des résidus, notés $r(t) \in \mathbb{R}^q$ tel que :

$$\begin{cases} r(t) \neq 0 & \text{si } f(t) \neq 0 \\ r(t) = 0 & \text{si } f(t) = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

$H_u(s)$ et $H_y(s)$ sont les matrices de transfert, supposées stables et propres doivent être telles que les conditions (3.8) soient vérifiées.

L'expression générale du générateur de résidus est donnée par :

$$r(t) = H_u(s)U(s) + H_y(s) (G_u(s)U(s) + G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s)) \quad (3.9)$$

Afin que les conditions (3.8) soient vérifiées, les matrices $H_u(s)$ et $H_y(s)$ doivent satisfaire :

$$\begin{cases} H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0 \\ H_y(s)G_d(s) = 0, & H_y(s)G_f(s) \neq 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

Notons que $H_y G_f$ représente la matrice de transfert entre le vecteur des défauts et le vecteur résidus. Comme nous le verrons, elle permet de définir la table des signatures des défauts, qui sera exploitée pour la localisation des défauts.

La synthèse du générateur de résidus consiste finalement en un choix correct des matrices H_u, H_y telles que les conditions (3.10) soient vérifiées [Toscano 2011].

3.3 Découplage parfait des entrées inconnues

Le découplage parfait consiste à annuler l'influence dans les résidus des incertitudes de modélisation et des défauts, du moins en théorie. Un résidu obtenu à l'aide du découplage parfait est tel que la signature de ce résidu est équivalente à la matrice de transfert du résidu vis-à-vis des défauts et des incertitudes structurées, dans la mesure où à une signature élémentaire nulle correspond un transfert nul, et à une signature élémentaire non nulle, un transfert non nul.

Où $d(t)$ est le vecteur des perturbations généralement dénommé le vecteur des entrées inconnues et $f(t)$ est le vecteur des défauts.

– **Exemple**

	f_1	f_2	f_3	d
r	0	1	1	0

TABLE 3.1 – Table de signature

Transfert résidu :

$$[r(s)] = \begin{pmatrix} 0 & \frac{s}{s+1} & \frac{1}{s+1} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ d(s) \end{pmatrix}$$

On nommera structures robustes à découplage parfait, les structures pour lesquelles tous les résidus du schéma de FDI sont réalisés avec la technique du découplage parfait. En d'autres termes aux 1 de la table des signatures correspondent des éléments de la matrice de transfert non nuls, et aux 0, des transfert nuls [Stephane 2006].

3.4 Synthèse d'observateur à entrée inconnue UIO avec découplage parfait

Le but de génération de résidu en présence d'entrées inconnues est la théorie d'observateur à entrée inconnue UIO avec découplage parfait. Cette théorie qui consiste à rendre l'erreur d'estimation indépendante des perturbations non mesurables.

Soit le système à surveillé, supposé correctement décrit par la représentation d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) &= Cx(t) + F_y f(t) \end{cases} \quad (3.11)$$

Dans le cas où le vecteur des entrées inconnues agit sur le vecteur de sortie, il est possible avec une transformation linéaire, qui nous ramène à la structure d'observateur ci-dessus.

3.5 Conditions d'existence et procédures pour la mise en œuvre du découplage parfait

Dans cette partie nous présentons les procédures que nous avons été amenés à développer ou à adopter pour la construction de générateur de résidu UIO réglé pour réaliser un découplage parfait de certaines entrées inconnues. Les procédures mises en œuvre s'appuient sur une analyse a priori des conditions d'existence de solutions au problème posé. Les conditions que nous présentons sont issues d'une analyse mathématique et géométrique, que nous avons menée à partir des travaux de [Frank 1994], sur la structure des différentes matrices de transfert qui définissent l'action des défauts et des incertitudes structurées sur le système. Notons que ces procédures sont présentées en considérant le problème du découplage parfait des entrées inconnues ; nous verrons par la suite comment elles peuvent être étendues à la construction du générateur de résidus de diagnostic à découplage parfait.

Si les conditions suivantes sont remplies :

M est une matrice de Hurwitz (Stable)

$$\begin{aligned}
 ME + PC &= EA \\
 N &= EB \\
 ED_x &= 0 \\
 ML_y F_y + PF_y - EF_x &\neq 0 \\
 L_y F_y &\neq 0
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Remarque : l'erreur d'estimation devient indépendante de l'état de l'entrée de commande et de l'entrée inconnues donc elle est sensible aux défauts.

$$\dot{e}_x(t) = Me_x(t) + (ML_y F_y + PF_y - EF_x)f(t) - L_y F_y \dot{f}(t) \tag{3.16}$$

La résolution du système (3.15) consiste, en premier lieu, à assurer la condition de découplage des entrées inconnues.

La solution de l'ensemble des équations (3.15) consiste en premier lieu à assurer la condition de découplage des entrées inconnues c'est-à-dire à satisfaire :

$$\begin{aligned}
 ED_x(t) &= 0 \quad \text{où} \quad E &= I + L_y C \\
 (I + L_y C)D_x &= 0 \quad \longrightarrow \quad (L_y C)D_x &= -D_x
 \end{aligned}$$

Il s'agit donc de déterminer la matrice L_y telle que la relation ci-dessus soit satisfaite. Si l'inverse généralisée de CD_x , notée $(CD_x)^+$ existe L_y peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$L_y = -D_x(CD_x)^+ \quad \text{avec} \quad (CD_x)^+ = [(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T$$

La matrice L_y n'existe que si la matrice $(CD_x)^T(CD_x)$ est inversible. Cette matrice étant de dimension $nd \times nd$ cette matrice n'est inversible que si le rang de $(CD_x) = nd$, où nd est représenté le nombre d'entrées inconnues.

Remarque :

Le découplage n'est possible que si le rang de la matrice (CD_x) égale aux nombres des entrées à découpler.

3.6 Algorithme de synthèse de l'observateur

L'algorithme de synthèse de l'observateur peut être résumé comme suit :

- rang $(CD_x) = nd$ puis calculer $L_y = -D_x[(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T$
- A partir de L_y calculer $E = I + L_y C$
- A partir de E calculer $N = EB$
- Imposer M soit une matrice de Hurwitz, on peut à cet effet choisir pour M une matrice diagonale faisant apparaître les valeurs propres désirés pour l'observateur.
- Calculer la matrice P telle que $PC = EA - ME$

3.7 Calcul théorique de résidu

Calculons après la matrice de transferts reliant les défauts à l'erreur d'estimation en sortie. Posons :

$$\begin{aligned} F &= ML_y F_y + P F_y - E F_x \\ F' &= -l_y F_y \end{aligned}$$

La transformée de Laplace de l'expression (3.16) s'écrit alors :

$$s e_x(s) = M e_x(s) + F f(s) + \acute{F} S f(s) \longrightarrow e_x(s) = (sI - M)^{-1} (F + \acute{F}) f(s) \quad (3.17)$$

L'erreur d'estimation en sortie s'écrit :

$$e_y(s) = \hat{y}(s) - y(s) = C \hat{x}(s) - x(s) - F_y f(s) = C e_x(s) - F_y f(s)$$

En remplaçant $e_x(s)$ par son expression (3.17), on obtient :

$$\begin{cases} e_y(s) &= [C(sI - M)^{-1}(F + s\acute{F}) - F_y] f(s) \\ F &= ML_y F_y + P F_y - E F_x \\ \acute{F} &= -l_y F_y \end{cases}$$

Soit $Q(s)$ une matrice de transfert stable et propre et générons un vecteur de résidus $r(s)$ tel que :

$$\text{Le vecteur de résidu est : } r(S) = Q(s) e_y(s) = Q(s) G_f(s) f(s)$$

La fonction de transfert de défaut est :

$$G_f(S) = C(sI - M)^{-1}(F + s\acute{F}) - F_y$$

$Q(s)$ Permet de structurer les résidus afin de faciliter la localisation des défauts.

3.8 Analyse par table de signatures

Autrement dit la signature théorique d'un défaut peut être envisagée comme les résultats de détection lorsque tous les tests sensibles au défaut réagissent. Les tests de cohérence, en utilisant des techniques de détection pour les systèmes dynamiques (par exemple observateur à entrées inconnues). En effet la plupart du temps, les valeurs des résidus sont à chaque instant, comparées à des seuils qui sont calculé théoriquement ou empiriquement. Les tests peuvent être réalisés en

parallèle et chaque décision issue de ces tests conduit à une valeur booléenne (0 : la valeur du résidu est en dessous du seuil ; 1 : la valeur du résidu a dépassé le seuil fixé). L'ensemble de ces valeurs booléennes forme un vecteur binaire appelé Signature de défaut. Cette comparaison conduit alors à une conclusion sur l'état du système : fonctionnement normal, défaillance identifiée ou finalement défaillance non identifiée.

Ensuite, une table de signatures théoriques générées par l'ensemble des signaux r_{ij} définis par :

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le résidu est sensible au défaut } f_i \\ 0 & \text{si le résidu est insensible au défaut } f_i \end{cases}$$

La localisation qui suit la détection peut être effectuée à l'aide de la table de signature. Les colonnes de cette table (table 3.2, 3.3, 3.4) sont représentatives des différents défauts et les lignes des différents résidus. Les ensembles des diagnostics dans l'approche FDI sont donnés en termes de défauts présents dans la table de signature. La génération des ensembles de diagnostic est basée sur une interprétation des colonnes de la table de signature et consiste à comparer la signature des observations avec celle des défauts.

Pour que tous les défauts puissent être détectés, aucune colonne de la matrice des signatures théoriques de défauts ne doit être nulle, et pour que tous les défauts puissent être localisés, toutes les signatures théoriques doivent être distinctes sans l'hypothèse d'exonération [Hafaifa 2005]. Gertler et al [Gertler 1990] Distinguent trois types de matrices de signatures.

- Non localisante (une colonne est nulle ou au moins deux colonnes sont identiques).
- Faiblement localisante (les colonnes sont non nulles et distinctes deux à deux).
- Fortement localisante (en plus d'être faiblement localisante, aucune colonne ne peut être obtenue à partir d'une autre en remplaçant un "1" par un "0").

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	1
r_2	1	1	1
r_3	1	0	0

TABLE 3.2 – Table de signature non localisante

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	1
r_2	1	0	1
r_3	1	1	0

TABLE 3.3 – Table de signature faiblement localisante

Une table non localisante ne permet pas de distinguer certains défauts entre eux. Une table faiblement localisante permet de localiser les défauts uniques sous hypothèse d'exonération. Une table fortement localisante garantit que les différentes sensibilités des résidus par rapport aux défauts ne conduisent pas à un diagnostic erroné [Hafaifa 2007].

	f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	0
r_2	1	0	1
r_3	0	1	0

TABLE 3.4 – Table de signature fortement localisante

3.9 Exemples

3.9.1 Exemple 1 (système hydraulique de quatre réservoirs)

3.9.1.1 Modélisation et génération d'observateur UIO du système

Pour illustrer généré des résidus en présence d'entrées inconnues, on considère le réseau de distribution d'eau représenté à la figure 3.2. Ce réseau est constitué de différents réservoirs de section s_i , où i indique le numéro du réservoir (1 à 4), reliés par des canalisations se section s . Le réseau est alimenté par deux débits volumiques $qe_1(t)$ et $qe_2(t)$ arrivant dans les réservoirs 1 et 2 respectivement. Ces deux débits d'alimentations sont commandés par des pompes. Pour observer le réseau, on dispose de quatre débitmètres repérés sur la figure (3.2) par des ronds noirs. Les capteurs sont étalonnés de manière à mesurer la variation autour des valeurs en régime stationnaire. Les mesures disponibles sont des débits sortant des réservoirs 1, 2, 3 et 4 :

$$y_1(t) = q_1(t), \quad y_2(t) = q_2(t), \quad y_3(t) = q_3(t), \quad y_4(t) = q_4(t)$$

Des grandeurs non mesurables affectent l'évolution du réseau : deux fuites dans la canalisation d'alimentation du réservoir 1 (par exemple un branchement sauvage sur le réseau) et dans la canalisation du réservoir 2 notée $f(t)$.

Concernant les entrées inconnues (les perturbations) on a des infiltrations dans le quatrième réservoir, noté $d(t)$ [Husson 2007].

En négligeant les pertes de charge dans les canalisations, et après linéarisation en considérant des petites variations autour du régime de fonctionnement stationnaire fonctionnent, le système surveillé peut être correctement décrit par la représentation d'état suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ a_3 & a_3 & -a_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & -a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(t) \\ \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

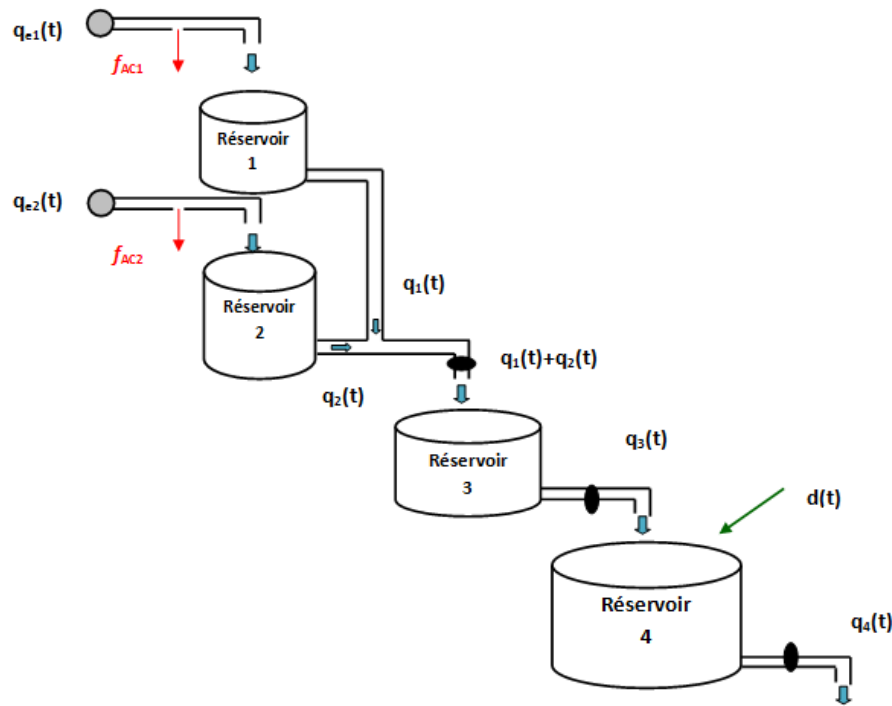


FIGURE 3.2 – Exemple 1

Le modèle de système à surveiller est supposé correctement décrit par la représentation d'état suivante. On suppose qu'on a deux défauts actionneurs et une perturbation.

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & 0 \\ a_3 & a_3 & -a_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_4 & -a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ v_4(t) \end{pmatrix} \end{cases}$$

Les deux matrices des défauts et de perturbations du système à surveiller sont les suivantes :

$$F_x = \begin{pmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

Avec :

- F_x la matrice d'action des défauts actionneurs $f(t)$ à détecter.
- D_x la matrice d'action des perturbations $d(t)$ (infiltration dans le quatrième réservoir).
- $v_i(t)$ le vecteur de bruit de mesure

où les coefficients a_i sont données par :

$$a_i = \frac{s}{S_i} \sqrt{\frac{g}{2h_{i0}}}$$

Avec :

- h_{i0} est la hauteur d'eau dans le réservoir i en fonctionnement stationnaire.
- S_i sont les différentes sections des réservoirs où i indique le numéro du réservoir (1 à 4).
- s section de canalisations des réservoirs.
- $g = 9.81m.s^{-2}$.

* Les sections des réservoirs sont :

$$S_1 = 100m^2, \quad S_2 = 150m^2, \quad S_3 = 300m^2, \quad S_4 = 400m^2.$$

* Le régime stationnaire imposé par les débits d'alimentation :

$$q_{e1} = 0.02m^3/s, \quad q_{e2} = 0.015m^3/s.$$

avec :

$$a_1 = 49.05 \times 10^{-4}, \quad a_2 = 43.60 \times 10^{-4}, \quad a_3 = 9.3429 \times 10^{-4}, \quad a_4 = 7.001 \times 10^{-4}.$$

On constate que les matrices C , D_x sont respectivement de plein rang ligne et de plein rang colonne, que le produit $C D_x$ est de plein rang colonne, et que le nombre de mesures est strictement supérieur au nombre d'entrées inconnues. Les conditions d'existence d'un observateur UIO sont vérifiées. Le rang de la matrice $C D_x$ étant égal au nombre d'entrées à découpler, il est possible de construire un générateur de résidus sensible aux défauts et insensible à la perturbation [Tahraoui 2015].

On obtient :

$$L_y = -F_x ((CF)^T (CF))^{-1} (CF)^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$E = -I + L_y C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad N = EB = \begin{pmatrix} 0.0049 & 0 \\ 0 & 0.0044 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

M est une matrice Hurwitz dont ($\lambda(M) \in C^-$) où $\lambda(M)$ désigne les valeurs propres de la matrice M et C^- le demi-plan gauche du plan complexe, l'axe des imaginaires exclus.

M diagonale et ses valeurs propres sont :

$$\lambda_1 = -2, \quad \lambda_2 = -3, \quad \lambda_3 = -2, \quad \lambda_4 = -2.$$

$$M = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$$

Calculons la matrice P telle que $PC = EA - ME$, comme C est unitaire, et après les calculs on trouve la matrice suivante :

$$\begin{pmatrix} 1.9951 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.9956 & 0 & 0 \\ 0.0009 & 0.0009 & 1.99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On obtient le reconstitueur à entrées inconnues ayant la structure suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0196 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0206 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0216 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0196 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \\ z_4(t) \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} -0.0049 & 0 & 1.9951 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0044 & 0 & 2.9956 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0009 & 0.0009 & 1.99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{y_1} \\ e_{y_2} \\ e_{y_3} \\ e_{y_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} - C \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 + y_3 \\ z_4 + y_4 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

– Calcul Théorique des Résidus

Calcul de la matrice de transfert reliant les défauts à l'erreur d'estimation en sortie :

La matrice de transfert $G_f = C(pI - M)^{-1}(F + pF') - F_y$, on a :

$$\begin{aligned} F &= ML_y F_y + P F_y - E F_x = \begin{pmatrix} -0.0049 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0044 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ F' &= -L_y F_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Le vecteur de résidus s'écrit alors

$$r(p) = Q(p)Q_d(p)G_f(p)f(p)$$

$$r(p) = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{f11} & G_{f12} \\ G_{f21} & G_{f22} \end{pmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{f11} = \frac{-0.004905s^3 - 0.03433s^2 - 0.07848s - 0.05886}{s^4 + 9s^3 + 30s^2 + 44s + 24} \\ G_{f12} = 0 \\ G_{f21} = 0 \\ G_{f22} = \frac{-0.00436s^3 - 0.02616s^2 - 0.05232s - 0.03488}{s^4 + 9s^3 + 30s^2 + 44s + 24} \end{array} \right.$$

Selon la matrice de transfert $G_f(p)$, on obtient une structure directement localisante, elle résulte du découplage de la perturbation.

– **La table de signatures**

La table de signature associée à ce générateur de résidus est dressée dans le tableau 3.5. Dont "1" signifie l'apparition de défaut f_i affectant le résidu r_{ij} et "0" l'insensibilité de ce dernier par rapport au défaut.

	f_{AC11}	f_{AC12}
r_1	1	0
r_2	0	1

TABLE 3.5 – Table des signatures désiré

D'après la table de signature, on remarque que les résidus sont insensibles aux perturbations $d(t)$ avec une structure permettant la localisation complète des défauts. Vérifions maintenant ces résultats théoriques en simulation par implémentation de l'observateur UIO qui estime les deux défauts f_{AC1} et f_{AC2} , dont la table de signature est élaborée à partir du raisonnement suivant :

L'observateur reconstruit le résidu 1 et le résidu 2 du système, si cette sortie présente un défaut alors il sera estimé et représentera directement le défaut. Donc, si les résidus r_1 ou r_2 s'écartent de l'intervalle de seuil, on est certain de l'apparition d'un défaut f_{AC1} ou f_{AC2} . Donc avec cet observateur, on détecte et on localise les deux défauts actionneur et capteur même s'ils apparaissent simultanément sur les deux sorties.

Dans l'application, on suppose que les deux défauts actionneur et capteur sont définis comme suit :

$$f_{AC1} = \begin{cases} -10^5 & 150 \leq t \leq 300 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad f_{AC2} = \begin{cases} -10^5 & 100 \leq t \leq 250 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La figure 3.3 présente le fichier SIMULINK utilisé.

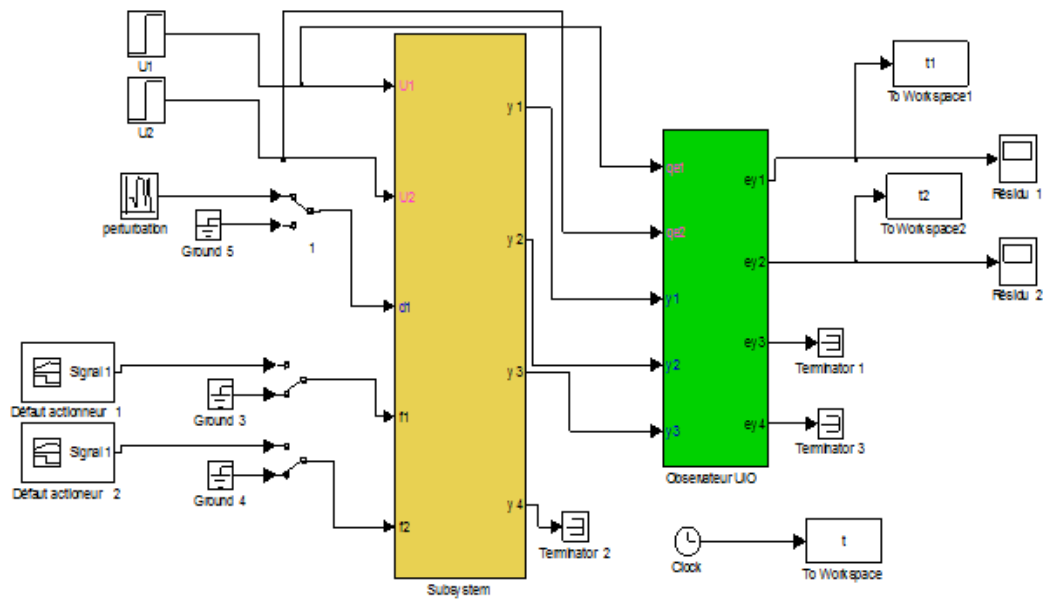


FIGURE 3.3 – Simulink utilisé pour la simulation d'exemple 1

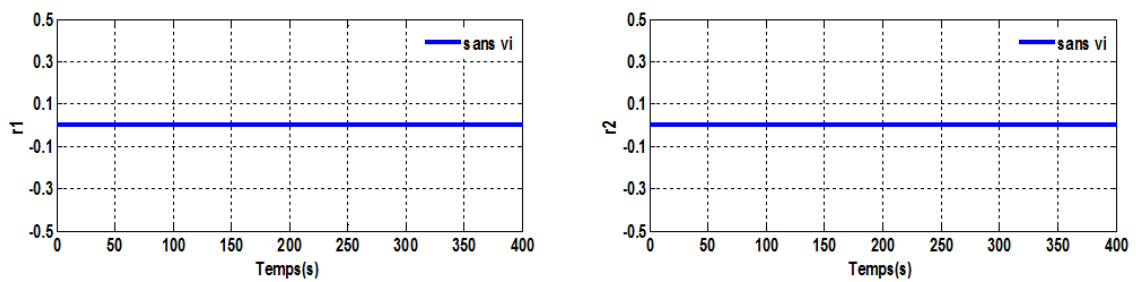


FIGURE 3.4 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation, sans bruit de mesure et sans défaut

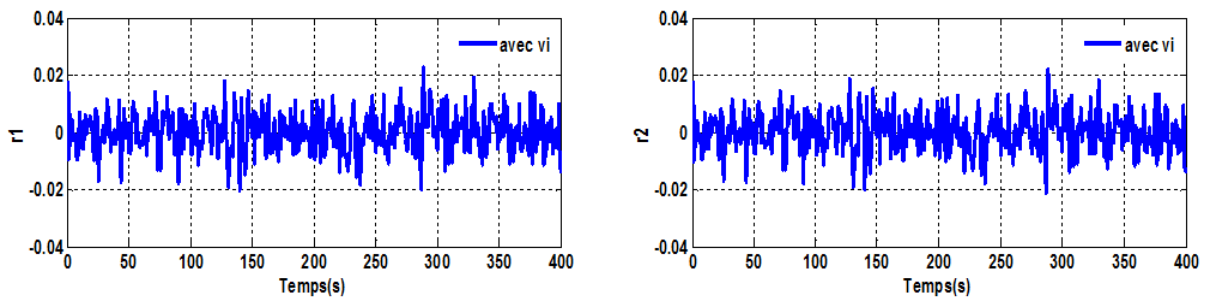
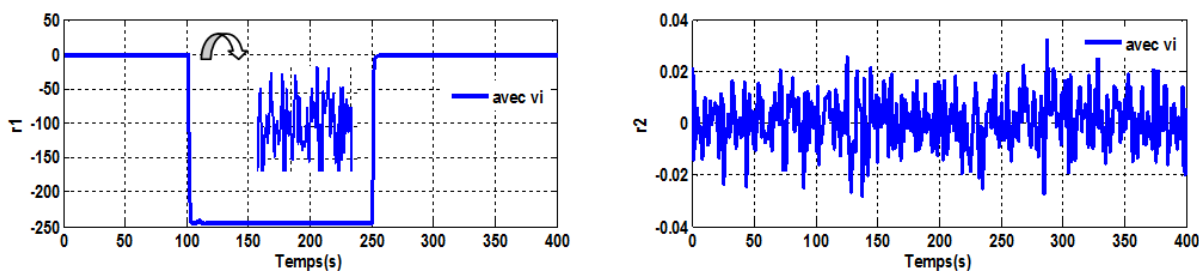
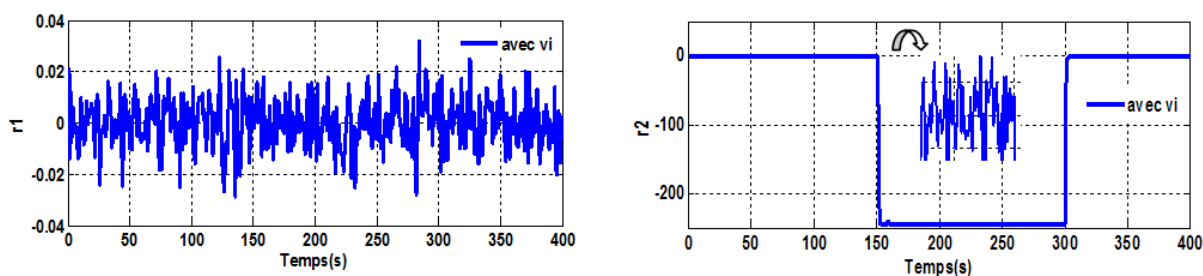


FIGURE 3.5 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation, bruit de mesure et sans défaut

FIGURE 3.6 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et bruit de mesure et défaut actionneur f_{AC1} FIGURE 3.7 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut actionneur f_{AC2}

– Interprétations des résultats

La stratégie utilisée ici est de concevoir un observateur avec découplage parfait aux perturbations et sensibilité aux défauts du système à surveiller.

Figures 3.4 montrent que les deux résidus sont parfaitement découplés de la perturbation $d(t)$. En réalité, les valeurs résidus ne sont pas égales à zéro, à cause du bruit de mesure, c'est la cause pour laquelle nous l'avons ajouté aux simulations pour se rapprocher à la réalité.

Par la suite, des signaux aléatoires seront superposés aux mesures afin de prendre en compte l'influence des bruits de mesures $v_i(t)$.

Figures 3.5 indiquent les deux résidus en l'absence de défauts sont statiquement nuls. Le résultat sur la figure 3.6a montre que le résidu est sensible au défaut actionneur par contre le résultat de la figure 3.6b montre que le résidu est insensible à ce défaut. Figure 3.7a montre que le résidu est insensible au défaut actionneur de telle sorte que la figure 3.7b montre que le résidu en présence de la perturbation est sensible au défaut actionneur. Les résultats de simulation des figures 3.6 et 3.7 évoluent conformément à la table des signatures précédemment obtenue où la structure de la table des signatures est localisante (deux signatures différente). Les résultats de la simulation trouvés confirmé l'efficacité de l'approche suggérée [Tahraoui 2015].

3.9.2 Exemple 2

3.9.2.1 Modélisation du système

Le système représenté dans la Figure 3.8 se compose de quatre réservoirs cylindriques et de sections S_i , où i indique le numéro de réservoirs (de 1 à 4). Le liquide s'écoulant dans les

réservoirs, à travers un tube cylindrique doté d'une vanne de section s . Le réseau est alimenté par deux débits volumiques q_{e1} et q_{e2} arrivant dans les réservoirs 1 et 3 respectivement. Ces deux débits d'alimentations sont commandés par des pompes.

Pour faciliter la modélisation du système, on l'a décomposé en trois sous-systèmes notés S/S_1 (réservoir 1), S/S_2 (réservoirs 2 et 3), S/S_3 (réservoir 4). Procédons d'abord la modélisation de chaque sous-système en considérant l'écoulement du fluide laminaire. On utilise pour cela l'équation $R_h = \Delta h / (q(s/m^2))$ pour la résistance où R_h représente la résistance linéaire à l'écoulement dans un système hydraulique et $q_e(t) - q_s(t) = dV/dt = d/dt(Ah) = A(dh/dt)$ pour la capacité. La longueur de la tuyauterie étant faible, l'inductance hydraulique est négligée.

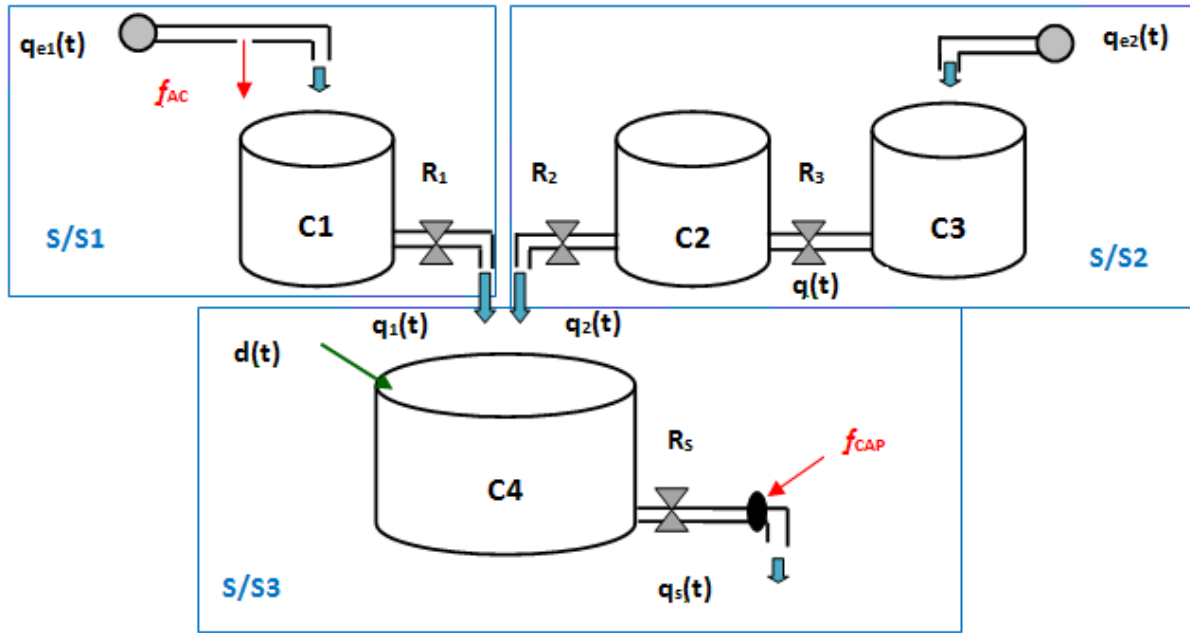


FIGURE 3.8 – Exemple 2

Le système est modélisé sous la représentation d'état suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-1}{a_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{a_2} & \frac{-b}{a_2} & 0 \\ \frac{1}{f} & \frac{1}{f} & 0 & \frac{-1}{f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{a_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{e1}(t) \\ q_{e2}(t) \end{pmatrix}$$

On a : $C_1 = 1, C_2 = 1, C_3 = 1, C_4 = 3, R_1 = 2, R_2 = 2, R_3 = 2, R_4 = 3,$

Avec : $a_1 = R_1 C_1, a_2 = R_2 R_3 C_2 C_3, b = R_3 C_3 + R_2 C_3 + R_2 C_2$ et $f = R_4 C_4$

3.9.2.2 Détection de défaut actionneur et défaut capteur

Trois grandeurs non mesurables affectent l'évolution du réseau, une fuite dans la canalisation d'alimentation du réservoir 1 noté f_{AC} et l'autre dans le capteur du réservoir 2 noté f_{CAP} , des

infiltrations dans le réservoir 4, notée $d(t)$ Les mesures sont affectées par des bruits de capteurs, notés $v_i(t)$.

Le système à surveiller supposé correctement décrit par la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + Bu + F_x f + D_x d \\ \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + F_y f + D_y d \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ v_4(t) \end{pmatrix} \end{cases}$$

Avec $v_i(t)$ le vecteur de bruit de mesure. Les diverses matrices de la représentation d'état sont les suivantes :

$$\begin{cases} A = \begin{pmatrix} -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.25 & -1.5 & 0 \\ 0.1111 & 0.1111 & 0 & -0.1111 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.25 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ D_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, F_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, F_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{cases}$$

Le rang de la matrice $CD_x = 1$ étant égal au nombre d'entrées à découpler, donc il est possible de construire un générateur de résidus sensible aux défauts et insensible à la perturbation.

On obtient :

$$\begin{aligned} L_y &= -F[(CF)^T(CF)]^{-1}(CF)^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \\ E &= I + L_y C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, N = EB = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.25 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

M est une matrice Hurwitz, diagonale et les valeurs propres comme suite.

$$\lambda_1 = -1; \lambda_2 = -3; \lambda_3 = -2; \lambda_4 = -1$$

$$M = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Calculons la matrice P telle que $PC = EA - ME$, comme C est unitaire, et après les calculs on trouve la matrice suivante :

$$P = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & -0.25 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On obtient le reconstituer à entrées inconnues ayant la structure suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0 & -0.25 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} e_{y_1} \\ e_{y_2} \\ e_{y_3} \\ e_{y_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} - C \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 + y_2 \\ z_3 \\ z_4 + y_4 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

3.9.2.3 Calcul Théorique des Résidus

Calcul de la matrice de transfert reliant les défauts à l'erreur d'estimation en sortie :
La matrice de transfert $G_f = C(pI - M)^{-1}(F + pF) - F_y$, on a :

$$\begin{aligned} F &= ML_y F_y + PF_y - EF_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ F' &= -L_y F_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Le vecteur de résidus s'écrit alors

$$\begin{aligned} R(p) &= Q(p)Q_d(p)G_f(p)f(p) \\ r(p) &= \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{f11} & G_{f12} \\ G_{f21} & G_{f22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{AC1} \\ f_{AC2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$G_{f11} = \frac{-p^3 - 7p^2 - 14.85p - 8.854}{p^4 + 8p^3 + 21.85p^2 + 23.71p + 8.854}$$

$$G_{f12} = 0$$

$$G_{f21} = 0$$

$$G_{f22} = \frac{-0.25p^3 - 1.346p^2 - 1.941p - 0.8455}{p^4 + 8p^3 + 21.85p^2 + 23.71p + 8.854}$$

Selon la matrice de transfert $G_f(p)$, on obtient une structure directement localisante, elle résulte un découplage de la perturbation.

La table de signature associée à ce générateur de résidus est dressée dans le tableau 3.6. Dont "1" signifie l'apparition de défaut affectant le résidu r_{ij} et "0" l'insensibilité de ce dernier par rapport au défaut.

	f_{AC}	f_{CAP}
r_1	1	0
r_2	0	1

TABLE 3.6 – Table des signatures désirée

D'après la table de signature, on remarque que les résidus sont insensibles aux perturbations $d(t)$ avec une structure permettant la localisation complète des défauts. Vérifions maintenant ces résultats théoriques en simulation par implémentation de l'observateur UIO qui estime les deux défauts f_{AC} et f_{CAP} , dont la table de signature est élaborée à partir du raisonnement suivant :

L'observateur reconstruit le résidu 1 et le résidu 2 du système, si cette sortie présente un défaut alors il sera estimé et représentera directement le défaut. Donc, si les résidus r_1 ou r_2 s'écartent de l'intervalle de seuil, on est certain de l'apparition d'un défaut f_{AC} ou f_{CAP} .

Donc avec cet observateur, on détecte et on localise les deux défauts actionneur et capteur même s'ils apparaissent simultanément sur les deux sorties.

Dans l'application, on suppose que les deux défauts actionneur et capteur sont définis comme suit :

$$f_{AC} = \begin{cases} -4 & t \geq 5 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$f_{CAP} = \begin{cases} 14 & t \geq 3 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La figure (3.9) présente le fichier SIMULINK utilisé à cet effet.

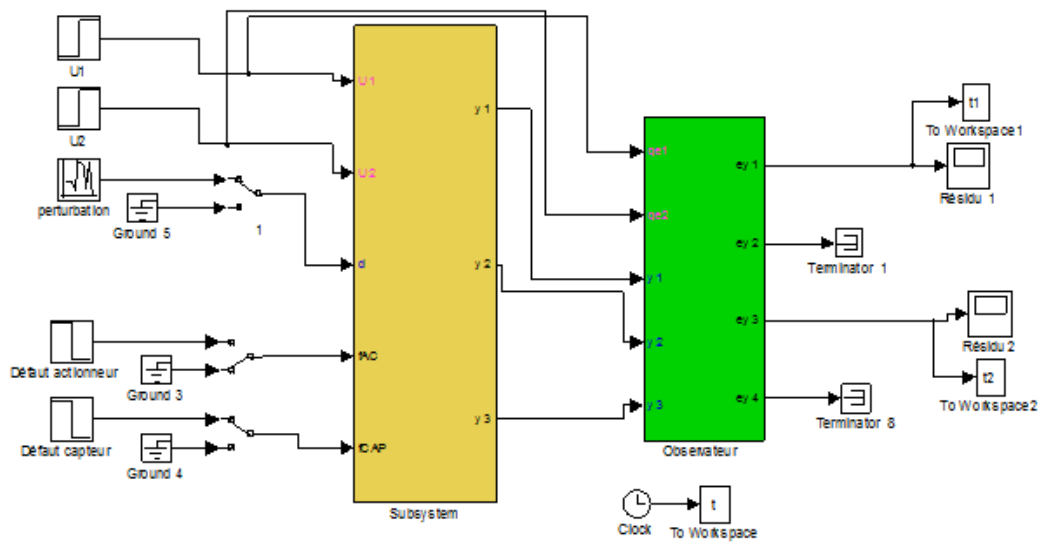


FIGURE 3.9 – Simulink utilisé pour la simulation d'exemple 2

3.9.2.4 Résultat et Interprétation

En simulant successivement l'apparition d'un défaut du premier actionneur d'amplitude -4 à l'instant $t \leq 5s$ et d'un défaut capteur d'amplitude -14 à l'instant $t \geq 5s$.

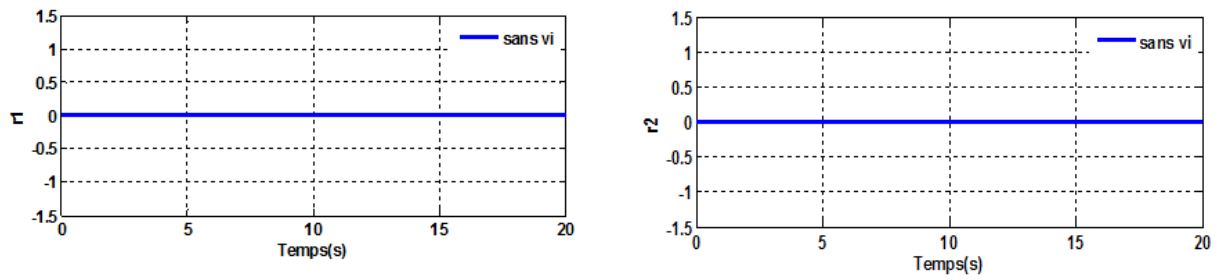
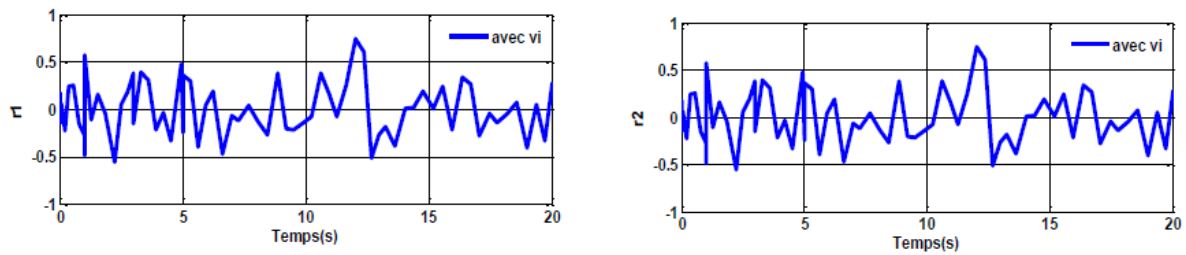
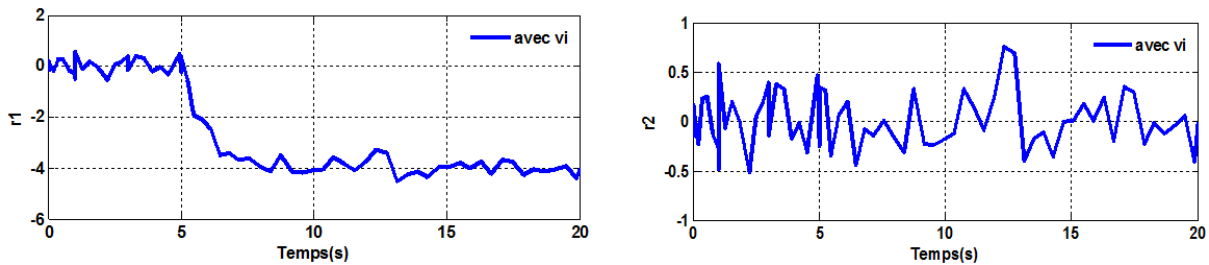
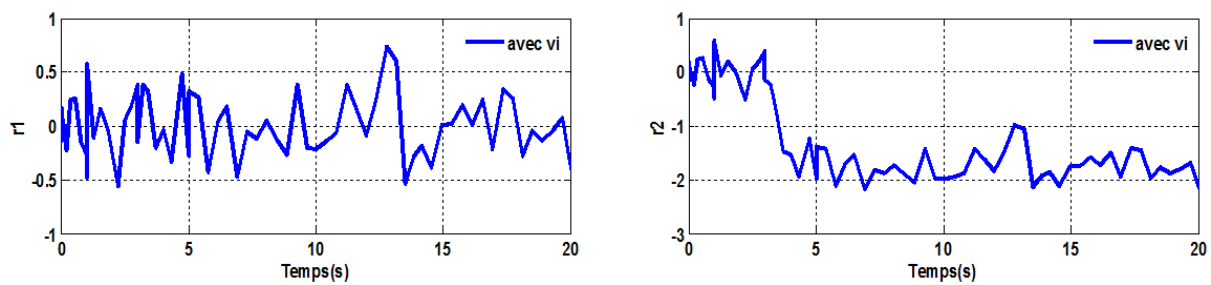
La simulation du système présenté dans la section précédente permet de retrouver les résidus illustrés dans les figures. Figure 3.10 montre que les deux résidus sont parfaitement découplés de la perturbation $d(t)$.

Par la suite, des signaux aléatoires seront superposés aux mesures afin de prendre en compte l'influence des bruits de mesures $v_i(t)$. Figure 3.11 indique les deux résidus en l'absence de défauts sont statiquement nuls.

Le résultat sur la figure 3.12 montre que le résidu r_i est sensible au défaut actionneur f_{AC} à l'instant $t \leq 5s$ par contre le résultat de deuxième résidu r_2 montre insensibilité à ce défaut.

Figure 3.13 montre que le résidu r_1 est insensible au défaut actionneur f_{CAP} de telle sorte que le résidu r_2 montre sa sensibilité au défaut actionneur f_{CAP} à l'instant $t \geq 3s$. Les résultats de simulation des figures 3.12, 3.13 évoluent conformément à la table des signatures précédemment obtenue en calcul théorique.

L'utilisation de cet observateur dédié pour l'estimation de chaque défauts f_{AC} , f_{CAP} permet la détection et la localisation des défauts selon la table de signature théorique, car la structure de la table de signature obtenue est localisante (signature différent pour f_{AC} et f_{CAP}). Les résultats de la simulation trouvés confirmé l'efficacité de l'approche suggérée.

FIGURE 3.10 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et sans défautFIGURE 3.11 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et bruit de mesure et sans défautFIGURE 3.12 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec bruit de mesure et avec défaut f_{CA} FIGURE 3.13 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec bruit de mesure et avec défaut f_{CAP}

Une détection robuste des défauts a été considérée. Une application d'un système hydraulique de quatre réservoir a été développé ; dont l'algorithme de diagnostic des défauts a été testé en simulation en présence et en absence de perturbations vis-à-vis de la présence de bruit de mesures pour rapprocher à la réalité. Les résultats obtenus ont validé l'efficacité de l'approche proposée.

3.10 Conclusion

La méthode dite de découplage parfait, proposée et testée sur ces deux exemples de systèmes nous a permis d'obtenir d'excellents résultats concernant la détection et la localisation de défauts actionneurs, capteurs, avec la présence d'entrées inconnues et bruits de mesure. Le problème de sensibilité aux défauts est presque résolu toute proportion gardée du fait que le nombre de ces entrées inconnues reste inférieur au nombre de mesures mais il est rare que l'on puisse atteindre cet objectif de découplage parfait. Pour cette raison, la problématique de détection peut être redéfinie comme un problème de découplage approché optimal. Cette méthode repose sur une technique récemment utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation convexe « le solveur CVX ou YALMIP », se sera l'objet du chapitre quatre.

Synthèse d'observateur avec découplage approximatif

Sommaire

4.1 Introduction	69
4.2 Formulation du problème d'optimisation de détection robuste au diagnostic	70
4.3 Description	72
4.4 La formulation LMI de H_∞	73
4.5 La formulation LMI de H_-	73
4.6 Conception d'un UIO avec découplage approché optimal	74
4.7 Synthèse mixte H_∞/H_- du générateur de résidus	75
4.7.1 Exemple Illustratif	77
4.7.2 Résultats et Discussion	82
4.8 Conclusion	83

4.1 Introduction

Lorsque les conditions de découplage parfait ne sont pas réunies on passe au découplage approché optimal. En tant que le découplage parfait des entrées inconnues n'est pas toujours possible. Dans ces conditions, le principe du découplage approché optimal est développé.

Cette approche employée dans le domaine de la détection et de la localisation robuste des défauts est l'utilisation d'observateur de diagnostic robustes de type H_∞ investigué dans [Henry 2005]. Cet observateur vise deux aspects : la robustesse aux perturbations et la sensibilité aux défauts. L'index H_∞ optimise les performances de sensibilité aux défauts alors que l'index H_- minimise simultanément l'influence des entrées inconnues sur une large classe de perturbations du modèle.

La synthèse directe de l'observateur (UIO) de détection de défauts comme générateur de résidus utilise une formulation LMI de la minimisation de la norme de H_∞ et de la maximisation de la norme de H_- afin d'obtenir la matrice de variation K, V. En d'autres termes, le but est de concevoir le générateur de résidus qui a la meilleure robustesse aux perturbations et la meilleure sensibilité aux défauts en maximisant la sensibilité a ceux-ci et en minimisant la sensibilité aux perturbations .Ce problème est quantifié par un critère basé sur le ratio entre deux normes H_∞/H_- (un problème d'optimisation).

On note que les fausses alarmes proviennent du fait que toutes les incertitudes du système n'ont pas été modélisées. C'est pourquoi en introduit leurs matrices d'états dans les équations

de synthèse de l'observateur UIO de génération des résidus, dont la prise de décision nécessite la comparaison de l'indicateur des défauts avec le seuil obtenu de manière empirique ou théorique.

D'autre part, les performances d'un tel système se mesurent tout naturellement par sa sensibilité vis-à-vis des phénomènes dont l'effet peut être interprété comme anormal, tout en minimisant le taux de non détection ainsi que le retard à la détection. Ce problème a fait également l'objet de nombreux travaux durant les deux dernières décennies qui ont été très riches en termes de résultats méthodologiques. Les techniques dites de découplage approximatif dans le concept « observateurs à entrées inconnues » (UIO, [Ragot 1993], [Maquin 1994], [Chen 1999]. Plus récemment, les observateurs H_+/H_- [Chen 1999], [Rank 1999]) ont été proposés pour satisfaire aux contraintes de sensibilité/robustesse, où le problème d'optimisation est formulé et résolu par des techniques LMI.

De très bons états de l'art sur l'analyse de ces méthodes peuvent être trouvés dans la liste non exhaustive des références suivantes [Golub 1991], [Rambeaux 2000], [Ding 2000], [Wang 2007], ils ont fait intervenir la norme H_∞ , H_- , qui reflètent respectivement la valeur maximale et minimale des gains entre les signaux dans l'optimisation des résidus.

D'autres critères ont été proposés avec des normes de type, H_2 [Frank 1990], H_∞ [Ding 1993], H_- [Ding 2000]. L'avancée des techniques d'optimisation, notamment celles liées aux approches robustes et l'utilisation de LMI (inégalités Matricielles Linéaires) qui est devenue un thème actif, permettent la synthèse de générateurs de résidus optimisant des critères fréquentiels [Zolgadri 2006], [Henry 2005], [Castang 2002].

Dans ce contexte, la génération des résidus des systèmes à base de modèles linéaires a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant cet observateur d'état, parmi ces chercheurs [Ding 2002], [Jiang 2005], [Johansson 2006], [Meseguer 2010], [Khan 2011], [Chen 1999], [Mangoubi 1998], [Rank 1999], [Henry 2005] et [Toscano 2011], dans son livre a proposé une nouvelle structure de générateur de résidus robuste.

4.2 Formulation du problème d'optimisation de détection robuste au diagnostic

Cette partie est consacrée à la définition du problème détection robuste. Nous précisons les propriétés de robustesse et de sensibilité que doit posséder le vecteur de résidus pour permettre la détection et l'isolation des phénomènes considérés anormaux. Le problème de la détection robuste (découplage approximatif) est formulé comme un problème d'optimisation convexe de type min/max sous contraintes et pouvant être résolu efficacement par les techniques LMI (Inégalités Linéaires Matricielles) Une méthode est identifiée pour résoudre ce problème : la méthode à base d'observateur à entrées inconnues.

Le problème de diagnostic peut être abordé d'une manière différente en formulant de façon explicite les objectifs de robustesse et de sensibilité lors de la synthèse des résidus.

Ainsi, idéalement, le vecteur de résidus doit être nul en fonctionnement normal et présenter un changement de comportement statistique significatif en présence d'une défaillance.

Autrement dit, l'ensemble des perturbations d ne doit pas, contrairement aux défauts f , affecter le résidu. Pour illustrer le concept, considérons que le système à surveiller est commandé en boucle ouverte. Le signal de commande $u(t)$ est donc parfaitement connu et n'influe pas sur les propriétés du signal indicateur de défauts. Aussi, on admettra que le résidu $r(t)$ ne dépend

4.2. Formulation du problème d'optimisation de détection robuste au diagnostic 71

que des vecteurs de perturbations d et de défaillances f , via une fonction vectorielle Ψ , telle que :

$$r(t) = \Psi(d(t), f(t)) \quad (4.1)$$

Les objectifs du problème de la détection et la localisation robustes de défauts) peuvent alors s'exprimer comme :

$$\begin{cases} \Psi(d(t), 0) = 0 \\ \Psi(d(t), f(t)) \neq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Ces objectifs expriment un découplage parfait entre les effets des perturbations et des défauts. Il est rare que l'on puisse atteindre cet objectif de découplage parfait. Pour cette raison, la problématique de détection peut être redéfinie comme un problème de découplage approximatif :

$$\begin{cases} \|\psi(d(t), 0)\|_p < \gamma \\ \|\psi(d(t), f(t))\| > \beta \end{cases} \quad (4.3)$$

où $\|\cdot\|_p$ avec $p = \{1, 2, \infty\}$ est une norme et où γ et β représentent les niveaux respectifs de robustesse vis-à-vis des perturbations d et de sensibilité vis-à-vis des défauts f . Autrement dit, d'un point de vue synthèse, le problème de détection et la localisation robuste de défaut consiste à construire des signaux indicateurs de défauts qui soient le plus robuste possible vis-à-vis des entrées inconnues et le plus sensible possible vis-à-vis de tout phénomène dont l'effet peut être interprété comme un défaut agissant sur le système. Il s'agit donc typiquement d'un problème d'optimisation de type min / max.

Qualitativement, le problème de robustesse se traduit par la génération d'un vecteur de résidus r de telle sorte que le rapport entre une mesure (par exemple la norme2) de r et une mesure du vecteur des entrées inconnues d soit minimisé. De même, on peut considérer que la contrainte de sensibilité revient à générer un vecteur de résidus de telle sorte que le rapport entre cette même mesure de l'erreur d'estimation r et une mesure du vecteur de défaut f soit maximisé.

Ce qui revient à formuler le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{cases} \min \sup_{\|d\| \neq 0} \frac{\|r\|_2}{\|d\|_2} \\ \max \inf_{\|d\| \neq 0} \frac{\|r\|_2}{\|f\|_2} \end{cases} \quad \forall \omega \in \Omega \quad (4.4)$$

Où Ω est une zone de fréquence spécifiée sur laquelle la sensibilité de r vis-à-vis de f doit être atteinte.

En termes d'opérateurs, ces relations sont équivalentes à un problème de min / max qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{cases} \min \|G_d\|_\infty \\ \max \inf \|G_f\|_- \end{cases} \quad (4.5)$$

Où :

- $\|G_d\|_\infty$ représente la norme H_∞ du transfert entre le signal indicateur ? et les perturbations d .

- $\|G_f\|_-$ représente l'index H_- du transfert entre le signal indicateur r et les défauts à détecter f .
- L'index H_- est défini sur une zone de fréquences spécifiée sur laquelle on cherche à atteindre l'objectif de sensibilité.

Le problème consiste à générer de résidu tel que :

$$\begin{cases} \sup \bar{\sigma}(G_d(jw)) < \gamma \\ \inf \bar{\sigma}(G_f(jw)) > \beta \end{cases} \quad (4.6)$$

Où

- $\bar{\sigma}$ et $\underline{\sigma}$ représentent respectivement la plus grande et la plus petite valeur singulière.
- $G_f(jw)$ et $G_d(jw)$ les matrices de transfert reliant les résidus respectivement aux défauts et aux entrées inconnues.
- α et β sont les niveaux de sensibilité par rapport aux perturbations d et f .
- γ doit prendre la plus petite valeur singulière de G_d et β la plus grand valeur singulière de G_f .

$$J_{+/-} = \frac{\|G_d(s)\|_\infty}{\|G_d(s)\|_-} \quad (4.7)$$

[Toscano 2011] a proposé une nouvelle structure de générateur de résidus robuste où le problème d'optimisation est formulé en LMI(Lyapunov) pour permettre une meilleure souplesse dans la synthèse du d'observateur et qui assure aussi bien la stabilité que l'atténuation des perturbations du l'observateur. Nous allons présenter l'approche qui permet de résoudre ce problème d'optimisation min / max, en se basant sur les outils récents le solveur CVX(20) ou le solveur YALMIP.

4.3 Description

Soit $G_f(s, K, V)$ et $G_d(s, K, V)$ les matrices de transfert reliant les résidus respectivement aux défauts et aux entrées inconnues et V sont des matrices de réglage. Nous dirons que le générateur de résidus présente un niveau de sensibilité minimum β par rapport aux défauts si $\|G_f(s, K, V)\|_- > \beta$, ou $\|G_f(s, K, V)\|_-$ désigne l'index H_- de la matrice de transfert G_f .

De la même façon nous dirons que le générateur de résidus présente un niveau de sensibilité maximum γ par rapport aux entrées inconnues si $\|G_f(s, K, V)\|_\infty < \gamma$, ou $\|G_f(s, K, V)\|_\infty$ désigne la norme H_∞ de la matrice de transfert G_d . Bien entendu, il convient d'utiliser les matrices K, V de manière à rendre β le plus grand possible et γ le plus petit possible. Il s'agit donc de résoudre problème d'optimisation suivant :

$$\min_{K, V} \frac{\|G_d(s, K, V)\|_\infty}{\|G_f(s, K, V)\|_-} \quad (4.8)$$

Bien entendu, il convient d'utiliser les matrices K, V dans le contexte de résoudre le problème d'optimisation.

$$\min_{K, V} \frac{\|G_d(s, K, V)\|_\infty}{\|G_f(s, K, V)\|_-} \quad (4.9)$$

Où : $G_f(p, K, V)$ et $G_d(p, K, V)$ les matrices de transfert reliant les résidus respectivement aux défauts et aux entrées inconnues, K et V sont des matrices de réglage.

Nous allons présenter par la suite, l'approche qui permet de résoudre ce problème min / max sous la forme d'Inégalités Matricielles Linéaires (LMIs) très simplifiées, ce qui permet une résolution numérique rapide et précise.

4.4 La formulation LMI de H_∞

Soit $G(s)$ une matrice de transfert stable et propre avec une représentation d'état; d'où $\|G(s)\|_\infty < \gamma$ telle que si l'on trouve : $V(x(t)) = x^T P x$ d'où $\dot{V} = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}$

Avec

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$P =$ matrice symétrique définie positive (valeurs propre réelles) $p = p^T$.

L'expression de \dot{V} s'écrit :

$$x^T(A^T P + PA + C^T C)x + x^T(PB + C^T D)u + u^T(B^T P + D^T C)x + u^T(D^T D - \gamma^2 I)u < 0 \quad (4.10)$$

$$\begin{pmatrix} x^T & u^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^T P + PA + C^T C & PB + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} < 0 \quad (4.11)$$

Par conséquent, la norme de $G(s)$ telle que $\|G(s)\|_\infty < \gamma$, où γ est un nombre positif donné, si l'on peut trouver $P = P^T > 0$ vérifiant l'inégalité matricielle linéaire LMI :

$$\begin{pmatrix} A^T P + PA + C^T C & PB + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} < 0 \quad (4.12)$$

avec minimisation de γ^2

En recherchant la plus petite valeur possible de $\gamma > 0$ satisfaisant la LMI si dessus .donc il s'agit de résoudre un problème d'optimisation convexe.

4.5 La formulation LMI de H_-

On a : $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ si on peut trouver V tel que :

$$V(x(t)) = x^T P x \quad \text{d'où} \quad \dot{V} = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x}$$

avec $\dot{x} = Ax + Bu$, ($P =$ matrice symétrique définie positive (valeurs propres réelles)) $p = p^T$, $\beta_{rel} > 0$.

On a

$$-\dot{V} + (x(t)) + y^T(t)y(t) - \beta^2 u^T(t)u(t) > 0 \quad (4.13)$$

H_- l'index de $G(s)$ tel que $\|G(s)\|_- > \beta$,

L'intégralité (4.13) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$x^T(A^T P + PA + C^T C)x + x^T(PB + C^T D)u + u^T(B^T P + D^T C) + u^T(D^T D - \beta^2 I) > 0 \quad (4.14)$$

$$\begin{pmatrix} x^T & U^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^T P + PA + C^T C & PB + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \beta^2 I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix} > 0 \quad (4.15)$$

Par conséquent, l'index de $G(s)$ telle que $\|G(s)\|_- > \beta$, où β est un nombre positif donné, si l'on peut trouver $P = P^T > 0$ vérifiant l'inégalité matricielle linéaire LMI :

$$\begin{pmatrix} A^T P + PA + C^T C & PB + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \beta^2 I \end{pmatrix} > 0$$

avec maximisation de β^2 .

En recherchant la plus petite valeur possible de $\beta > 0$ satisfaisant la LMI si dessus .donc il s'agit de résoudre un problème d'optimisation convexe.

4.6 Conception d'un UIO avec découplage approché optimal

En effet, d'une manière ou d'une autre, le découplage parfait ne peut être mis en œuvre que si le nombre de mesures indépendantes est supérieur au nombre des entrées inconnues que l'on souhaite découpler. Sur le plan pratique, cette condition de découplage n'est pas toujours satisfaite.

La modélisation imparfaite du système agit sur la détection et la localisation des défauts ce qui nous ramène à disposer d'un nouveau modèle qui prend en compte les incertitudes de modélisation et l'effet des défauts sur le comportement du système nominal.

Soit le système à surveiller supposé correctement décrit par la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_y f(t) + D_y d(t) \end{cases} \quad (4.16)$$

Avec

$$x(t) \in \mathbb{R}^n, u(t) \in \mathbb{R}^m, d(t) \in \mathbb{R}^{nd}, f(t) \in \mathbb{R}^{nf}$$

Où D_x et D_y représentent des matrices d'action des perturbations $d(t)$, F_x et F_y sont les matrices d'action des défauts $f(t)$ à détecter.

La structure du générateur de résidus (UIO) avec découplage approché optimal adoptée est la suivante [Toscano 2011] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t) \\ r(t) = V(y(t) - \hat{y}(t)) \end{cases} \quad (4.17)$$

Où $r(t)$ est le vecteur des résidus, du problème d'optimisation (4.9).

Le schéma bloc d'observateur d'entrée inconnue est représenté sur la figure 4.1.

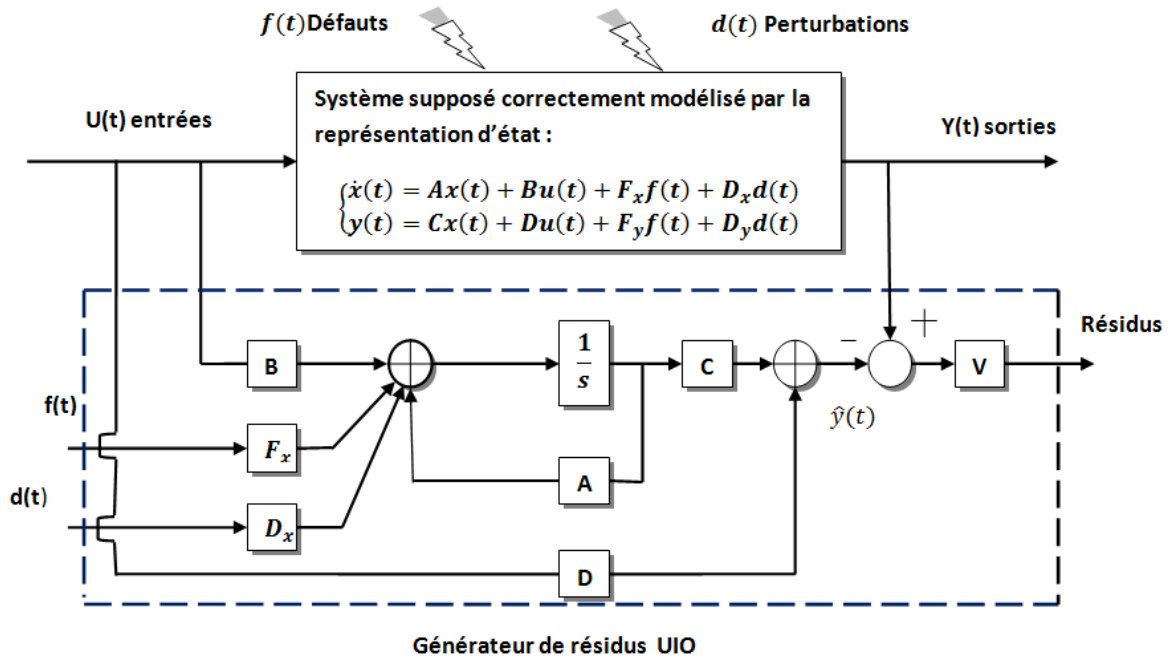


FIGURE 4.1 – Schéma bloc de l'observateur UIO avec découplage approximatif

Soit $e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ erreur d'estimation d'état.

On a :

$$\begin{cases} \dot{e}_x(t) &= (A - KC)e_x + (F_x - KF_y)f(t) + (D_x - KD_y)d(t) \\ r(t) &= VCe_x(t) + VF_y f(t) + VD_y d(t) \end{cases} \quad (4.18)$$

En utilisant la transformée de Laplace de $r(t)$ (conditions initiales nulles), on obtient la dynamique d'un générateur de résidus peut être formulée comme suit :

$$r(p) = G_f(p, K, V)f(p) + G_d(p, K, V)d(p) \quad (4.19)$$

Où les matrices de transferts G_f et G_d , sont données par :

$$G_f(p, K, V)f(p) = VC[pI - (A - KC)]^{-1}(F_x - KF_y) + VF_y \quad (4.20)$$

$$G_d(p, K, V)d(p) = VC[pI - (A - KC)]^{-1}(D_x - KD_y) + VD_y \quad (4.21)$$

Afin d'aboutir à une résolution efficace nous introduisons une formulation LMI du problème d'optimisation qui vérifie les deux conditions robustesse/sensibilité.

On peut remarquer que la dynamique des résidus dépend non seulement de f mais aussi de d .

4.7 Synthèse mixte H_∞/H_- du générateur de résidus

Pour résoudre le problème d'optimisation, on vérifie les deux contraintes H_∞/H_- sous forme LMI en utilisant les conditions de robustesse et de sensibilité noté respectivement.

– **Condition de robustesse**

Il s'agit de rendre le générateur de résidus le moins sensible possible aux entrées inconnues. Cette exigence peut être satisfaite en imposant :

$$\|G_d\|_\infty < \gamma \quad (4.22)$$

Si l'on peut trouver trois matrices $P = P^T > 0$, K et V telles que l'inégalité matricielle suivante soit satisfaite :

$$\begin{pmatrix} (A - KC)^T P + P(A - KC) + C^T V^T V C & P(D_x - KD_y) + C^T V^T V D_y \\ (P(D_x - KD_y) + C^T V^T V D_y)^T & D_y^T V^T V D_y - \gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (4.23)$$

On remarque que l'inégalité précédente (4.23) présente l'inconvénient d'être non linéaire par rapport aux variables K , P , V . Une méthode de résolution peut être utilisée pour un Changement de variables qui nous permet d'avoir une LMI linéaire.

Posons

$$Q = V^T V, \quad L = PK$$

D'où :

$$\begin{pmatrix} A^T P + PA - LC - C^T L^T + C^T Q C & P D_x - L D_y + C^T Q D_y \\ (P D_x - L D_y + C^T Q D_y)^T & D_y^T Q D_y - \gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (4.24)$$

L'inégalité (4.24) est alors un problème de type LMI (Inégalité linéaire matricielle) et sa résolution est par rapport à L , P et Q pour une valeur de γ donnée.

– **Condition de sensibilité aux défauts**

L'obtention de la robustesse ne doit pas se faire au détriment de la sensibilité aux défauts. Il s'agit donc non seulement de rendre le générateur de résidus peu sensible aux entrées inconnues mais également de le rendre le plus sensible possible aux défauts. Cette condition peut être satisfaite en introduisant :

$$\|G_f\|_- > \beta$$

Si l'on peut trouver $P = P^T > 0$, K et V permettant de satisfaire cette inégalité matricielle qui n'est pas linéaire.

$$\begin{pmatrix} C^T V^T V C - (A - KC)^T P - P(A - KC) & C^T V^T V F_y - P(F_x - K F_y) \\ (C^T V^T V F_y - P(F_x - K F_y))^T & F_y^T V^T V F_y - \beta^2 I \end{pmatrix} > 0 \quad (4.25)$$

Effectuant le changement de variable pour passer à la linéarité suivant :

$$Q = V^T V, \quad L = PK$$

D'où

$$\begin{pmatrix} C^T Q C - A^T P - PA + C^T L^T + LC & C^T Q F_y - P F_x + L F_y \\ (C^T Q F_y - P F_x + L F_y)^T & F_y^T Q F_y - \beta^2 I \end{pmatrix} > 0 \quad (4.26)$$

– Synthèse mixte H_∞/H_- du générateur de résidus

En introduisons maintenant la synthèse mixte avec

$$g = \gamma^2 \text{ et } b = \beta^2, P = P^T > 0.$$

Où P est une matrice symétrique définie positive.

Si $P = P^T > 0$

$$\begin{pmatrix} A^T P + PA - LC - C^T L^T + C^T Q C & P D_x - L D_y + C^T Q D_y \\ (P D_x - L D_y + C^T Q D_y)^T & D_y^T Q D_y - g I \end{pmatrix} < 0 \quad (4.27)$$

$$\begin{pmatrix} C^T Q C - A^T P - PA + C^T L^T + LC & C^T Q F_y - P F_x + L F_y \\ (C^T Q F_y - P F_x + L F_y)^T & F_y^T Q F_y - b I \end{pmatrix} > 0 \quad (4.28)$$

Soit $P_{opt}, L_{opt}, g_{opt}$ qui regroupe la solution du problème d'optimisation.

Les matrices K_{opt}, V_{opt} du générateur de résidus robuste sont donnée par

$$K_{opt} = P_{opt}^{-1} L_{opt}, V_{opt} = Q_{opt}^{\frac{1}{2}}$$

4.7.1 Exemple Illustratif

Pour montrer la validité de générateur de résidu défini précédemment, nous présenterons l'exemple illustratif, on considère le modèle selon la représentation d'état (4.6) suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_y f(t) + D_y d(t) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{pmatrix} -2.121 & -0.5624 & -0.2651 & -0.25 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, F_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \\ D_x = \begin{pmatrix} 0.02 & -0.02 & 0 \\ 0.02 & 0.1 & 0 \\ 0.02 & -0.02 & 0 \\ 0.02 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} C = \begin{pmatrix} -1.414 & -0.4374 & -0.1768 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = 0 \\ \\ F_y = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, D_y = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

On suppose que ce système possède quatre défauts actionneurs et deux capteurs avec F_x et F_y les matrices d'action des défauts $f(t)$ à détecter.

D_x la matrice d'application des entrées inconnues sur l'état.

Dans cette application, La sortie $y(t)$ et les états internes supportent des entrées inconnues

additives $d(t)$.

Le problème d'optimisation convexe est résolu sous le logiciel numérique Matlab, le programme créé est basé sur les commandes des solveurs $cvx(20)$ (SDP(Semi définitive program)-LMI). Ces solveurs sont connus par leur rapidité de résolution numérique, leur précision et leur robustesse.

Les matrices de variation K et V sont les solutions du problème d'optimisation.

Pour un $b = 0.1$, $\beta = \sqrt{b} = 0.3162$, $\gamma_{opti} = 1.1385$.

où γ_{opti} représente le critère du pire cas de l'effet des perturbations sur les résidus. Plus γ_{opti} est petit, plus le générateur de résidus est robuste. Quant β , il représente la mesure de la sensibilité du défaut dans le pire cas. Plus est grand, plus β le générateur de résidu est sensible et plus les défauts sont faciles à détecter.

On a :

$$V = \begin{pmatrix} 0.4125 & -0.2617 \\ -0.2617 & 0.6622 \end{pmatrix}, K = \begin{pmatrix} 0.4278 & -0.0313 \\ 0.0919 & 0.3649 \\ -0.1896 & -0.7829 \\ -0.0613 & 0.6027 \end{pmatrix}$$

$$r(p) = G_f(p, K, V)f(p) + G_d(p, K, V)d(p)$$

Où G_f la matrice de transfert qui relie les défauts avec le vecteur résidu est :

$$G_f(p, K, V) = VC[pI - (A - KC)]^{-1}(F_x - KF_y) + VF_y$$

$$G_f(p, K, V) = \begin{pmatrix} G_{f11} & G_{f12} \\ G_{f21} & G_{f22} \end{pmatrix}$$

Avec G_{fij} définit comme suite :

$$G_{f11} = \frac{0.825P^4 + 1.744P^3 + 1.992P^2 + 1.522P + 0.8463}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$G_{f12} = \frac{-0.5234P^4 - 1.091P^3 - 1.271P^2 + 0.998P + 0.5492}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$G_{f21} = \frac{-0.5234P^4 - 1.046P^3 - 1.122P^2 - 0.8317P + 0.3929}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$G_{f22} = \frac{1.324P^4 + 2.802P^3 + 3.162P^2 + 2.352P + 1.317}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

La matrice de transfert G_d qui relie l'entrée inconnue au vecteur résidu :

$$G_d(p, K, V) = VC[pI - (A - KC)]^{-1}(D_x - KD_y) + VD_y$$

$$G_d(p, K, V) = \begin{pmatrix} G_{d11} & G_{d12} \\ G_{d21} & G_{d22} \end{pmatrix}$$

Avec G_{dij} la fonction de transfert de la matrice de transfert G_d

$$G_{d11} = \frac{-0.01971P^3 - 0.03173P^2 - 0.02286P - 0.01694}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$G_{d12} = \frac{0.4125P^4 + 1.074P^3 + 1.466P^2 + 1.133P + 0.71}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$G_{d21} = \frac{0.02243P^3 + 0.0376P^2 + 0.03341P + 0.03458}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$G_{d22} = \frac{-0.2617P^4 - 0.6014P^3 - 0.7642P^2 - 0.5314P - 0.5584}{P^4 + 2.229P^3 + 2.61P^2 + 1.962P + 1.133}$$

$$r(p) = \begin{pmatrix} G_{f11} & G_{f12} \\ G_{f21} & G_{f22} \end{pmatrix} f(p) + \begin{pmatrix} G_{d11} & G_{d12} \\ G_{d21} & G_{d22} \end{pmatrix} d(p)$$

Ensuite, une table de signatures théoriques est dressée dans le tableau 4.1. Dans la table des signatures, un "1" signifie qu'il est certain que le défaut f_i affecte le résidu r_i . Un "0" traduit l'insensibilité du résidu par rapport au défaut.

D'après $r(p)$; lorsque l'on évalue la valeur de la matrice de transfert G_f et G_d , quand $p \rightarrow \infty$, on vérifie que les éléments nuls correspondent à des 0 dans la table des signatures, et ceux qui sont non nuls à des 1 [Courtine 1997]

La table de signature s'écrit donc :

	f_1	f_2	d_1	d_2
Résidu1	1	1	0	1
Résidu2	1	1	0	1

TABLE 4.1 – Table de signatures théorique pas localisante

La structure du générateur de résidus adoptée est la suivante selon (4.7) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}(t) = \begin{pmatrix} -2.121 & -0.5624 & -0.2651 & -0.25 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.25 & 0 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} f(t) \\ \begin{pmatrix} 0.2 & -0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & -0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} d(t) \\ \hat{y} = \begin{pmatrix} -1.41 & -0.4374 & -0.1768 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x} \\ r(t) = V(y(t) - \hat{y}(t)) \end{array} \right.$$

Où $r(t)$ est le vecteur des résidus.

La table de signature 4.1 est élaborée à partir du raisonnement suivant :

L'observateur reconstruit le résidu 1 et le résidu 2 du système, si cette sortie présente un défaut alors il sera estimé et représentera directement le défaut. Donc, si les résidus r_1 ou r_2 s'écartent de l'intervalle de seuil, on est certain de l'apparition d'un défaut f_1 ou f_2 . Donc avec cet observateur, on a un bon niveau de détection des défauts.

Dans l'application, on suppose que les défauts f_1, f_2 sont définis pour $t \geq 3s$.

Le seuil de détection est fixé par des simulations sans défauts du générateur des résidus obtenus en fonctionnement sain, il est fixé entre $\pm\gamma > 1.1385$ (la plus grande valeur singulière de la fonction de transfert des entrées inconnues G_d).

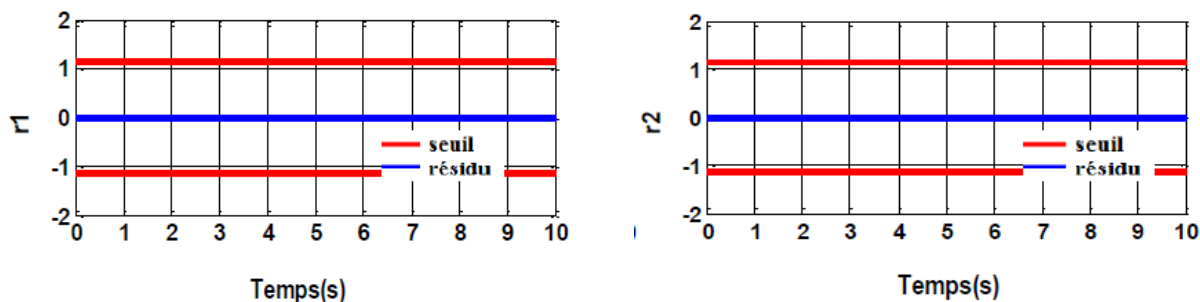


FIGURE 4.2 – Résidus r_1, r_2 sans perturbation et sans défaut

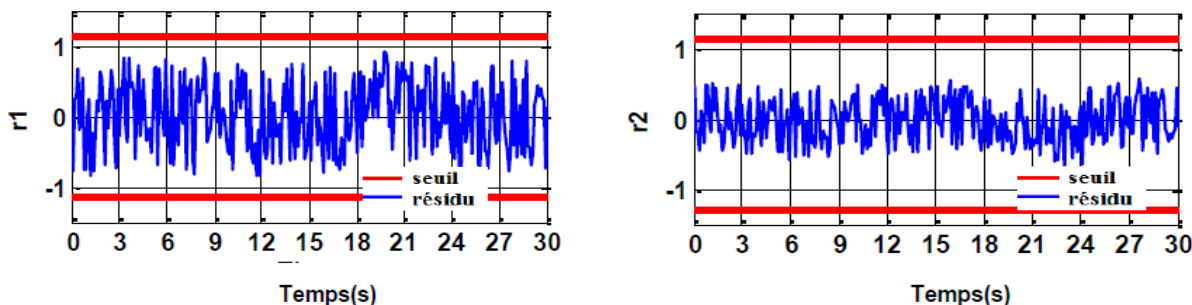


FIGURE 4.3 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et sans défaut

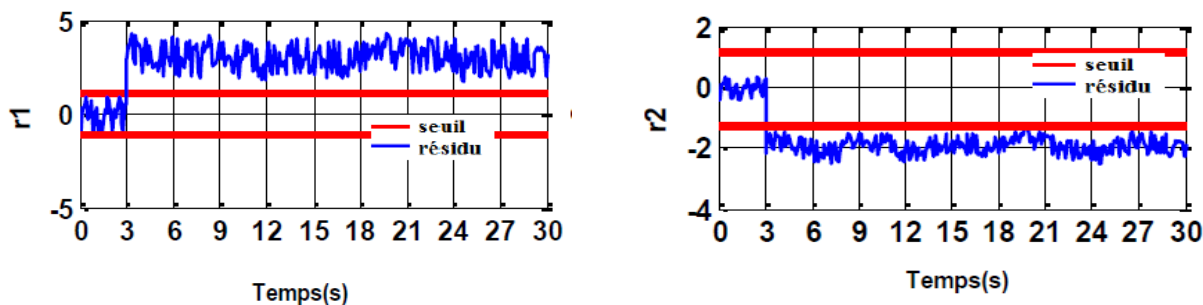
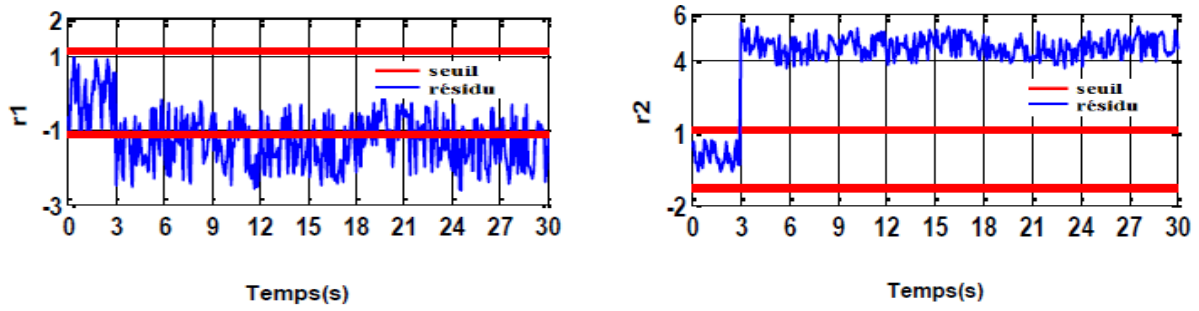
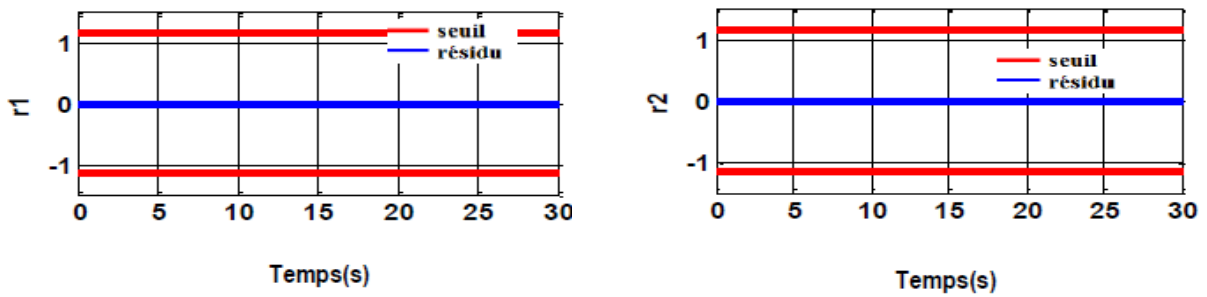
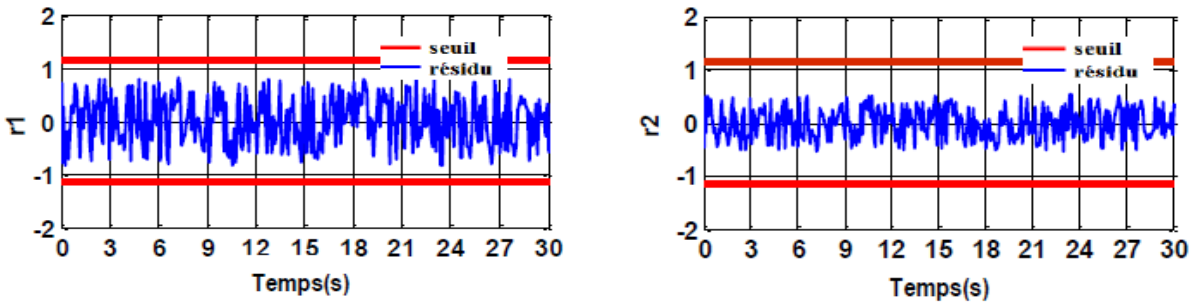
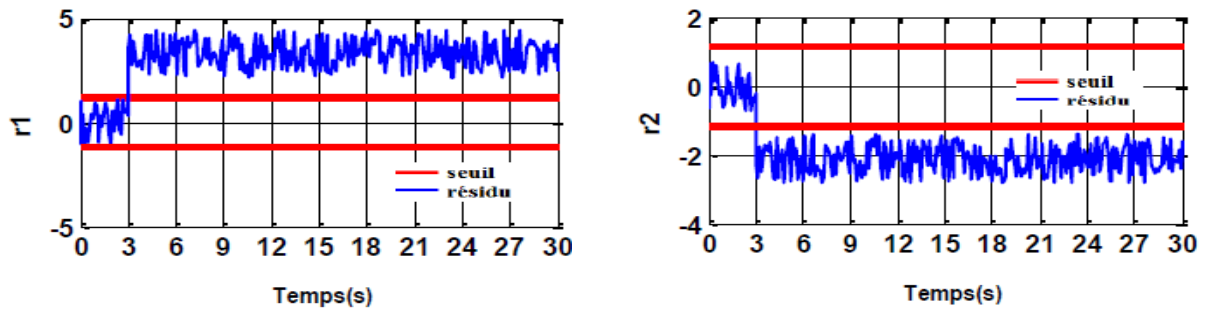
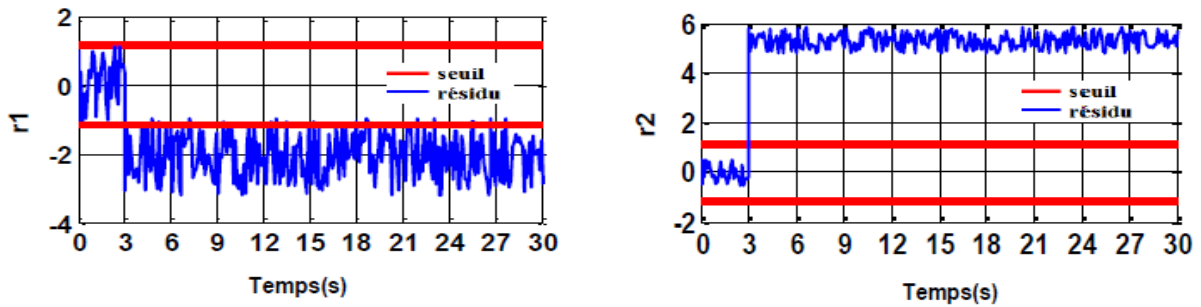


FIGURE 4.4 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_1

FIGURE 4.5 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_2 FIGURE 4.6 – Résidus r_1, r_2 sans perturbation et sans défautFIGURE 4.7 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et sans défautFIGURE 4.8 – Résidus r_1, r_2 avec perturbation et avec défaut f_1

FIGURE 4.9 – Résidus r_1 , r_2 avec perturbation et avec défaut f_2

4.7.2 Résultats et Discussion

L'utilisation de l'observateur proposé permet de concevoir un générateur de résidu pour atteindre un bon niveau de détection des défauts. La stratégie utilisée ici est de concevoir un observateur avec sensibilité minimale aux perturbations et sensibilité maximale aux défauts du système à surveiller. Pour l'exemple d'application, on dispose de deux sorties du système.

La simulation du système présenté dans la section précédente permet de retrouver les résidus illustrés dans les figures 4.2-4.9 avec le seuil de détection, qui est déterminé en fonctionnement normal du système. Le défaut affectant les deux résidus est un biais d'amplitude entre 3 et 4 survenant à l'instant 3s. L'analyse de résidu 1 et résidu 2 par observateur proposé permet de conclure qu'il y a bien un défaut.

Les figures 4.2-4.5 représentent les résultats théoriques, ainsi que les figures 4.6-4.9 indiquent les deux résidus associés à l'observateur en absence et en présence de défauts et de perturbations.

Les résultats de simulation de génération de résidu avec l'observateur UIO découplé approximativement aux entrées inconnues et les résultats théoriques de vecteur de résidu $r(p)$ sont bien corrélés seulement pour $r_1(p)$ est presque découplés des perturbations suite à la table de signature, ce qui semble révéler une meilleure robustesse de cette solution aux erreurs de modélisation.

L'observateur fournit respectivement les résidus r_1 et r_2 en l'absence de défauts et des perturbations illustrés par les figures 4.2 et 4.6.

L'observateur fournit respectivement les résidus r_1 et r_2 en l'absence de défauts et en présence des perturbations. Illustrés par les figures 4.3 et 4.7.

Les résidus r_1 et r_2 générés avec l'observateur indiquent qu'il y a un défaut à l'instant $t \geq 3s$ qui correspond à un défaut f_1 illustrés par les figures 4.4 et 4.8.

Quant au défaut f_2 , il apparaît sur les résidus r_1 et r_2 figures 4.5 et 4.9.

Remarque : D'après ces simulations, on note certains points intéressants.

- Les résultats de simulation des figures 4.2-4.5 correspondent à la table de signatures théoriques.
- Le fait d'utiliser cet observateur dédié pour l'estimation de chaque défauts f_1 et f_2 permet un bon niveau de détection. On remarque également que les fausses alarmes sont évitées.
- La structure de la table de signature obtenue n'est pas localisante (signature identique pour f_1 et f_2 Car le nombre de défauts est supérieur aux nombre des résidus). Dans cet exemple d'application on a deux défauts actionneurs et deux défauts capteurs selon f_x et f_y ceci engendre que les deux résidus ont les mêmes signatures (deux capteurs et six défauts), avec la condition de pouvoir localiser le nombre maximum de défauts localisables au moyen

d'un nombre q de résidus est de $2^q - 1$, ce qui n'est pas notre cas c'est la cause de la non localisation des défauts d'une table de signature.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de génération de résidu robuste des systèmes linéaires à été présentée. Elle utilise un observateur à entrée inconnue avec découplage approximatif afin de générer des résidus robuste capables de détecter des défauts. Ces résidus considérés sont représentés par cet observateur en utilisant des conditions de conception en particulier les contraintes robustesse/sensibilité formalisme en LMI. Lorsque les défauts à détecter affectent le système. Ces conditions permettant la synthèse de cet observateur est établie à l'aide de la méthode de Lyapunov et sous la forme de LMI dans l'objectif du diagnostic est de pouvoir mettre en évidence la présence des défauts malgré la présence des perturbations. La résolution de ces contraintes LMI est effectuée par la méthode basée sur un changement de variables et qu'on peut qualifier de méthode globale qui permet une détermination plus aisée des matrices décrivant l'observateur UIO. Un tel changement de variable n'est pas toujours possible, cela dépend de la structure de l'inégalité non linéaire initiale, que l'on peut résoudre facilement avec les outils numériques récents SDP du solveur cvx(20).

Nous avons montré, à travers l'exemple illustratif, dans quelle mesure la technique de la génération de résidu robuste proposée peut être exploitée dans un contexte de diagnostic des systèmes linéaires et qui a un bon niveau de détection de défauts (minimisation de nombre de fausse alarme).

Application à la détection de pannes dans un système hydraulique

Sommaire

5.1 Introduction	85
5.2 Système à cinq réservoirs	86
5.2.1 Description du système	86
5.2.2 Modèle mathématique du système	86
5.3 Linéarisation du système à cinq réservoirs	88
5.3.1 Calcul du point d'équilibre	88
5.4 Détection de défauts	91
5.4.1 Synthèse de générateur de résidu à base observateur UIO à découplage parfait	91
5.5 Calcul théorique des résidus	93
5.6 Résultat et interprétation	98
5.7 Conclusion	99

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de diagnostic à base de modèles visant à la détection, la localisation et l'estimation des défauts affectant un système hydraulique complexe non linéaire de cinq réservoirs linéarisé autour du point d'équilibre. Ce type de système se retrouve notamment dans la conduite des procédés chimiques industriels et peut être considéré comme un prototype de nombreuses applications industrielles dans l'industrie de processus, tels que les usines chimiques et pétrochimiques, de l'huile et des systèmes de gaz. La méthode développée utilise l'observateur présenté au chapitre 3 afin de concevoir un générateur de résidus permet la détection des défauts. Les techniques de bancs d'observateurs sont utilisées dans l'objectif de générer des résidus structurés pour localiser les défauts et minimisé les fausses alarmes. Le observateur UIO permet leur estimation ce qui implique leur localisation et leur détection. Nous allons nous focaliser sur les défauts provenant des actionneurs pour des systèmes non linéaires linéarisé. Cette méthode qui est illustrée d'abord sur des exemples académique dans le chapitre3 et sera ensuite appliquée pour la détection et l'isolation de défauts actionneurs d'un système hydraulique à cinq réservoirs. Le choix de ce système est justifié par le fait qu'il soit très répandu dans le domaine de diagnostic et qu'il possède de forts non linéarités. Ce qui permet d'évaluer les performances de cette méthode.

5.2 Système à cinq réservoirs

Cette section montre la démarche utilisée pour modéliser le système à cinq réservoirs cylindriques schématisée à la figure 5.1.

5.2.1 Description du système

Le système considéré se compose de cinq réservoirs cylindriques de section identique S . Les réservoirs sont reliés par deux tuyaux cylindriques de section s . La sortie du système est située au niveau de la réservoir 5, elle est aussi caractérisée par une section S_5 . Deux pompes commandées par des moteurs à courant continu alimentent les réservoirs 1 et 4 avec les débits $q_1(t)$ et $q_2(t)$. Les cinq réservoirs sont équipées de capteurs de pression pour mesurer le niveau de liquide ($h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$, $h_4(t)$, $h_5(t)$).

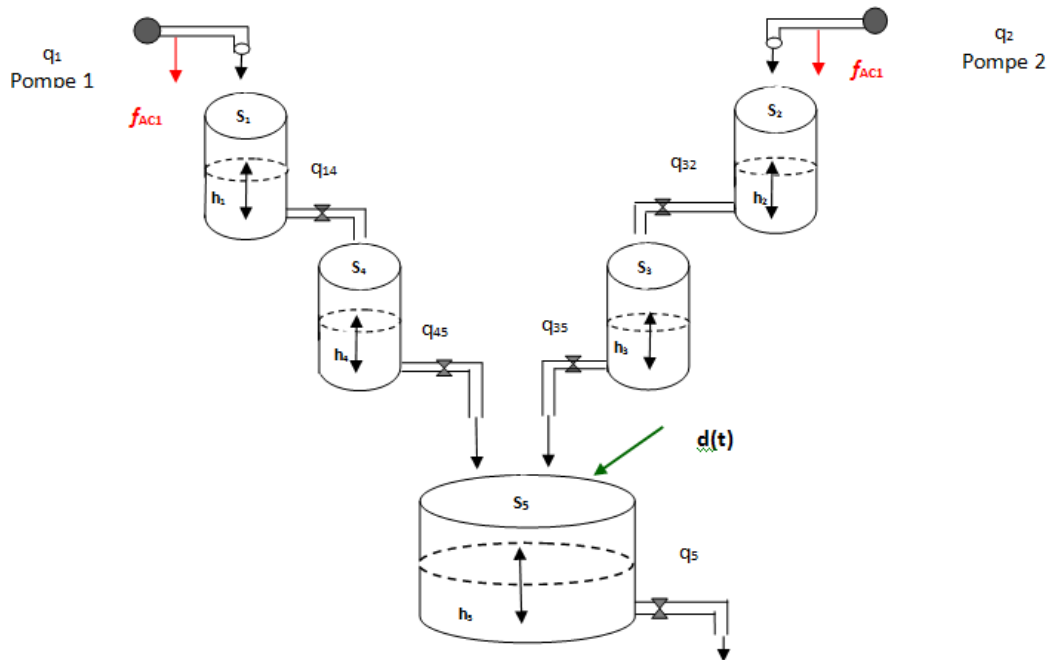


FIGURE 5.1 – Schématisation du système des 5 réservoirs

5.2.2 Modèle mathématique du système

$$\Sigma_{NL} : \begin{cases} S_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_1(t) - q_{14}(t) \\ S_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = q_2(t) - q_{32}(t) \\ S_3 \frac{dh_3(t)}{dt} = q_{32}(t) - q_{35}(t) \\ S_4 \frac{dh_4(t)}{dt} = q_{14}(t) - q_{45}(t) \\ S_5 \frac{dh_5(t)}{dt} = q_{45}(t) + q_{35}(t) - q_5(t) \end{cases} \quad (5.1)$$

où $q_{ij}(t)$ représente le débit de liquide de la réservoir i vers la réservoir j ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5 \forall i \neq j$) qui peut être exprimé en utilisant la loi de Torricelli par :

$$q_{ij} = a_{ij} \sqrt{2gh_i(t)} \quad (5.2)$$

où

$$q_{12} = a_{12} \sqrt{2gh_1(t)}, \quad a_{12} = \mu_1 S_n$$

$$q_{25} = a_{25} \sqrt{2gh_2(t)}, \quad a_{25} = \mu_2 S_n$$

$$q_{34} = a_{34} \sqrt{2gh_4(t)}, \quad a_{34} = \mu_4 S_n$$

$$q_{35} = a_{35} \sqrt{2gh_3(t)}, \quad a_{35} = \mu_3 S_n$$

S_n : La section des tuyaux.

S_i : la section des réservoirs.

g : L'accélération de gravité.

μ_i : coefficient d'écoulement de la réservoir i .

q_1 : débit de la pompe P_1 .

q_2 : débit de la pompe P_2 .

S_i représente la section des conduits entre les différents éléments, et les coefficients a_{ij} traduisent le débit du conduit reliant l'élément i à l'élément j via la vanne V_{ij} . Toutes les vannes sont à la même hauteur correspondant au niveau zéro.

Et q_5 représente le débit de sortie, avec :

$$q_5 = -a_5 \sqrt{2gh_5(t)} \quad (5.3)$$

Les niveaux vérifient les inégalités suivantes $h_1(t) > h_2(t) > h_5(t)$ et $h_4(t) > h_3(t) > h_5(t)$. En d'autres termes, nous considérons un sens particulier des débits inter réservoirs ($q_{ij}(t)$).

Avec ces équations, nous supposons que le système des 5 réservoirs est parfaitement décrit à l'aide du modèle non linéaire défini par :

$$\Sigma_{NL} : \begin{cases} \dot{x}_1(t) = -\frac{a_{14}}{S_1} \sqrt{2gx_1(t)} + \frac{q_1(t)}{S_1} \\ \dot{x}_2(t) = \frac{a_2}{S_2} \sqrt{2gx_1(t)} - \frac{a_{32}}{S_2} \sqrt{2gx_2(t)} \\ \dot{x}_3(t) = \frac{a_{32}}{S_3} \sqrt{2gx_2(t)} - \frac{a_{35}}{S_3} \sqrt{2gx_3(t)} \\ \dot{x}_4(t) = \frac{a_{14}}{S_4} \sqrt{2gx_1(t)} - \frac{a_{45}}{S_4} \sqrt{2gx_4(t)} \\ \dot{x}_5(t) = \frac{a_{45}}{S_5} \sqrt{2gx_4(t)} + \frac{a_{35}}{S_5} \sqrt{2gx_3(t)} - \frac{a_5}{S_5} \sqrt{2gx_5(t)} \\ y_1(t) = x_1(t), \quad y_2(t) = x_2(t), \quad y_3(t) = x_3(t), \quad y_4(t) = x_4(t), \quad y_5(t) = x_5(t) \end{cases} \quad (5.4)$$

On peut écrire :

$$\Sigma_{NL} : \begin{cases} \dot{x}_1(t) = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{x}_2(t) = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{x}_3(t) = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{x}_4(t) = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{x}_5(t) = f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{y}_1(t) = g_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{y}_2(t) = g_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{y}_3(t) = g_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \\ \dot{y}_4(t) = g_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) \end{cases} \quad (5.5)$$

Tel que :

$$\Sigma_{NL} : \begin{cases} f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = -\frac{a_{14}}{S_1} \sqrt{2gx_1(t)} + \frac{q_1(t)}{S_1} \\ f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_2}{S_2} \sqrt{2gx_1(t)} - \frac{a_{32}}{S_2} \sqrt{2gx_2(t)} \\ f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_{32}}{S_3} \sqrt{2gx_2(t)} - \frac{a_{35}}{S_3} \sqrt{2gx_3(t)} \\ f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_{14}}{S_4} \sqrt{2gx_1(t)} - \frac{a_{45}}{S_2} \sqrt{2gx_4(t)} \\ f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_{45}}{S_5} \sqrt{2gx_4(t)} + \frac{a_{35}}{S_5} \sqrt{2gx_3(t)} - \frac{a_5}{S_5} \sqrt{2gx_5(t)} \\ g_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = x_1(t) \\ g_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = x_2(t) \\ g_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = x_3(t) \\ g_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = x_4(t) \\ g_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = x_5(t) \end{cases} \quad (5.6)$$

avec $x_i(t)$ le niveau de liquide dans la réserveoir i et les deux signaux de commande $q_1(t)$, $q_2(t)$ sont respectivement les deux débits d'entrée.

5.3 Linéarisation du système à cinq réserveoirs

L'utilisation des lois de la physique qui régissent ou décrivent les comportements des systèmes, sont souvent représentés par des fonctions non linéaires. La linéarisation du système non linéaire définie par (5.1) consiste à aboutir à un comportement localement linéaire du système originel, on parlera alors de linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

5.3.1 Calcul du point d'équilibre

Définition du point d'équilibre : Physiquement, un système est en équilibre quand il conserve son état en absence de forces externes. Mathématiquement, cela équivaut à dire que la dérivée i de son état est nul. Pour un système

$$\dot{x} = f(x) \quad (5.7)$$

Les états d'équilibres x_e , sont les solutions de l'équation algébrique.

$$f(x) = 0 \quad (5.8)$$

– Point d'équilibre :

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = -\frac{a_{14}}{S_1} \sqrt{2gx_1(t)} + \frac{q_1(t)}{S_1} &= 0 \\
\dot{x}_2(t) &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_2}{S_2} \sqrt{2gx_1(t)} - \frac{a_{32}}{S_2} \sqrt{2gx_2(t)} &= 0 \\
\dot{x}_3(t) &= f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_{32}}{S_3} \sqrt{2gx_2(t)} - \frac{a_{35}}{S_3} \sqrt{2gx_3(t)} &= 0 \\
\dot{x}_4(t) &= f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_{14}}{S_4} \sqrt{2gx_1(t)} - \frac{a_{45}}{S_4} \sqrt{2gx_4(t)} &= 0 \\
\dot{x}_5(t) &= f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, q_1, q_2) = \frac{a_{45}}{S_5} \sqrt{2gx_4(t)} + \frac{a_{35}}{S_5} \sqrt{2gx_3(t)} - \frac{a_5}{S_5} \sqrt{2gx_5(t)} &= 0
\end{aligned}$$

Pour $u_{10}=q_{10}$, $u_{20}=q_{20}$ On a le point d'équilibre suivant :

$$x_e = \left(x_{01} = \frac{q_1^2}{2g(a_{14})^2}, x_{02} = \frac{q_2^2}{2g(a_{32})^2}, x_{03} = \frac{q_2^2}{2g(a_{35})^2}, x_{04} = \frac{q_1^2}{2g(a_{45})^2}, x_{05} = \frac{(q_1 + q_2)^2}{2g(a_5)^2} \right)$$

Le système d'état suivant linéarisé autour de point d'équilibre x_e est donné par :

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{x}(t) &= A_e \Delta x(t) + B_e \Delta u(t) \\
\Delta y(t) &= C_e \Delta x(t)
\end{aligned}$$

où

$$\Delta x(t) = x(t) - x_e(t), \Delta u = u(t) - u_e, \Delta y(t) = y(t) - y_e.$$

Avec :

$$\begin{aligned}
A_e &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{pmatrix} \begin{matrix} x = x_e \\ u = u_0 = q_0 \end{matrix} \\
A_e &= \begin{pmatrix} -\frac{a_{14}\sqrt{2g}}{2S_1} \frac{1}{\sqrt{x_1(t)}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a_{32}\sqrt{2g}}{2S_2} \frac{1}{\sqrt{x_2(t)}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a_{32}\sqrt{2g}}{2S_3} \frac{1}{\sqrt{x_2(t)}} & -\frac{a_{35}\sqrt{2g}}{2S_3} \frac{1}{\sqrt{x_3(t)}} & 0 & 0 \\ \frac{a_{14}\sqrt{2g}}{2S_1} \frac{1}{\sqrt{x_1(t)}} & 0 & 0 & -\frac{a_{45}\sqrt{2g}}{2S_4} \frac{1}{\sqrt{x_4(t)}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a_{35}\sqrt{2g}}{2S_5} \frac{1}{\sqrt{x_3(t)}} & \frac{a_{45}\sqrt{2g}}{2S_5} \frac{1}{\sqrt{x_4(t)}} & \frac{a_5\sqrt{2g}}{2S_5} \frac{1}{\sqrt{x_5(t)}} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -\frac{(a_{14})^2 g}{S_1 q_{10}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(a_{32})^2 g}{S_2 q_{20}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(a_{32})^2 g}{q_{20}} & -\frac{(a_{35})^2 g}{S_3 q_{20}} & 0 & 0 \\ \frac{(a_{14})^2 g}{S_4 q_{10}} & 0 & 0 & -\frac{(a_{45})^2 g}{S_4 q_{10}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(a_{35})^2 g}{S_5 q_{20}} & \frac{(a_{45})^2 g}{S_5 q_{10}} & -\frac{(a_5)^2 g}{S_5 (q_{10} + q_{20})} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$B_e = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} \end{pmatrix} \Big|_{\substack{x = x_e \\ u = u_e}} \Rightarrow B_e = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C_e = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} & \frac{\partial g_1}{\partial x_4} & \frac{\partial g_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} & \frac{\partial g_2}{\partial x_4} & \frac{\partial g_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_1} & \frac{\partial g_3}{\partial x_2} & \frac{\partial g_3}{\partial x_3} & \frac{\partial g_3}{\partial x_4} & \frac{\partial g_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial g_4}{\partial x_1} & \frac{\partial g_4}{\partial x_2} & \frac{\partial g_4}{\partial x_3} & \frac{\partial g_4}{\partial x_4} & \frac{\partial g_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial g_5}{\partial x_1} & \frac{\partial g_5}{\partial x_2} & \frac{\partial g_5}{\partial x_3} & \frac{\partial g_5}{\partial x_4} & \frac{\partial g_5}{\partial x_5} \end{pmatrix} \Big|_{\substack{x = x_e \\ u = u_e}} \Rightarrow C_e = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Le système après la linéarisation de (5.1) autour d'un point d'équilibre (x_e, u_e) est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -\frac{(a_{14})^2 g}{S_1 q_{10}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(a_{32})^2 g}{S_2 q_{20}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(a_{32})^2 g}{q_{20}} & -\frac{(a_{35})^2 g}{S_3 q_{20}} & 0 & 0 \\ \frac{(a_{14})^2 g}{S_4 q_{10}} & 0 & 0 & -\frac{(a_{45})^2 g}{S_4 q_{10}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(a_{35})^2 g}{S_5 q_{20}} & \frac{(a_{45})^2 g}{S_5 q_{10}} & -\frac{(a_5)^2 g}{S_5 (q_{10} + q_{20})} \end{pmatrix} \Delta x(t) + \begin{pmatrix} \frac{1}{S_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Delta x(t) \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Avec :

- $S_1, S_2, S_3, S_4 = 0.0154 \text{ m}^2$, $S_5 = 4 \times S_1 \text{ m}^2$, $S_n = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$.
- $g = 9.81 \text{ m.s}^2$, $\mu = 0.6$.
- $q_{10} = 0.3 \times 10^{-4}$, $q_{20} = 0.3 \times 10^{-4}$
- $a_{12} = \mu_1 S_1 = 0.6 \times 5 \times 10^5$, $a_{25} = \mu_2 S_n = 0.6 \times 5 \times 10^5$, $a_{34} = \mu_4 S_n = 0.6 \times 5 \times 10^5$
- $a_{35} = \mu_3 S_n = 0.6 \times 5 \times 10^5$, $a_5 = \mu_5 S_n = 0.6 \times 5 \times 10^5$.

5.4 Détection de défauts

Pour mettre en évidence l'intérêt du formalisme proposé dans la détection de défauts, nous avons simulé trois cas de défauts sur le système expérimental. Plus précisément, il s'agit de deux défauts actionneurs f_{AC1} sur la pompe de refoulement 1 et f_{AC2} sur la pompe de refoulement 2.

Une perturbation, des infiltrations dans le réservoir 5, notée $d(t)$. Les mesures sont affectées par des bruits de mesures, notés $v_i(t)$.

Le système après la linéarisation de (5.1) autour d'un point d'équilibre (x_e, u_e) est décrit par la représentation d'état (5.9).

– Construction du modèle des défauts

Le modèle de système à surveiller est supposé correctement décrit par la représentation d'état suivante. On suppose quand a deux défauts actionneurs et une perturbation.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F_x f(t) + D_x d(t) \\ \dot{y}(t) = Cx(t) + Du(t) + F_y f(t) + D_y d(t) \end{cases}$$

Avec :

$$m \left\{ \begin{array}{l} A = \begin{pmatrix} -\frac{(a_{14})^2 g}{S_1 q_{10}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(a_{32})^2 g}{S_2 q_{20}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(a_{32})^2 g}{q_{20}} & -\frac{(a_{35})^2 g}{S_3 q_{20}} & 0 & 0 \\ \frac{(a_{14})^2 g}{S_4 q_{10}} & 0 & 0 & -\frac{(a_{45})^2 g}{S_4 q_{10}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(a_{35})^2 g}{S_5 q_{20}} & \frac{(a_{45})^2 g}{S_5 q_{10}} & -\frac{(a_5)^2 g}{S_5 (q_{10} + q_{20})} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \\ C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, F_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, v_i = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ v_4(t) \\ v_5(t) \end{pmatrix} \\ \\ D = 0, \quad D_y = 0, \quad F_y = 0 \end{array} \right.$$

On suppose que ce système possède deux défauts actionneurs.

F_x les matrices d'action des défauts $f(t)$ à détecter.

D_x la matrice d'application des entrées inconnues sur l'état.

Dans cette application, La sortie et les états internes supportent des entrées inconnues additives $d(t)$.

Dans la génération des résidus, des signaux aléatoires, seront superposés aux mesures afin de prendre en compte l'influence des bruits de mesures. Le vecteur de bruit est noté par $v_i(t)$.

5.4.1 Synthèse de générateur de résidu à base observateur UIO à découplage parfait

L'objectif est d'estimer les défauts affectant les deux actionneurs du système décrit par (5.9). L'avantage de génération des résidus à base d'observateurs à entrées inconnues est qu'elle

permet la détection et la localisation en même temps. Une estimation simultanée des défauts affectant les actionneurs et est également possible en utilisant un banc d'observateurs pour éviter les fausses alarmes qui peut être dans l'utilisation d'un seul observateur.

– **Algorithme de synthèse de l'observateur**

L'algorithme de synthèse de l'observateur peut être résumé comme suit :

- (f) $\text{rang}(CD_x) = nd$ puis calculer $L_y = -D_x[(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T$.
- (g) A partir de L_y calculer $E = I + L_y C$
- (e) A partir de E calculer $N = EB$
- (i) Imposer M soit une matrice Hurwitz, on peut a cet effet choisir pour M une matrice diagonale faisant apparaître les valeurs propres désirés pour l'observateur.
- (j) Calculer la matrice P telle que $PC = EA - ME$

Le rang de la matrice $CD_x = 1$ étant égal au nombre d'entrées à découpler $d(t)$, il est possible de construire un générateur de résidus sensible aux défauts et insensible à la perturbation. Dans cette partie, des conditions d'existence de l'observateur à entrées inconnues (3.2) pour le système (5.4) sont vérifiées.

On obtient :

$$L_y = -F[(CF)^T(CF)]^{-1}(CF)^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$E = I + L_y C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad N = EB = \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 \\ 0 & 64.9351 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On impose que M soit une matrice de Hurwitz. En choisissant M diagonale, et les valeurs propres comme suite.

$$\lambda_1 = -3.4, \quad \lambda_2 = -20, \quad \lambda_3 = -20, \quad \lambda_4 = -20, \quad \lambda_5 = -20$$

Donc M est :

$$M = \begin{pmatrix} -3.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -20 \end{pmatrix}$$

Calculons la matrice P telle que $PC = E1 - ME$, comme C est unitaire, et après les calculs on trouve la matrice suivante :

$$P = \begin{pmatrix} 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.7182 \times 10^9 & 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 \\ 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 & 1.7182 \times 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On constate que les matrices C , D_x sont respectivement de plein rang ligne et de plein rang colonne, que le produit CD_x est de plein rang colonne et que le nombre de mesures est strictement supérieur au nombre d'entrées inconnues, donc les conditions d'existence d'un observateur à entrées inconnues sont vérifiées.

– **Le générateur de résidus**

On obtient le générateur de résidus à entrées inconnues ayant la structure suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -20 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -20 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{pmatrix} + \\ \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 & 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 64.9351 & 0 & 1.7182 \times 10^9 & 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.7182 \times 10^9 & 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.7182 \times 10^9 & 0 & 0 & 1.7182 \times 10^9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} e_{y1} \\ e_{y2} \\ e_{y3} \\ e_{y4} \\ e_{y5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} - C \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 + y_3 \\ z_4 + y_4 \\ z_5 + y_5 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

5.5 Calcul théorique des résidus

Calcul de la matrice de transfert reliant les défauts à l'erreur d'estimation en sortie :

La matrice de transfert $G_f = C(pI - M)^{-1}(F + pF) - F_y$, on a :

$$F = ML_y F_y + PF_y - EF_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, F' = -K + L_y F_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Le vecteur de résidus s'écrit alors $R(p) = Q(p)Q_d(p)G_f(p)f(p)$ soit :

$$r(p) = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix}$$

$$G_{11} = \frac{-p^4 - 80p^3 - 2400p^2 - 32000p - 160000}{p^5 + 83.4p^4 + 2672p^3 + 40160p^2 + 268800p + 544000}$$

$$G_{12} = 0$$

$$G_{21} = 0$$

$$G_{22} = 0 = \frac{-p^4 - 63.4p^3 - 1404p^2 - 12080p - 27200}{p^5 + 83.4p^4 + 2672p^3 + 40160p^2 + 268800p + 544000}$$

Selon la matrice de transfert $G_f(p)$, on obtient une structure de la table 5.1 de signature permet une localisation théorique parfaite des deux défauts actionneurs considérés malgré la présence des perturbations.

La table de signature théorique associée à ce générateur de résidus est dressée dans le tableau 5.1.

	f_{AC1}	f_{AC2}
r_1	1	0
r_2	0	1

TABLE 5.1 – Table de la signature

Maintenant vérifions en simulation les résultats théoriques obtenus, la table de signature est élaborée à partir du raisonnement suivant :

L'observateur 1 UIO, estime les deux défauts f_{AC1} et f_{AC2} à la fois. On remarque que si un défaut apparaît sur la première sortie ou sur la deuxième sortie ou sur les deux sorties le défaut est estimé. Donc avec cet observateur, on détecte et on localise les défauts actionneurs même s'ils apparaissent simultanément sur les deux sorties.

On remarque que les résidus sont insensibles à perturbation $d(t)$. On a une structure permettant la localisation complète des défauts. Maintenant vérifions la table de signature à présent en simulation les résultats théoriques obtenus pour le calcul des résidus et leurs sensibilités à la perturbation $d(t)$.

Pour résoudre le problème d'isolation des défauts un banc d'observateurs à entrées inconnues est proposé. La stratégie utilisée est de concevoir des observateurs du système à surveiller (architecture DOS Pour la localisation des défauts actionneurs), Pour cette application, on dispose de deux entrées du système, on construit alors un banc d'observateurs de deux observateurs UIO : Le premier observateur (UIO₂) du banc utilise la première entrée et le deuxième observateur (UIO₃) utilise la deuxième entrée. On a le premier observateur UIO₁ décrit auparavant utilisant les deux entrées. Les observateurs utilisés sont sous la forme (3.12) du chapitre 3 dans la figure 5.2 illustre le principe de la détection de défaut d'actionneurs par observateurs dédiés (dedicated observer scheme DOS).

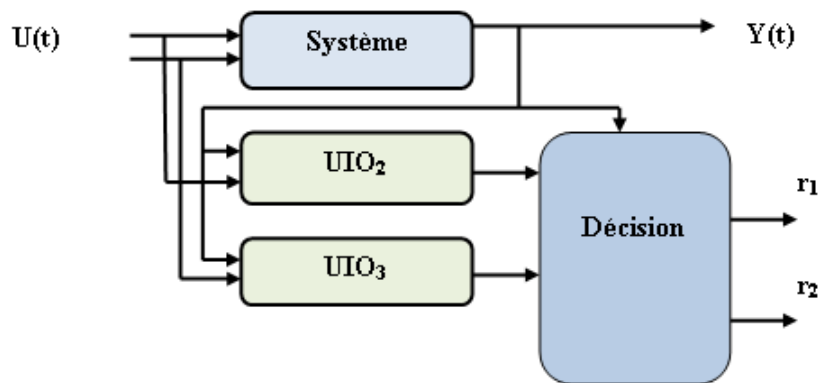


FIGURE 5.2 – UIO (DOS) pour la détection de défauts d'actionneurs

Puisque toutes les sorties $y(t)$ sont connues et qu'il n'y a pas de défauts affectant les capteurs, le terme $r(t)$ estime le résidu affecté par les défauts actionneurs.

Ensuite, une table de signatures générées est dressée dans le tableau 5.2

	Obse1		Obse2		Obse3	
Résidus	r_{11}	r_{12}	r_1	r_2		
f_{AC1}	1	0	1	0		
f_{AC2}	0	1	0	1		

TABLE 5.2 – Table de la signature

La table de signature est élaborée à partir du raisonnement suivant :

L'observateur 1, estime les deux défauts f_{AC1} et f_{AC2} à la fois. On remarque que si un défaut apparaît sur la première entrée ou sur la deuxième entrée ou sur les deux entrées le défaut est estimé.

Le banc d'observateur génère les résidus définies par :

L'observateur 2 reconstruit la sortie du système hydraulique en utilisant seulement l'entrée q_{e1} . Cette sortie est affectée par un défaut qui sera estimé et représentera le résidu. Donc, si le résidu r_1 s'écarte de zéro, on est certain de l'apparition d'un défaut f_{AC1} . Par contre, le troisième observateur utilise la sortie qui n'est pas affectée par le défaut f_{AC2} , le résidu r_2 reste alors autour de zéro s'il n'y a pas de défaut sur la deuxième sortie.

Dans l'application, on suppose que les défauts sur les actionneurs sont définis comme suit :

$$f_{AC1} = \begin{cases} 2 & t \geq 4 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad f_{AC2} = \begin{cases} 6 & t \geq 30 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

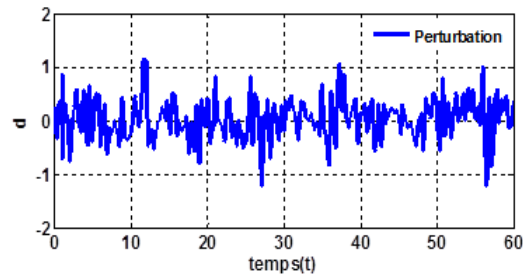


FIGURE 5.3 – La perturbation

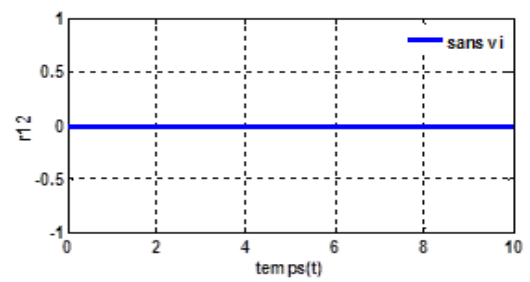
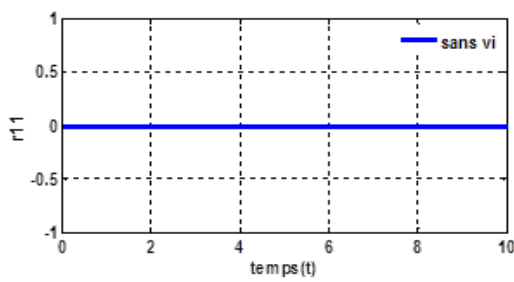


FIGURE 5.4 – Insensibilité des résidus à la perturbation

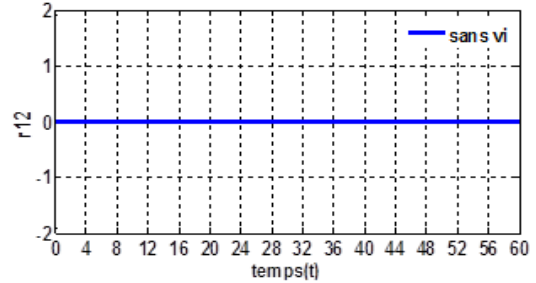
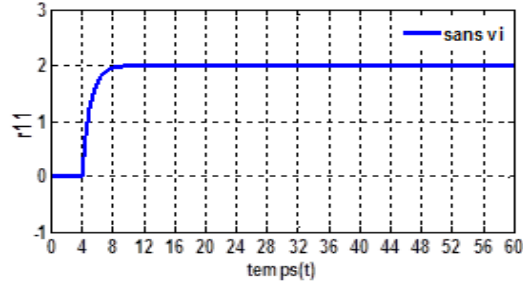


FIGURE 5.5 – Résidus r_{11} , r_{12} en présence d'un défaut f_{AC1} sur le premier actionneur et en absence de bruits sur la mesure v_i (UIO_1).

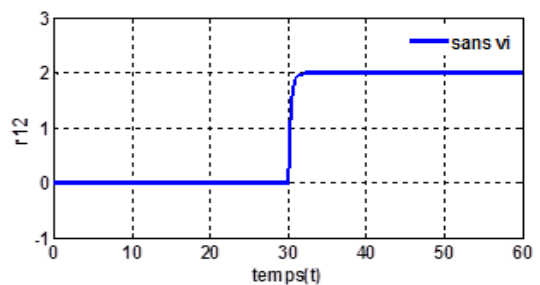
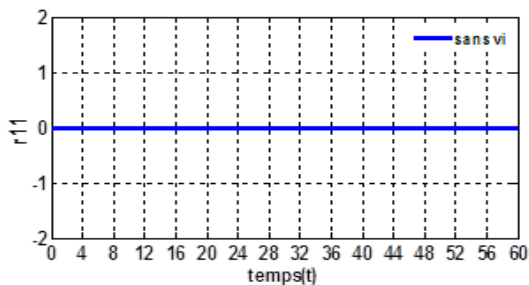


FIGURE 5.6 – Résidus r_{11} , r_{12} en présence d'un défaut f_{AC2} sur le deuxième actionneur et en absence de bruits sur la mesure v_i (UIO_1).

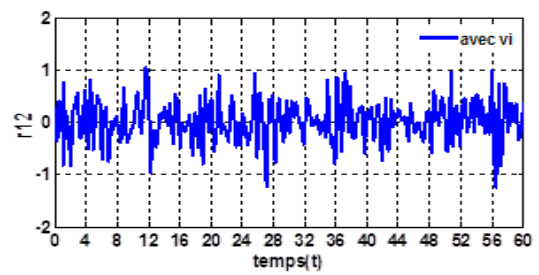
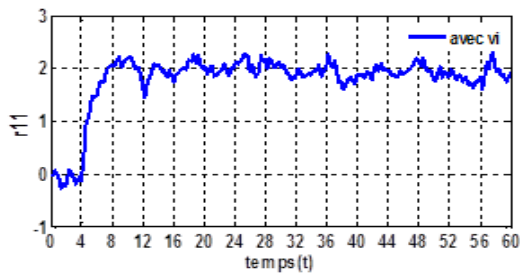


FIGURE 5.7 – Résidus r_{11} , r_{12} en présence d'un défaut f_{AC1} sur le premier actionneur et en présence de bruits sur la mesure v_i (UIO_1).

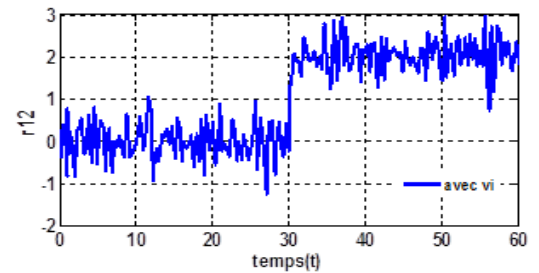
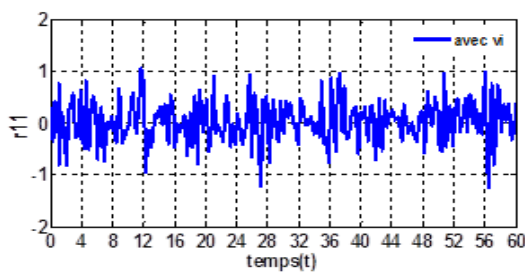


FIGURE 5.8 – Résidus r_{11} , r_{12} en présence d'un défaut f_{AC2} sur le deuxième actionneur et en présence de bruits sur la mesure v_i (UIO_1).

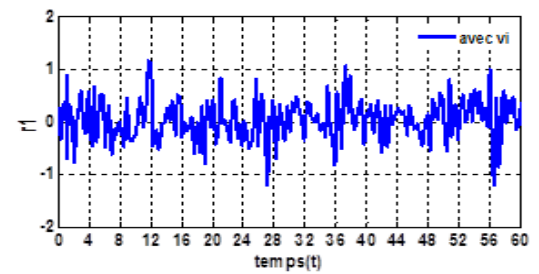
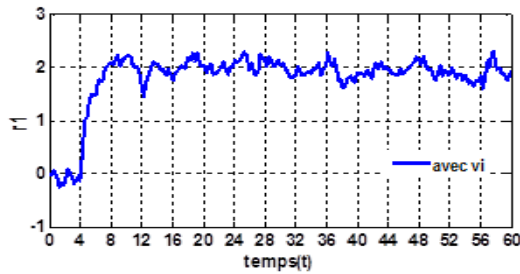


FIGURE 5.9 – Résidu r_1 en présence du défaut actionneur f_{AC1} et f_{AC2} avec bruit de mesure v_i (le second observateur UIO_2 du banc d'observateurs architectures DOS)

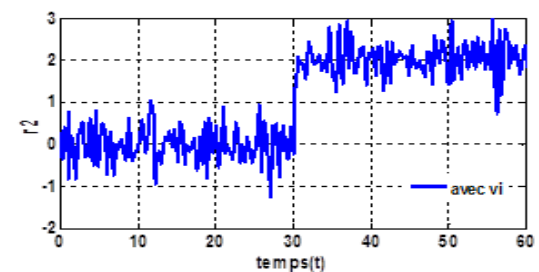
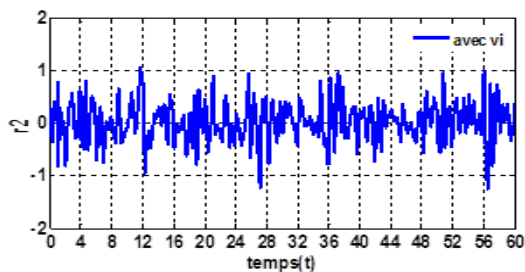


FIGURE 5.10 – Résidu r_1 en présence du défaut actionneur f_{AC1} et f_{AC2} avec bruit de mesure v_i (le premier observateur UIO_3 du banc d'observateurs architectures DOS)

5.6 Résultat et interprétation

La figure (5.4) montre que les résidus sont parfaitement découplés de la perturbation $d(t)$ illustrée dans la figure (5.3), les deux résidus associés à l'observateur1 (UIO₁) en absence de défauts et en présence de perturbation. Nous remarquons que les valeurs des résidus sont égales à zéro, en réalité les résidus ne sont jamais nuls en raison des bruits de mesure.

Le défaut actionneur f_{AC1} qui est considéré comme une fuite à l'instant $t \geq 4$ sec et le défaut actionneur f_{AC2} est aussi considéré comme une fuite à l'instant $t \geq 30$ sec.

En simulant successivement l'apparition d'un défaut du premier actionneur d'amplitude 2 à l'instant $t \geq 4$ sec et d'un défaut du deuxième actionneur d'amplitude 6 à l'instant $t \geq 30$ sec, on obtient les résidus r_{11} , r_{12} présentées dans les figures (5.5), (5.6), (5.7) et (5.8) en présence des deux défauts actionneurs f_{AC1} , f_{AC2} . Dans les figures (5.7), (5.8), des signaux aléatoires, seront superposés aux mesures afin de prendre en compte l'influence des bruits de mesure $v_i(t)$.

En l'absence de défaut, les résidus sont statiquement nuls. En présence d'un défaut, les résidus évoluent conformément à la table des signatures précédemment obtenue en calcul théorique.

La simulation du système présenté avec le banc d'observateurs permet de retrouver les résidus dont l'analyse de résidu fournie par le premier observateur (UIO₂) permet de conclure qu'il y a bien un défaut f_{AC1} sur le premier actionneur. De même, si un défaut f_{AC2} apparaît, il sera estimé par le deuxième observateur (UIO₃), ces résultats de banc d'observateurs sont illustrés dans la figure (5.9) pour le premier observateur et dans la figure (5.10) pour le deuxième.

D'après ces simulations, les résultats de simulation correspondent à la table 5.2 de signatures théoriques et que Le fait d'utiliser des observateurs UIO₂, UIO₃ dédiés pour l'estimation de chaque défaut d'actionneur, permet de les détecter et de les localiser. On remarque également que les fausses alarmes sont évitées par rapport au premier observateur utilisant les deux entrées à la fois. Cependant, dans l'application le taux de fausse alarme est nul en utilisant les deux observateurs dédiés par le banc d'observateur, alors qu'avec le premier observateur, nous avons des fausses alarmes au moment de l'apparition d'un des défauts et cela est dû à la variation très rapide du défaut.

Remarque. 5.6.1 D'après ces simulations, on note certains points intéressants :

- En ce qui concerne le première observateur utilisant les deux sorties à la fois, on remarque qu'il est possible de détecter et de localiser les défauts affectant les deux sorties, le nombre d'observateurs pourrait donc être réduit. Cependant, dans l'exemple, le taux de fausse alarme est nul en utilisant les deux observateurs dédiés, alors qu'avec cet observateur, nous avons des fausses alarmes au moment de l'apparition d'un des défauts et cela est dû à la variation très rapide du défaut.
- Le fait d'utiliser des observateurs dédiés pour l'estimation de chaque défaut d'actionneur, permet de les détecter et de les localiser. On remarque également que les fausses alarmes sont évitées.

En résumé nous constatons que cette méthode est efficace pour la détection et localisation des défauts affectant les actionneurs même en présence de bruits de mesure. Nous pouvons générer, à base d'observateurs, des résidus sensible au défaut d'un actionneur et insensible aux défauts des autres actionneurs par l'utilisation du banc d'observateur avec architecture DOS. Le résidu correspondant à l'actionneur en défaut se stabilise à une nouvelle valeur non nulle alors que l'autre reste à zéro.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons focalisé notre étude sur la détection et l'isolation de défauts provenant des actionneurs pour un système non linéaire en utilisant d'observateur à entrées inconnues UIO, où l'isolement de ces derniers est réalisé par un banc d'observateurs (UIOs), suivant les architectures DOS. La méthode développée est appliquée sur un système hydraulique un système possédant des fortes non linéarités qui est le système à cinq réservoirs, en absence et présences de bruits de mesures. Cette méthode qui s'est avérée efficace pour tous les cas que nous avons considérés, même en présence de bruit, présente l'inconvénient de n'être applicable que pour des défauts abrupts additifs et constants. Les fausses alarmes sont évitées par l'utilisation du banc observateur par rapport à celle d'un seul observateur.

Conclusion générale et perspectives

✿ « *Il faut toujours faire ce que l'on ne croit pas pouvoir faire* » F.D. Roosevelt. 

Les travaux développés dans cette thèse présentent une contribution aux méthodes de détection et localisation des défauts des systèmes dynamiques à base observateurs à entrées inconnues. Les motivations de cette thèse partent du constat que la majorité des travaux effectués dans le domaine du diagnostic se basent sur la représentation d'état imparfaite, il est en effet possible de régler la sensibilité aux différents défauts et aux perturbations, en introduisant dans les équations de synthèse de l'observateur les matrices d'état des défauts et des perturbations (représentation parfaite). Or, la plupart des procédés industriels sont soumis à l'influence des entrées inconnues.

Dans un contexte de diagnostic à base d'observateurs, la qualité du diagnostic peut être altérée pour différentes raisons. D'une part, les entrées inconnues peuvent atténuer l'effet des défauts et donc entraîner des non détections, d'autre part, les entrées du système sont corrélées avec les bruits de mesures à cause des entrées inconnues ce qui engendre une difficulté de localisation d'un défaut capteur et d'un défaut actionneur. Ce problème se résolu par l'utilisation de L'observateur à entrées inconnues.

Un tour d'horizon rapide des principales techniques de détection et de diagnostic à base de modèles, a été présenté dans la première partie. Ainsi que nous avons fait des rappels sur les notions de base du diagnostic, la surveillance, les critères de performances, les approches usuelles de détection. Cette partie est clôturée par une brève introduction des notions fondamentales et des approches à base modèles en focalisant notre étude sur les approches à base observateurs.

Une étude bibliographique sur la synthèse d'observateurs appliqués à des systèmes à entrées inconnues dans les deux cas linéaire et non linéaires avec leurs conditions d'existence, a été traitée par la suite. La reconstruction des indicateurs de défauts a été faite par la suite après le développement de ces types d'observateurs.

Une première méthodologie de synthèse de générateur du résidu à base observateur à entrées inconnues avec découplage parfait a été proposée dans ce qui suit. Cette méthode utilise la technique de découplage parfait des entrées inconnues et s'appuie sur le calcul de génération des résidus qui permet de limiter l'action de chaque défaut à une seule sortie afin de faciliter sa localisation. Cette méthode a le mérite de prendre en considération, naturellement l'objectif de diagnostic. En effet, une fois le découplage des entrées inconnues accompli, une détection par le générateur de résidus peut être synthétisée afin de minimiser les fausses alarmes. Cette approche permet de tester les performances d'observateur à entrées inconnues UIO.

Afin de fournir estimation des défauts, une seconde approche a été suggérée, dont elle est basée sur l'utilisation d'observateur à entrées inconnues avec découplage approximatif en utilisant le formalisme H_-/H_∞ développé dans le cadre linéaire. Dont la convergence de ces observateurs est assurée par l'utilisation d'inégalités matricielles linéaires LMIs pour les systèmes linéaires et par la technique d'observation à entrée inconnue pour les systèmes non linéaires linéarisés. L'idée

principale est de générer des résidus dont l'analyse permet la détection, l'isolation et l'estimation des défauts. Pour cela, l'objectif est exprimé de manière à minimiser l'influence des perturbations et à maximiser celle des défauts sur ces résidus dans la réalisation d'un générateur de résidus parfaitement découplé des entrées inconnues, n'est pas toujours possible. On fait face alors à un problème d'optimisation de type min / max que l'on a simplifié en introduisant un observateur à entrées inconnues linéaire. Des conditions LMIs permettant la construction d'un tel générateur de résidus sont données pour les systèmes à surveiller.

Finalement, l'application de l'observateur à entrée inconnue sur un système hydraulique de cinq réservoir pour la détection et la localisation de défaut a été développée.

Ce système peut être considéré comme un prototype de nombreuses applications industrielles dans un processus industriel, tels que les usines chimiques et pétrochimiques, de l'huile et des systèmes de gaz. Nous étendons le système par un observateur à entrées inconnues pour générer des résidus robustes afin d'améliorer l'estimation des défauts, où l'isolement est effectué par un Banc d'observateurs (UIOs) dans lequel les fausses alarmes sont évitées par rapport à un seul observateur (UIO). L'efficacité et les capacités de la méthode proposée ont été constatées par les résultats de simulation.

Les résultats obtenus dans ce mémoire offrent des perspectives intéressantes de développements ultérieurs.

❖ En premier lieu, l'observateur présenté dans le cadre du quatrième chapitre a été développé en se basant sur un problème d'optimisation. Pour des futurs travaux il serait important d'employer cet observateur sur le plan réel. Si de tels observateurs sont utilisés pour générer des résidus pour la surveillance, il paraît pertinent de pouvoir établir les relations liant les paramètres de réglage de l'observateur (non convexité du problème d'optimisation) aux critères de performances en diagnostic, comme par exemple le retard à la détection.

❖ Une extension de l'analyse de la sensibilité aux cas des systèmes multivariables prenant en compte l'influence des bruits et des perturbations sur les résidus serait intéressante pour le diagnostic des systèmes plus complexes.

❖ La qualité des résultats obtenus a essentiellement été constaté à travers l'analyse de résultats de simulation. Cependant, des études analytiques peuvent être envisagées dans le futur afin de quantifier l'apport des d'autres méthodes.

❖ Dans la majeure partie des travaux effectués dans le domaine de la surveillance des systèmes, les outils servant à la détection et à la localisation des défauts sont synthétisés à partir d'une représentation en boucle ouverte du système. Or, la réalité des applications industrielles fait que les systèmes sont majoritairement insérés dans une boucle de régulation ou d'asservissement. Dans ce contexte, la tâche de diagnostic s'avère particulièrement délicate pour différentes raisons. D'une part, le contrôleur peut atténuer l'effet des défauts ce qui rend difficile leur détection. D'autre part, les entrées du système étant corrélées avec les sorties à cause du bouclage cela engendre une difficulté pour la localisation. Pour cette raison il serait intéressant de surveiller les systèmes en boucle fermée.

❖ Pour la modélisation, des extensions des approches développées vers des systèmes non linéaires plus complexes sont envisageables. D'une part, pour le traitement des non linéarités en amont du diagnostic dont le but est la simplification des modèles par une réécriture exacte du modèle non linéaire sous forme multimodèle. Cependant, plusieurs améliorations et aménagements peuvent être apportés à cet estimateur dans le but d'augmenter les performances du diagnostic. D'autre part, l'approche multimodèle, avec un ensemble de modèles linéaires commutant entre

eux, est une avancée dans l'étude des systèmes complexes. L'approche multimodèle peut nous permettre de simplifier les non linéarités complexes (hystérésis, saturation). Dans ce sens, la modélisation multimodèle peut améliorer la localisation des défauts. Cette démarche semble très intéressante pour améliorer les performances du système de diagnostic.

❖ Ensuite, toutes les méthodes proposées n'ont été testées qu'en simulation. Il serait important d'évaluer leur pertinence sur des systèmes réels en commençant par des pilotes de laboratoire. Le système à cinq cuves, pour lequel les modèles sont assez bien maîtrisés, pourrait faire l'objet des premières expérimentations.

❖ Finalement, l'amélioration de la modélisation joue un rôle primordial pour une mise en oeuvre efficace des techniques de diagnostic. Cette conclusion dépasse largement le cadre de l'étude qui nous a été proposée et montre la nécessité continue de confronter et valider les résultats académiques avec la réalité des processus industriels. Aussi il reste à faire une analyse rigoureuse de la robustesse de la méthode proposée plus particulièrement par rapport à l'ordre du système et la structure des entrées inconnues. Il serait intéressant d'y inclure une comparaison avec les méthodes dites intégrées de diagnostic de système dynamique, notamment l'approche par sous espace. Par ailleurs, afin de valoriser cette nouvelle approche de diagnostic, il serait intéressant d'étendre les résultats à un processus réel.

Publications Internationales

Publications Internationales

- S.Tahraoui ; A.Meghebbar, D.Boubekeur,A.Boumediene. "Fault Detection in A Five Tank Hydraulic System", Electrotehnica, Electronica, Automatica, 63 (2015), ISSN : 1582-5175.
http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA63_3_6
- D. Boubekeur, A.Boumediene, Z.Sari, S.Tahraoui. "A Control Comparative Study of an Electric Powered Wheelchair System". Electrotehnica, Electronica, Automatica, 63 (2015), ISSN : 1582-5175.
http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA63_2_10
- S.Tahraoui ; A.Meghebbar, D.Boubekeur. "Unknown input observer based on LMI for robust generation residuals". Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences (accepted).
- S.Tahraoui ; A.Meghebbar, D.Boubekeur,A.Boumediene. "System Modeling and Faults Diagnosis of a Five Hydraulic Tank". Journal of Control Engineering and Applied Informatics. IFAC (accepted).

Communications Internationales

- S.Tahraoui, A.Meghebbar, D.Boubekeur. "Generation of robust residuals based on unknown input observers with optimal approximate decoupling", IEEE2014, CISTEM Conf. Proc,(2014) 03-06 Novembre 2014, Tunis, Tunisie.
DOI :[10.1109/CISTEM.2014.7076939](https://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7076939)
- D.Boubekeur, A.Boumediène, Z.Sari, S.Tahraoui. "A novel state representation of Electric Powered Wheelchair, IEEE2014", Conf.Proc, 18-20 Novembre2014, Constantine, Algérie.
- D.Boubekeur, A. Boumediène, Z.Sari, S.Tahraoui. "Comparative Study of classical Controllers to a New State Representation For Electric Powered Wheelchair". ICAAID Conf. 29-30 March 2015, Djelfa, Algéria.
- A.Bellaouar, S.Tahraoui, M.A.Fihakhir, "Paramètres d'information de l'état Technique des Unités de Pompage de Gaz", ICAAID Conf. 29-30 March 2015, Djelfa, Algéria.
- D.Boubekeur, A.Boumediène, Z.Sari, S.Tahraoui, " Modeling and Backstepping Control For Electric Powered Wheelchair" International Electrical and Computer Engineering Conference IECEC'2015 Setif, Algeria 23-25 May 2015
- S.Tahraoui, A.Meghebbar, A.Bellaouar, D.Boubekeur "Actuators Fault Detection Using Unknown Input Observer in Hydraulic System", 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology CEIT'15 Tlemcen, Algeria 25-27 May 2015.
DOI :[10.1109/CEIT.2015.7233015](https://doi.org/10.1109/CEIT.2015.7233015)

Inverses généralisées

Les propriétés relatives aux inverses généralisées ont été répertoriées dans (Ben-Israel et Greville, 1974).

Considérons une matrice non singulière Q telle que :

$$QQ^{-1} = Q^{-1}Q = I \quad (\text{B.1})$$

Où $Q \in \mathbb{R}^{p \times p}$. On peut aussi écrire que :

$$QQ^{-1}Q = Q \quad (\text{B.2})$$

Les inverses de matrices permettent de résoudre strictement des systèmes du type $Qx = y$ avec pour solution unique $x = Q^{-1}y$. Cependant dans beaucoup d'applications, on est amené à résoudre le système linéaire compatible suivant :

$$P = XM \quad (\text{B.3})$$

Où $p \in \mathbb{R}^{p \times q}$ et $M \in \mathbb{R}^{r \times q}$ représentent des matrices connues, tandis que $X \in \mathbb{R}^{p \times r}$ est une matrice inconnue. Une inverse généralisée de la matrice M notée M^+ appartenant à $\mathbb{R}^{q \times r}$ est définie par :

$$MM^+M = M \quad (\text{B.4})$$

Pour toute matrice M , une inverse généralisée existe et l'ensemble des inverses généralisées de M est donné par :

$$M^+ + W - M^+MWMM^+ \quad (\text{B.5})$$

Où M^+ est une inverse généralisée de M et W une matrice arbitraire appartenant à $\mathbb{R}^{q \times r}$.

Deux conditions équivalentes, données ci-dessous, assurent l'existence d'une solution pour (A.3) :

$$\left\{ \text{rang } M = \text{rang} \begin{bmatrix} p \\ M \end{bmatrix} \right\} \quad \text{où } \{p(I_q - M^+M = 0)\} \quad (\text{B.6})$$

Lorsque ces conditions sont satisfaites, une solution générale pour (B.3) est donnée par :

$$X = PM^+ + U(I_r - MM^+) \quad (\text{B.7})$$

Où U est une matrice arbitraire appartenant à $\mathbb{R}^p \times r$. On constate alors que la solution pour X n'est pas unique. En effet, d'une part la matrice U est une matrice arbitraire et d'autre part l'inverse généralisée n'est pas unique et son ensemble est donné par (B.5).

De plus, par exemple, si :

$$M = \begin{pmatrix} I_p & Q_{\rho, q-\rho} \\ L & Q_{r-\rho, q-\rho} \end{pmatrix} \quad (\text{B.8})$$

Où $\rho = \text{rang } M$ et $L \in \mathbb{R}^{r-\rho} \times \rho$ alors on peut choisir :

$$M^+ = \begin{pmatrix} I_p & Q_{\rho, r-\rho} \\ O_{q-\rho, \rho} & Q_{q-\rho, r-\rho} \end{pmatrix} \quad (\text{B.9})$$

Ainsi, si la matrice M possède une structure particulière on peut trouver une inverse généralisée M^+ de façon systématique. Ici, quelque soit la matrice L , M^+ défini par (B.9) sera toujours une inverse généralisée pour M .

Matrice de Hurwitz

En mathématiques, une matrice carrée A est appelée matrice de Hurwitz si toutes les valeurs propres de A ont une partie réelle strictement négative, c'est-à-dire :

$$\Re[\lambda_i] < 0 \tag{C.1}$$

pour toute valeur propre λ_i , A est aussi appelée une **matrice de stabilité**, car alors l'équation différentielle ordinaire :

$$\dot{x} = Ax \tag{C.2}$$

Est stable, c'est-à-dire $x(t) \rightarrow 0$ quand $t \rightarrow \infty$. Si $G(s)$ est une fonction de transfert matricielle, alors G est appelée **Hurwitz** si les pôles de tous les éléments de G ont une partie réelle négative. Il n'est pas nécessaire que $G(s)$ pour une valeur spécifique s soit une matrice de Hurwitz : elle n'a même pas besoin d'être carrée. Le lien est que si A est une matrice de Hurwitz, alors le système dynamique :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{C.3}$$

possède une fonction de transfert de Hurwitz.

Inégalités Linéaires Matricielles

Les résultats d'analyse et de synthèse dans ce mémoire, se basent essentiellement sous des formulations des problèmes d'optimisations convexes. Celles-ci présentent l'avantage d'avoir un coût de calcul raisonnable et le résultat obtenu correspond à un minimum global unique, ce qui exclu l'existence d'un minimum local de la fonction à optimiser. Généralement, les problèmes auxquels on abouti ne sont pas forcément convexes, et nécessitent quelques transformations en un problème convexe, ce qui peut entraîner des restrictions des domaines de validité des conditions trouvées. Le résultat ainsi obtenu, est optimal au sens du nouveau problème, i.e, après transformation du problème non convexe en un problème convexe. Cette remarque est fondamentale pour l'interprétation des résultats obtenus par la méthode d'optimisation convexe, en effet celle-ci change pour chaque nouveau problème convexe obtenu.

D.0.1 Problèmes LMI

Depuis quelques années, de nombreux travaux, concernant l'analyse et la synthèse de la commande des systèmes dynamiques, se résolvent par l'intermédiaire de problèmes convexes, notamment, la programmation semi-définie (SDP) [Ghaoui 1997]. Parmi ces méthodes, on distingue la méthode du point intérieur développée initialement pour la programmation linéaire qui a été étendue par [Nesterov 1994] dans le cas de la programmation convexe dans l'espace des matrices définies positives. En automatique, cette approche est connue sous le nom de LMI (Linear Matrix Inequalities) [Boyd 1994], cette méthode est l'une des plus appliquées dans le domaine de la commande grâce à l'existence de méthodes de résolution numérique efficaces. Dans le paragraphe suivant nous allons présenter les principes de bases de cette approche.

D.0.2 Ensembles convexes

Définition. D.0.1 *Un ensemble C est dit convexe si :*

$$\forall \lambda \in [0, 1], (x_1, x_2) \in C^2 \Rightarrow \lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2 \in C \quad (\text{D.1})$$

Une propriété importante des ensembles convexes est que l'intersection de deux ensembles convexes est un ensemble convexe.

D.0.3 Fonctions convexes

Soit la fonction f définie par :

$$D \subset \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R} \quad (\text{D.2})$$

$$x \rightarrow f(x) \quad (\text{D.3})$$

La fonction f est convexe si :

1. le support (ensemble de définition) D de f est convexe.
2. $\forall x \in D, \forall y \in D, \forall \lambda \in [0, 1], f(\lambda x + (1 - \lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1 - \lambda)f(y)$.
(pour la convexité stricte, on remplace \leq par $<$).

D.0.4 Inégalités Linéaires Matricielles (LMIs)

Définition. D.0.2 LMI est une inégalité matricielle de la forme :

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0 \quad (\text{D.4})$$

Où $\forall x \in \mathbb{R}^m$ est une variable et $F_i = F_i^T, i = 1, \dots, n$ sont des matrices symétriques données. L'inégalité (D.4) est définie positive c.-à-d. $u^T F(x) u > 0$ pour tout u non nul $\in \mathbb{R}^n$. L'inégalité (D.4) est une LMI stricte.

Une LMI non stricte est donnée par :

$$F(x) \geq 0 \quad (\text{D.5})$$

La LMI (D.5) est une contrainte convexe en x , en d'autres termes l'ensemble $\{x | F(x) > 0\}$ est convexe.

Un ensemble de LMIs peut s'écrire sous la forme d'une seule LMI. En effet, il suffit de les écrire dans une matrice bloc diagonale comme suit :

$$F_1(x) > 0, F_2(x) > 0, \dots, F_p(x) > 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} F_1(x) & 0 & \dots & 0 \\ 0F_2(x) & \dots & 0 & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & F_p(x) \end{pmatrix} > 0 \quad (\text{D.6})$$

D.0.5 Obtention des LMI

Le plus souvent, dans les problèmes d'automatique des inégalités matricielles non linéaires (non convexes) sont obtenues. Afin de pouvoir utiliser la puissance des outils LMIs pour la résolution de ces problèmes, il est nécessaire de les transformer en LMIs. Pour ce faire, plusieurs méthodes existent. Les méthodes utilisées dans ce mémoire sont le changement de variables x et le complément de Schur.

Lemme. D.0.1 (complément de schur [Boyd 1994]) soient trois matrices $Q(x) = Q(x)^T, R(x) = R(x)^T$ et $S(x)$ affines par rapport à la variable x . Les LMIs suivantes sont équivalentes :

- 1.

$$\begin{pmatrix} Q(x) & s(x) \\ s(x)^T & R(x) \end{pmatrix} \quad (\text{D.7})$$

- 2.

$$R(x) > 0, Q(x) - s(x)R(x)^{-1}s(x) > 0 \quad (\text{D.8})$$

En d'autres termes l'inégalité matricielle non linéaire (D.9) est transformée en LMI (D.7).

D.0.6 Exemple C.1 (Etude de la stabilité)

Soit le système linéaire :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (\text{D.9})$$

D'après la théorie de Lyapunov , le système (D.9) est stable s'il existe une fonction de Lyapunov $V(x(t))$ telle que $\forall x \neq 0, V(x(t)) > 0$ et $\dot{V}(x(t)) < 0$. En choisissant $V(x(t)) = x(t)^T P x(t)$ où P est une matrice symétrique à déterminer on obtient

$$\forall x \neq 0 \begin{cases} V(x(t)) > 0 \\ V(x(t)) < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P > 0 \\ A^T P + P A < 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} P & 0 \\ 0 & -(A^T P + P A) \end{pmatrix} > 0 \quad (\text{D.10})$$

D.0.7 Exemple C.2 (Etudes du gain L_2 des systèmes linéaires)

Soit le système linéaire :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (\text{D.11})$$

Où $u(t)$ représente l'entrée du système. Si le système est stable et que l'entrée $u(t)$ est bornée alors il existe $\gamma > 0$ tel que :

$$\int_0^\infty y(t)^T y(t) dt \leq \gamma^2 \int_0^\infty u(t)^T u(t) dt \quad (\text{D.12})$$

La valeur γ est appelé gain L_2 du système de manière générale et en particulier pour les systèmes linéaires de la forme (D.10) , γ correspond à la norme H_∞ de la fonction de transfert associée au système (D.10).

Lemme. D.0.2 *Lemme borné réel (Bounded Real Lemma (BRL) [Boyd 1994]) la contrainte (D.12) est vérifiée pour tout $u(t) \neq 0$ et bornée si et seulement s'il existe une matrice P telle que :*

$$\begin{pmatrix} A^T P + P A & P B + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (\text{D.13})$$

Pour une valeur donnée de γ , l'inégalité (D.13) définit une LMI en la variable P .

$$\begin{aligned} \min_{P, \bar{\gamma}} \bar{\gamma} \\ P > 0 \end{aligned} \quad (\text{D.14})$$

$$\begin{pmatrix} A^T P + P A + C^T C & P B + C^T D \\ B^T P + D^T C & D^T D - \gamma^2 I \end{pmatrix} < 0 \quad (\text{D.15})$$

D.1 Résolution des LMI

L'introduction de la méthode d'optimisation convexe dite "méthode du point intérieur" a permis le développement de plusieurs algorithmes de résolution de problèmes LMIs. Afin de faciliter l'utilisation des solveurs basés sur ces algorithmes, quelques boîtes à outils ont été développées pour permettre d'écrire et de résoudre ces problèmes de manière simple. On peut citer la boîte à outils LMI toolbox de Mathworks, la LMI-tools développée par Laurent El-Ghaoui et l'interface SeDuMi développée au Laboratoire d'Architecture et d'Analyse des Systèmes (LAAS) par Dimitri Peaucelle. Toutes les LMIs des exemples présentés dans cette thèse ont été résolues avec la méthode SDP ainsi que l'interface CVX et le YALMIP.

Bibliographie

- [A. Stotsky 2001] I. Kolmanovsky A. Stotsky. *Simple unknown input estimation techniques for automotive applications*. American Control Conference, p.p 3312-3317, 2001. (Cité en page 33.)
- [Akhenak 2004] Akhenak. *Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodèle : application au diagnostic*. thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004. (Cité en pages 11 et 13.)
- [Alwi 2006] Alwi et Edwards. *Robust sensor fault estimation for tolerant control of a civil aircraft using sliding modes*. In Proceedings of the American Control Conference, Minneapolis, USA, pages 5704-5709, 2006. (Cité en page 42.)
- [Amato 2006] F. Amato, C. Cosentino, M. Mattei et G. Paviglianiti. *A direct/functional redundancy scheme for fault detection and isolation on an aircraft*. Aerospace Science and Technology, 10(4) :338-345, 2006. (Cité en page 42.)
- [Anzurez-Marin 2008] J. Anzurez-Marin et J. Villar-Garca N. Pitalua-Diaz O. Cuevas-Silva. *Unknown input observers design for fault detection in a two-tank hydraulic system*. Robotics and Automotive Mechanics Conference. CERMA '08. Electronics, p.p 373-378, 2008. (Cité en page 46.)
- [Arcak 2001] M. Arcak et P. Kokotovic. *Nonlinear observers : A circle criterion design and robustness analysis*. Automatica, 2001. (Cité en page 41.)
- [Arcak 2002] M. Arcak. *A global separation theorem for a new class of nonlinear observers*. In 41th IEEE Conference on Decision and Control CDC, Las Vegas, Nevada, USA, 2002. (Cité en page 41.)
- [Aubry 1998] D. Aubry, M. Boutayeb et M. Darouach. *Observateurs de type Kalman étendu pour les systèmes non linéaires temps discret : application à une machine asynchrone*. In Colloque Inter-GDR Thème Commande des Entraînements Electriques, Paris, France, 1998. (Cité en page 41.)
- [Bagherpour 2013] E. Bagherpour et M. Hairi-Yazdi. *Disturbance Decoupled Residual Generation with Unknown Input Observer for Linear Systems*. Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), October 9-11, Nice, France, 2013. (Cité en page 46.)
- [Balluchi 2002] A. Balluchi et A. L. SangiovanniVincentelli L. Benvenuti. *Observers for Hybrid Systems with Continuous State Resets*. Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2002), Lisbon, Portugal, July, 2002. (Cité en page 8.)
- [Bateman 2008] F. Bateman, H. Noura et M. Ouladsine. *Active fault detection and isolation strategy for an unmanned aerial vehicle with redundant flight control surfaces*. In Proceedings of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, France, pages 1246-1251, 2008. (Cité en page 42.)
- [Beard 1971] Beard. *Failure Accommodation in Linear Systems Through Self Reorganization*. PhD dissertation, MIT, Dep, Aero, Astro Cambridge, 1971. (Cité en page 22.)
- [Blanke 2003] Blanke. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Heidelberg : Springer Verlag, 2003. (Cité en pages 6, 9 et 13.)

- [Blanke 2006] M. Blanke et M. Staroswiecki M. Kinnaert J. Lunze. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer, 2nd edition, 2006. (Cité en page 18.)
- [Borne 1992] P. Borne et F. Rotella I. Zambettakis G. Dauphin-Tanguy J. Richard. *Modélisation et identification des processus*. Tome 1, Editions Technip, 1992. (Cité en page 31.)
- [Boutayeb 1995] M. Boutayeb et M. Darouach. *Observers design for non linear descriptor systems*. In Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, Louisiana, USA, 1995. (Cité en page 40.)
- [Boutayeb 1997] M. Boutayeb et M. Darouach H. Rafaralahy. *Convergence analysis of the extended Kalman lter used as an observer for nonlinear deterministic discrete time systems*. IEEE Trans, on Automatic Control, 1997. (Cité en page 41.)
- [Boutayeb 2002] Mohamed Boutayeb, M. Darouach et H. Rafaralahy. *Generalized state space observers for chaotic synchronization and secure communication*. IEEE Trans. on Circuits and Systems, vol. 49, 2002. (Cité en pages 34 et 35.)
- [Boyd 1994] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron et V. Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Studies in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia, PA, 1994. (Cité en pages 39, 111, 112 et 113.)
- [Brunet 1990] Brunet. *Détection et Diagnostic de Pannes : Approche par Modélisation*. Paris : Hermès., 1990. (Cité en page 6.)
- [Cassar 1994] Cassar. *Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour des procédés industriels complexes*. Revue Diagnostic et SÃ»ret  de Fonctionnement,4(2), 179-202, 1994. (Cité en page 6.)
- [Cassar 1996] Cassar. *vers une approche unifiée de la surveillance*.  cole d'été d'Automatique de Grenoble, 1996. (Cité en page 6.)
- [Castang 2002] F. Castang et M. Monsion A. Zolgadri D. Henry. *A LMI approach for designing robust FDI filters guaranteed fault sensitivity performance*. SMC IEEE, Hammamet, Tunisie, 2002. (Cité en page 70.)
- [Charbonnaud 2004] P. Charbonnaud. *Supervision, surveillance et Diagnostic*. Chapitre 2. Surveillance et Supervision, Philippe Charbonnaud : Professeur des Universités, 2004. (Cité en page 14.)
- [Chen 1993] G. Chen. *Approximate Kalman ltering*. World Scientific series in approximations and decompositions, 1993. (Cité en page 41.)
- [Chen 1994] J. Chen, R. J. Patton et G. P. Liu. *Detecting incipient sensor faults in flight control systems*. In Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, volume 2, pages 871-876, 1994. (Cité en page 42.)
- [Chen 1999] Chen et Patton. *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer, Academic Publishers, Amesterdam, 1999. (Cité en pages 6, 13, 18, 46 et 70.)
- [Chiang 2001] Chiang. *Fault detection and diagnosis in industrial systems (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing)*. Springer, 2001. (Cité en page 6.)
- [Chow 1980] E. Chow. *Failure Detection System Design Methodology*. PhD thesis, M.I.T., Lab. Information and Detection System, Cambridge, M.A., 1980. (Cité en page 20.)
- [Chow 1984] Chow. *Analytical redundancy and the design of robust detection systems*. IEEE Transactions on Automatic Control 29(7), 603-614, 1984. (Cité en pages 18 et 20.)

- [Clark 1975] R. N. Clark, D.C. Fosth et V. M. Walton. *Detecting instrument malfunctions in control systems*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-11(4), p.p 465-473, 1975. (Cité en page 22.)
- [Combacau 1991] M. Combacau. *Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : applications aux ateliers flexibles*. thèse de doctorat, L'université Paul Sabatier, 1991. (Cité en page 18.)
- [Combacau 2000] M. Combacau, P. Berrut, F. Charbonnaud et A. Khatab. *Reflexions sur la terminologie : Surveillance-supervision*. Groupement pour la recherche en Productique, 2000. (Cité en page 18.)
- [Courtine 1997] S. Courtine. *Détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques*. L'institut national polytechnique de Grenoble, 1997. (Cité en page 79.)
- [Cristofaroa 2014] A. Cristofaroa et T. Johansenb. *A Fault tolerant control allocation using unknown input observers*. Automatica, vol. 50, p.p 1891-1897, 2014. (Cité en page 46.)
- [Daafouz 2006] J. Daafouz, M. Fliess et G. Millérioux. *Une approche intrinsèque des observateurs linéaires à entrées inconnues*. In Proc. of CIFA, IEEE Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 2006. (Cité en page 33.)
- [Daly 1979] Daly. *Generalised likelihood test for FDI in redundant sensor configuration*. Journal of Guidance and Control, Vol. 2, N1,p 9-17, 1979. (Cité en page 6.)
- [Darouach 1994] M. Darouach, M. Zasadzinski et S. J. Xu. *Full-Order Observers for Linear Systems with Unknown Inputs*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 3, 1994. (Cité en pages 36 et 40.)
- [Darouach 2009] M. Darouach. *Complements to full order observer design for linear systems with unknown inputs*. Applied Mathematics Letters, vol. 22, 2009. (Cité en pages 33 et 40.)
- [Dassanake 2000] S. K. Dassanake, G. L. Balas et J. Bokor. *Using unknown input observers to detect and isolate sensor faults in a turbofan engine*. Digital Avionics Systems Conferences, Vol. 7, p.p 6E51-6E57, 2000. (Cité en pages 27 et 28.)
- [Deckert 1998] Deckert. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering systems*. Marcel Dekker, 1998. (Cité en page 6.)
- [Delmaire 1994] G. Delmaire, J. P. Cassar et M. Staroswiecki. *Comparison of identification and parity space approach for failure detection insingle-input single output systems*. IEEE Conf. On Control Applications, Glasgow, Grande-Bretagne, p.p 865-870, 1994. (Cité en page 20.)
- [Desai 1976] Desai. *Dual-redundant sensor FDI techniques applied to the NASA F8CDFBW aircraf*. AIAA Guidance and Control conference, San Diego (California, USA), Vol. 1, p 502-513, 1976. (Cité en page 6.)
- [Desai 1979] Desai. *Dual sensor failure identification using analytic redundancy*. Journal of Guidance and Control, Vol.2, N3, p213-220, 1979. (Cité en page 6.)
- [Ding 1993] Ding et Frank. *A frequency domain approach to fault detection of uncertain dynamic systems*. In Proceedings of the 32th IEEE Conference on Decision and Control, pages 1722-1727. San Antonio, Texas, December, 1993. (Cité en pages 22 et 70.)
- [Ding 1994] Ding et Frank. *Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault diagnosis*. automatica, Vol. 30, pp. 784-804, 1994. (Cité en page 19.)

- [Ding 2000] S. X. Ding, T. Jeansch, P. M. Frank et E. L. Ding. *A unified approach to the optimization of fault detection systems*. Int J Adapt Control Signal Process, vol 14, p.p 725-745, 2000. (Cité en pages 40 et 70.)
- [Ding 2002] S.X. Ding et P.P. Frank. *An Approach to the Detection of Multiplicative Faults in Uncertain Dynamic Systems*. Proceeding of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, vol 6, p.p 4371-4376, Las Vegas, Nevada USA, 2002. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Ding 2008] Ding. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques Design Schemes, Algorithms*. 2008. (Cité en page 19.)
- [Duan 2001] G. Duan et R. Patton. *Detection using Luenberger-type unknown observers- A parametric approach*. International Journal of Systems Science, 32,533-540, 2001. (Cité en page 46.)
- [Edwards 2000] C. Edwards et S. K Spurgeon. *Sliding mode observers for fault detection and isolation*. Automatica, vol. 36, p.p 541-553, 2000. (Cité en page 33.)
- [Fan 2002] X. Fan et M. Arcak. *Nonlinear observer design for systems with multivariable monotone nonlinearities*. In 41th IEEE Conference on Decision and Control CDC, Las Vegas, Nevada, USA, 2002. (Cité en page 41.)
- [Fan 2003] X. Fan et M. Arcak. *Observer design for systems with multivariable monotone nonlinearities*. Systems and Control Letters, December, 2003. (Cité en page 41.)
- [Farza 1993] M. Farza, K. Busawon et H. Hammouri. *Simple nonlinear observers for on-line estimation of Kinetic rates in bioreactors*. Automatica, 1993. (Cité en page 41.)
- [Farza 2009] M. Farza, M. M'Saad, T. Maatouga et M. Kamounb. *Adaptive observers for nonlinearly parameterized class of nonlinear systems*. Automatica, vol. 45, p.p 2292-2299, 2009. (Cité en page 41.)
- [Farza 2010] M. Farza, M. M'Saad, T. Maatouga et M. Kamounb. *High gain observer for a class of non-triangular systems*. Systems and Control Letters, 2010. (Cité en page 41.)
- [Fellouah 2007] Fellouah. *Contribution au Diagnostic de Pannes pour les Systèmes Diff rentiel-lement Plats*. Thèse de Doctorat délivré par l'INSA de l'Université de Toulouse, 2007. (Cité en page 13.)
- [Frank 1980] Frank et Keller. *Sensitivity discriminating observer design for instrument failure detection*. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 16, 460-467., 1980. (Cité en page 22.)
- [Frank 1990] Frank. *Fault Diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy - A survey and some new results*". automatica. Vol. 26. pp. 459-474, 1990. (Cité en pages 18, 19, 22 et 70.)
- [Frank 1991] P. M. Frank et R. Seliger. *Fault detection and isolation in automatic processes*". C. Leondes, New York academic press, Ed., 49, p.p 241-287, 1991. (Cité en page 22.)
- [Frank 1994] Frank. *Enhancement of Robustness in Observer-Based Fault Detection*. International Journal of Control, Vo1.59, pp. 955-981, 1994. (Cité en pages 13 et 51.)
- [Frank 1996] P. M. Frank. *Analytical and qualitative model-based fault diagnosis- a survey and some new results*. European Journal of control 2(1), p.p 6-28, 1996. (Cité en pages ix et 22.)

- [Freddi 2009] A. Freddi, S. Longhi et A. Monteriu. *A model-based fault diagnosis system for unmanned aerial vehicles*. In Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain, pages 71-76, 2009. (Cité en page 42.)
- [Gaddouna 1994] B. Gaddouna, D. Maquin et J. Ragot. *Fault detection observers for systems with unknown inputs*. Proceedings of the 2nd IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Espoo, Finland, 1994. (Cité en page 33.)
- [Garcia 1997] E. Alcorta Garcia et P. M. Frank. *Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis : a survey*. Control Engineering Practice, 5(5) :663-670, 1997. (Cité en page 42.)
- [Gauthier 1981] J. P. Gauthier et G. Bornard. *Observability for any $u(t)$ of a class of bilinear system*. IEEE Transactions on Automatic Control 26, 922-926, 1981. (Cité en page 41.)
- [Gauthier 1992] J. P. Gauthier, H. Hammouri et S. Othman. *A simple observer for nonlinear systems - application to bioreactors*. IEEE Transactions on Automatic Control 37, 875-880, 1992. (Cité en page 41.)
- [Gauthier 1994] J. P. Gauthier et I. A. K. Kupka. *Observability and observers for nonlinear systems*. SIAM Journal on Control and Optimization tome 32, no 4, p.p 975-994, 1994. (Cité en page 41.)
- [Gertler 1988] J. J. Gertler. *Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants*. IEEE Control Systems Magazine, 8, p.p 3-11, 1988. (Cité en page 8.)
- [Gertler 1990] Gertler. *A new structural framework for parity equations based failure detection and isolation*. Automatica 26(2), 381-388, 1990. (Cité en pages 18, 19 et 53.)
- [Gertler 1993] Gertler et Qiu. *Robust FDI systems and Hq optimization*. In Proceedings of the 32th IEEE Conference on Decision and Control, pages 1710-1715. San Antonio, Texas, December, 1993. (Cité en page 17.)
- [Gertler 1995] J. J. Gertler et M. M. Kunwer. *Optimal residual decoupling for robust fault diagnosis*. International Journal of 61(2) p.p 395-421, 1995. (Cité en page 19.)
- [Gertler 1997] J. Gertler et G. DiPierro. *On the link between parity relations and parameter estimation*. in IFAC 3rd Safe process Symp, Vol. 26, p.p. 381-388, 1997. (Cité en page 19.)
- [Gertler 1998] Gertler. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering systems*. Marcel Dekker, 1998. (Cité en page 18.)
- [Ghaoui 1997] L. El Ghaoui et H. Lebret. *Robust solutions to least-squares problems with uncertain data*. SIAM J. Matrix Analysis and Applications, vol. 18, no. 4, pp. 1035-1064, 1997. (Cité en page 111.)
- [Golub 1991] G. H. Golub et C. F. Van Loan. *Matrix Computations Baltimore*. The Johns Hopkins University Press, 1991. (Cité en page 70.)
- [Guan 1991] Guan et Saif. *A Novel Approach to the Design of Unknown Input Observer*. IEEE Trans. Autom. Control , tome 36, p.p 632-635, 1991. (Cité en pages 28, 33 et 36.)
- [Guerra 2004] R. M. Guerra et S. Diop. *Diagnosis of nonlinear systems using an unknown input observer : An algebraic and differential approach*. IEEE Control Theory and Applications, Vol. 15 (1), p.p 130-135, 2004. (Cité en page 28.)

- [Hafaifa 2005] A. Hafaifa et F. Laaouad et K. Laroussi. *Detection and isolation of Surge in centrifugal compressor with a correct Safety System*. International conference APPA Advances in production and processing of Aluminum. Kingdom of Bahrain, 2005. (Cité en page 53.)
- [Hafaifa 2007] A. Hafaifa et F. Laaouad et K. Laroussi. *Utilisation de la méthode FDI pour la localisation de défauts de fonctionnement d'un processus non linéaire*. In Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, volume 2, p.p 871-876, 2007. (Cité en page 53.)
- [Hassibi 1999] A. Hassibi et S. Boyd J. How. *A path-following method for solving BMI problems in control*. American Control Conference, San Diego, California, vol. 2, pages 1385-1389, 1999. (Cité en pages 30 et 39.)
- [Henry 2005] D. Henry et A. Zolghadri. *Design and analysis of robust residual generators for systems under feedback control*. Automatica, vol. 41, Issue 2, p.p 251-264, 2005. (Cité en pages 69 et 70.)
- [Hissel 2007] D. Hissel et R. Outbib Hernandez. *Méthodes de diagnostic de systèmes multi-physiques*. Techniques de l'ingénieur, 2007. (Cité en page 18.)
- [Hou 1992] M. Hou et P. Muller. *Design of observers for linear systems with unknown inputs*. IEEE Trans. Automatic Control, 37, p.p 871-875, 1992. (Cité en pages 40 et 46.)
- [Hou 1999] M. Hou et A.C. Pugh. *Observer with linear error dynamics for nonlinear multi output systems*. Systems and Control Letters, vol. 37, p 19, 1999. (Cité en page 41.)
- [Hui 2005] S. Hui et S. H. Zak. *Low-Order Unknown Input Observers*. American Control Conference June 8-10, 4192-4197. Portland, OR, USA, 2005. (Cité en page 46.)
- [Husson 2007] R. Husson et J. Daafouz D. Wolf C Lung J. F. Aubry. *Automatique (Du cahier des charges à la réalisation de systèmes)*. Livre Dunod Edition, 2007. (Cité en page 54.)
- [Isermann 1984] Isermann. *Process fault detection based on modeling and estimation methods a survey*. Automatica, vol. 20, no 4, p. 387-404, 1984. (Cité en pages 6, 18, 20 et 21.)
- [Isermann 1991] R. Isermann et B. Freyermuth. *Process fault diagnosis based on process model knowledge - part i : Principles for fault diagnosis with parameter estimation*. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control 113, p.p 620 - 626, 1991. (Cité en pages 20 et 21.)
- [Isermann 1993] R. Isermann. *Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing*. Automatica, vol. 29, Issue 4, p.p 815-835, 1993. (Cité en page 21.)
- [Isermann 1997] R. Isermann et P. Balle. *Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes*. Control Engineering Practice, 5(5), p.p 709-719, 1997. (Cité en page 18.)
- [Isermann 2006] Isermann. *Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes*. Control Engineering Practice, 5(5) : 709-719, 2006. (Cité en pages 6, 18 et 20.)
- [Isermann 2007] Isermann. *Fault-diagnosis systems : An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, 2007. (Cité en page 13.)
- [J. Chen 1996] H. Zhang J. Chen R. Patton. *Design of unknown input observers and robust fault*. 1996. (Cité en page 46.)

- [Jiang 2005] B. Jiang et F. N. Chowdhury. *Parameter fault detection and estimation of a class of nonlinear systems using observers*. Journal of the Franklin Institute, vol. 342, p.p 725-736, 2005. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Jianga 2002] B. Jianga et J. L. Wang. *Actuator fault diagnosis for a class of bilinear systems with uncertainty*. Journal of the Franklin Institute, Vol. 339, p.p 361-374, 2002. (Cité en page 11.)
- [Johansson 2006] A. Johansson et T. Norlander M. Bask. *Dynamic Threshold Generators for Robust Fault Detection in Linear Systems with Parameter Uncertainty*. Automatica.vol.42, p.p 1095-1106, 2006. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Johnson 1975] C. D. Johnson. *Observers for linear systems with unknown and inaccessible inputs*. International Journal of Control, Vol. 21, p.p 825-831, 1975. (Cité en page 27.)
- [Jones 1973] H.L. Jones. *Failure Detection in linear Systems*. Thèse, Massachusetts, Institute of Technology, Cambridge ,MA, 1973. (Cité en page 22.)
- [Jouffroy 2004] J. Jouffroy et J. J. E.Slotine. *Methodological remarks on contraction theory*. IEEE conference on Decision and control, p.p 2537-2543, 2004. (Cité en page 42.)
- [Kailath 1980] T. Kailath. *Linear Systems*. Prentice Hall information and system sciences series, 1980. (Cité en page 32.)
- [Kalsi 2010] K. Kalsi et H. S. Zaka J. Lian S. Hui. *Sliding-mode observers for systems with unknown inputs : A high-gain approach*. Automatica, vol. 46, p.p 347-353, 2010. (Cité en page 40.)
- [Kazantzis 1998] N. Kazantzis et C. Kravaris. *Nonlinear observer design using Lyapunov's auxiliary theorem*. Systems and Control Letters, 1998. (Cité en page 41.)
- [Khan 2011] A. Q. Khan et S. X. Ding. *Threshold computation for fault detection in a class of discrete-time nonlinear systems*. International journal of adaptive control and signal processing. vol. 25, p.p 407-429, 2011. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Kimmich 2005] F. Kimmich, A. Schwarte et R. Isermann. *Fault detection for modern Diesel engines using signal- and process model-based methods*. Control Engineering Practice, Vol. 13, p.p 189-203, 2005. (Cité en page 11.)
- [Kobayashi 1982] N. Kobayashi et T. Nakamizo. *An observer design for linear systems with unknown inputs*. International Journal of Control, Vol. 35, p.p 605-619, 1982. (Cité en page 28.)
- [Koenig 1996] Koenig. *New design of robust observers for fault detection and isolation*. Proceedings of the CDC,Kobe Japan, pp. 1464-1467, 1996. (Cité en page 28.)
- [Koenig 2001] D. Koenig et S. Mammar. *Design of a class of reduced order unknown inputs nonlinear observer for fault diagnosis*. American Control Conference, Vol. 3, p.p 2143-2147, 2001. (Cité en page 28.)
- [Koenig 2002] D. Koenig et S. Mammar. *Design of Proportional-integral observer for unknown input descriptor systems*. IEEE, Trans. on Automatic Control, Vol. 47 (12), p.p 2057-2062, 2002. (Cité en page 40.)
- [Kou 1975] S. R. Kou, D. L. Elliott et T. J Tarn. *Exponential observers for nonlinear dynamic systems*. Information and Control, vol. 29, 1975. (Cité en page 41.)

- [Kreisselmeier 2003] G. Kreisselmeier et R. Engel. *Nonlinear observers for autonomous Lipschitz continuous systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, 2003. (Cité en page 41.)
- [Krener 1983] A. J. Krener et A. Isidori. *Linearization by output injection and nonlinear observers*. Systems and Control Letters, 1983. (Cité en page 41.)
- [Krener 1985] A. J. Krener et W. Respondek. *Nonlinear observers with linearizable error dynamics*. SIAM Journal of Control Optimization 23, p.p 197-205, 1985. (Cité en page 41.)
- [Kudva 1980] P. Kudva, N. Viswabhadham et A. Ramakrishna. *Observers for linear systems with unknown inputs*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 25, pages 1131-15, 1980. (Cité en pages 28 et 33.)
- [Liu 2002] C. S. Liu et H. Peng. *Inverse-dynamics based state and disturbance observers for linear time-invariant systems*. Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol. 124, p.p 375-381, 2002. (Cité en pages 28 et 33.)
- [Liu 2007] F. Liu. *Synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes non linéaires*. doctorat de l'université de basse-normandie, Université de Basse Normandie, 2007. (Cité en pages 31, 35, 36 et 40.)
- [Lohmiller 1998] J. Lohmiller et J. J. E. Slotine. *On contraction analysis for nonlinear systems*. Automatica, vol. 34, no. 6, 1998. (Cité en page 42.)
- [Lohmiller 2000] J. Lohmiller et J. J. E. Slotine. *Control system design for mechanical systems using contraction theory*. IEEE Trans. Automatic Control, vol. 45, no. 5, 2000. (Cité en page 42.)
- [Lohmiller 2005] J. Lohmiller et J. J. E. Slotine. *Contraction analysis of nonlinear distributed systems*. International Journal of Control, 2005. (Cité en page 42.)
- [Lou 1986] X. Lou et G. Verghese A. Wilsky. *Optimally robust redundance relations for failure detection in uncertain systems*. Automatica 22, 333-344, 1986. (Cité en page 20.)
- [Lyubchik 1993] L. M. Lyubchik et Y. T. Kostenko. *The output control of multivariable systems with unmeasurable arbitrary disturbances-The inverse model approach*. ECC'93, Groningen, The Netherlands, p.p 1160-1165, 1993. (Cité en page 28.)
- [M. Benallouch 2007] M. Boutayeb J. J. Slotine M. Benallouch E. Laroche. *Nonlinear observer design for synchronization and information recovery in communication systems using contraction theory*. European Control Conference, Ile de KoÅ§, Grèce, 2007. (Cité en page 42.)
- [Magni 1992] J. F. Magni et P. Mouyon. *On residual generation by observer and parity space approaches*. Proc. of the 31st IEEE Conference on Decision and Control 1, p.p 185-190, 1992. (Cité en page 19.)
- [Mangoubi 1998] R.S. Mangoubi. *Robust estimation and failure detection : a concise treatment*. Springer Verlag, 1998. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Maquin 1994] D. Maquin et J. Ragot B. Gaddouna. *Estimation Of Unknown Inputs In Linear Systems*. American Control Conference, Vol. 1, p.p 1195-1197, 1994. (Cité en pages 33 et 70.)
- [Maquin 1997] Maquin. *Habilitation à diriger des recherches, Institut National polytechnique de Lorraine*. Control Engineering Practice, 5(5), p.p 709-719, 1997. (Cité en page 18.)

- [Maquin 2000] Maquin. *Diagnostic des systèmes linéaires. Collection Pédagogique d'Automatique*. Hermès Science Publications, Paris, 2000. (Cité en pages 6 et 13.)
- [Marzat 2011] Marzat. *Diagnostic des systèmes aéronautiques et réglage automatique pour la comparaison de méthodes*. Thèse de doctorat en Physique, Université Paris-Sud XI, Faculté des Sciences d'Orsay, 2011. (Cité en pages 16 et 42.)
- [Massoumnia 1986] M. Massoumnia. *A geometric approach to the synthesis of failure detection filters*. IEEE Trans. on Automatic Control 31(9), p.p 839 - 846, 1986. (Cité en page 22.)
- [Massoumnia 1989] M. Massoumnia, G. Verghese et A. Willsky. *Failure detection and identification*. IEEE Trans. on Automatic Control 34(3), p.p 316 -321, 1989. (Cité en page 22.)
- [Meditch 1971] J. S. Meditch et G. H. Hostetter. *Observers for systems with unknown and inaccessible inputs*. International Journal of Control, Vol. 19, p.p 637-640, 1971. (Cité en page 27.)
- [Merahi 2010] Merahi. *Estimation d'Etat et Diagnostic de Fonctionnement des Systèmes non Linéaires*. mémoire magister, 2010. (Cité en pages 10, 16 et 17.)
- [Meseguer 2010] J. Meseguer et J. Saludes V. Puig T. Escobet. *Observer gain effect in linear interval observer-based fault detection*. Journal of Process Control, vol. 20, p.p 944-956, 2010. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Milne 1987] Milne. *Strategies for diagnosis*. IEEE Trans. on Sys., Man & Cybernetics SMC-17(3) : 333-339, 1987. (Cité en page 6.)
- [Moreno 2001] J. Moreno. *Existence of unknown input observers and feedback passivity for linear systems*. IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 1, p.p 3366-3371, 2001. (Cité en page 27.)
- [Nesterov 1994] Y.E. Nesterov et A.S. Nemirovski. *Interior Point Polynomial Algorithms Programming*. SIAM Publications, SIAM Philadelphia, PA, 1994. (Cité en page 111.)
- [Niculescu 2001] S. L. Niculescu. *Introduction à l'optimisation convexe : Approche par LMIs*. HEUDIASYC (UMR CNRS 6599), Université de Technologie de Compiègne, 2001. (Cité en pages 30 et 39.)
- [Olin 1991] Olin et Rizzoni. *Design of robust fault detection filters*. ACC'91, American Control Conference, p.p 1522-1527, 1991. (Cité en page 22.)
- [O'Reilly 1983] J. O'Reilly. *Observers for linear systems*. volume 170. Mathematics in science and engineering., 1983. (Cité en page 32.)
- [Oscar 2005] Oscar et D. Odloak A. Z. Sotomayor. *Observer-based fault diagnosis in chemical plants*. Chemical Engineering Journal, vol 112 : p.p 93-108, 2005. (Cité en page 46.)
- [Ouahi 2011] Ouahi. *Observation de systèmes à entrées inconnues, applications à la dynamique automobile*. Thèse de doctorat Génie Informatique et Automatique Université de Limoges, 2011. (Cité en page 40.)
- [Oumayma 2012] Oumayma. *Sur la résolution des problèmes inverses pour les systèmes dynamiques non linéaires. Application à l'électrolocation, À l'estimation d'état et au diagnostic des éoliennes*. Thèse de doctorat de l'université de GRENOBLE spécialité : automatique-productique, 2012. (Cité en page 8.)

- [Park 2004] T. G. Park et K. S. Lee. *Process fault isolation for linear systems with unknown inputs*. In IET Control Theory and Applications, volume 151, pages 720-726, 2004. (Cité en page 42.)
- [Patton 1989] R. J. Patton, P. Frank et R. Clark. *Fault diagnosis in dynamic systems : theory and application*. Prentice Hall, Englewood international Series in systems and control Engineering new Jersey, 1989. (Cité en pages 13, 18 et 22.)
- [Patton 1991] R. J. Patton. *A review of parity space approaches to fault diagnosis*. SAFE PROCESS'91, IFAC Symposium on Fault Diagnostic, Supervision and Safety for technical processes, Baden-Baden, Germany, Vol. 1, p.p 239-255, 1991. (Cité en page 20.)
- [Patton 1997] R. J. Patton et J. Chen. *Observer-based fault detection and isolation : Robustness and applications*. Control Engineering Practice, Vol. 5 (5), p.p 671-682, 1997. (Cité en page 11.)
- [Patton 2000] Patton. *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer Verlag, 2000. (Cité en pages 6, 22 et 40.)
- [Patton 2007] R. J. Patton et B. Polle. F. J. Uppal S. Simani. *Robust FDI applied to thruster faults of a satellite system*. In Proceedings of the 17th IFAC Symposium on Automatic Control and Aerospace, Toulouse, France, 2007. (Cité en page 42.)
- [Pertew 2005] A.M. Pertew et Q. Zhao. Hinni H.J. Marquez. *Synthesis of unknown input observers for non-linear Lipschitz systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 78, no. 15, p.p 1155-1165, 2005. (Cité en page 40.)
- [Phelps 1991] A. R. Phelps. *On constructing nonlinear observers*. SIAM Journal on Control and Optimization, 29(3),p.p 516-534, 1991. (Cité en page 41.)
- [Ploix 1998] Ploix. *Diagnostic des systèmes incertains : l'approche Bornante*. Thèse de l'institut National Polytechnique de Lorraine, 1998. (Cité en pages 6 et 7.)
- [Potter 1977] Potter. *Threshold less redundancy managements with arrays of skewed instruments*. Integrity in electronic flight control systems, AGARDOGRAPH-224 15, 1-25, 1977. (Cité en pages 6 et 20.)
- [Raghavan 1994] S. Raghavan et J. K. Hedrick. *Observer design for a class of nonlinear systems*. Int. J.of Control, 59(2), p.p 515-528, 1994. (Cité en page 41.)
- [Ragot 1993] J. Ragot et D. Maquin F. Kratz. *Analytical redundancy for systems with unknown inputs. A pplication to fault detection*. control Theory and Advanced Technology, vol 9, n 03, p.p 775-788, 1993. (Cité en page 70.)
- [Ragot 1996] J. Ragot et D. Maquin. *Techniques récentes de diagnostic de systèmes et rôle de l'instrumentation*. Congrès de la société de l'industrie Minérale, Montpellier, France, p.p 1-4, 1996. (Cité en page 20.)
- [Ragot 1998] J. Ragot et D. Maquin. *Techniques récentes de diagnostic de systèmes et rôle de l'instrumentation*. Séminaire de l'Ecole Doctorale PROMEN : Quelle métrologie pour le XXIème siècle Nancy, France, In Récents Progrès en Génie des Procédés, vol. 12, no 60, p.p 35-52, 1998. (Cité en page 20.)
- [Ragot 2000] J. Ragot et D. Maquin. *Diagnostic des systèmes linéaires. Collection Pédagogique d'Automatique*. Hermès Science Publication, Paris., 2000. (Cité en page 13.)

- [Ragot 2005] J. Ragot, M. Darouach et G. Bloch D. Maquin. *Validation de données et diagnostic, Traité des nouvelles Technologies, série diagnostic et maintenance*. Hermès Science Publication, Paris., 2005. (Cité en page 13.)
- [Rajamani 1998] R. Rajamani. *Observers for Lipschitz nonlinear systems*. IEEE Trans. Automatic Control, 43(3), p.p 397-401, 1998. (Cité en page 41.)
- [Rambeaux 2000] F. Rambeaux et D. Sauter F. Hamelin. *Optimal thresholding for robust fault detection of uncertain systems*. International journal of robust and nonlinear control, 10, p.p 1155-1173, 2000. (Cité en page 70.)
- [Rank 1999] M. L. Rank et H. Niemann. *Norm based design of fault detectors*. International Journal of control, vol.72, Issue 9, p.p 773-795, 1999. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Reif 1998] K. Reif, F. Sonnemann et R. Unbehauen. *An EKF based nonlinear observer with a prescribed degree of stability*. Automatica, 34(9), p.p 1119-1123, 1998. (Cité en page 41.)
- [Reiter 1987] Reiter. *A theory of diagnosis from first principles*. Artificial Intelligence, 32 :57-95, 1987. (Cité en page 6.)
- [Rifai 2006] K. El Rifai et J. J. E. Slotine. *Compositional contraction analysis of hybrid nonlinear systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006. (Cité en page 42.)
- [Ripoll 1999] Ripoll. *vers une approche unifiée de la surveillance*. Doctorat de l'université de SAVOIE, 1999. (Cité en pages 6, 16 et 21.)
- [Saif 1993] M. Saif et Y. Guan. *A new approach to robust fault detection and identification*. IEEE Trans, on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 29 (3), p.p 685-695, 1993. (Cité en page 28.)
- [Samantaray 2006] A. K. Samantaray et M. Staroswiecki G. Dauphin-Tanguy K. Medjaher B. Ould Bouamama. *Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation*. Simulation Modelling Practice and Theory . Vol.14, Issue 3, p.p 237-262, 2006. (Cité en page 18.)
- [Samantaray 2008] A. K. Samantaray et B. Ould Bouamama. *Model-based Process Supervision. A Bond Graph Approach*. Springer Verlag, Series : Advances in Industrial Control, 490 p. ISBN : 978-1-84800-158-9, Berlin, 2008. (Cité en page 18.)
- [Scorletti 2006] G. Scorletti. *Outils pour la robustesse : inégalités matricielles affines*. GREYC Equipe Automatique, U.F.R. de Sciences, Université de Caen GREYC Equipe Automatique 6, Boulevard du Maréchal Juin 14050 Caen Cedex, 2006. (Cité en pages 30 et 39.)
- [Seliger 1991] R. Seliger et P. M. Frank. *Fault-diagnosis by disturbance decoupled nonlinear observers*. In Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, Brighton, England, 1991. (Cité en page 33.)
- [Sharma 1987] R. Sharma et M. Aldeen. *The extended lunberger observer for nonlinear systems*. System & control letters 9, p.p 194-153, 1987. (Cité en page 41.)
- [Sharma 2004] R. Sharma et M. Aldeen. *Estimation of unknown disturbances in nonlinear systems*. In Control, University of Bath, UK, 2004. (Cité en page 40.)
- [Staroswiecki 2001] M. Staroswiecki et A. L. Gehin. *From control to supervision*. Annual Reviews in Control, vol. 25, p.p 1-11, 2001. (Cité en page 9.)
- [Stephane 1988] Courtine Stephane. *Detecting changes in signals and systems a survey*. Automatica, 24(3) :309-326, 1988. (Cité en pages 18, 20 et 22.)

- [Stephane 2006] Courtine Stephane. *Détection et localisation de défauts dans les entraînements électriques*. thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006. (Cité en pages 18 et 49.)
- [Sun 2013] X. Sun. *Unknown Input Observer Approaches to Robust Fault Diagnosis*. Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Hull by Xiaoyu Sun, MSc Electronics Shenyang (China) BSc Automation Shenyang, 2013. (Cité en page 47.)
- [Tahraoui 2015] Souad Tahraoui et D. Boubekour A. Meghebbar A. Bellaouar. *Actuators Fault Detection Using Unknown Input Observer in Hydraulic System*. 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology CEIT'2015 Tlemcen, Algeria, 2015. (Cité en pages 56 et 60.)
- [Termehchy 2013] A. Termehchy et Javidsharifi A. Afshar M. *A Novel Design of Unknown Input Observer for Fault Diagnosis in the Tennessee-Eastman Process, System to Solve Non-minimum Phase Problem*. Proc. of the IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), Kuala Lumpur, Malaysia, 2013. (Cité en page 46.)
- [Thau 1973] F. E. Thau. *Observing the state of non-linear dynamic systems*. International Journal of Control, vol. 17, 1973. (Cité en page 41.)
- [Toscano 2011] Toscano. *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques (Modélisation, Analyse, Commande par PID et par retour d'état, Diagnostic)*. Livre Ellipses Edition, 2011. (Cité en pages 7, 19, 48, 70, 72 et 74.)
- [Touati 2012] Touati. *Diagnostic Robuste et estimation de défauts à base de modèle Bond Graph*. Thèse de doctorat de l'université Lille 1(spécialité Automatique et Informatique Industrielle), 2012. (Cité en page 18.)
- [Travé-Massuyès 1997] L. Travé-Massuyès, P. Dague et F. Guerrin. *Le Raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Editions Hermes, Paris, 1997. (Cité en page 25.)
- [Valcher 1999] M. E. Valcher. *State observers for discrete-time linear systems with unknown inputs*. IEEE, Trans. on Automatic Control, Vol. 44 (2), p.p 397-401, 1999. (Cité en page 27.)
- [Venkatasubramanian 2003] V. Venkatasubramanian et S. N. A Kavuri R. Rengaswamy K. Yin. *review of process fault detection and diagnosis*. Computers & Chemical Engineering, Vol. 27, p.p 293-346, 2003. (Cité en page 18.)
- [Viswanadham 1987] Viswanadham et Srichander. *Fault detection using unknown input observers*, Control. Theory and Advanced Technology, Vol. 3, Issue2, pp. 91 - 101, 1987. (Cité en pages 19, 22 et 46.)
- [Wang 1975] Wang. *Observing the states of systems with unmeasurable disturbances*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 20, pp.716-717, 1975. (Cité en pages 27 et 33.)
- [Wang 2007] Wang et Lum. *Adaptive unknown input observer approach for aircraft actuator fault detection and isolation*. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 21, Issue1, pp. 31-48, 2007. (Cité en pages 40, 42 et 70.)
- [Watanabe 1982] K. Watanabe et D. M. Himmelblau. *Instrument fault detection in systems with uncertainties*. International Journal of System Sci., Vol. 13, p.p 137, 1982. (Cité en page 28.)

- [White 1987] J. White et J. Speyer. *Detection filter design : Spectral theory and algorithms*. IEEE Trans. on Automatic Control 32(7), p.p 593-603, 1987. (Cité en page 22.)
- [Willsky 1976] Willsky. *A survey of design methods for failure detection in dynamic systems*. Automatica 12(6), 601-611, 1976. (Cité en pages 6 et 18.)
- [Wonham 1985] W. M. Wonham. *Optimal stationary control of linear system with state dependent noise*. SIAM Journal of Control, 1985. (Cité en page 32.)
- [Xiong 1998] Xiong et Saif. *A novel design for robust fault diagnostic observers*. Proceedings of the CDC, Florida, pp. 592-597, 1998. (Cité en page 27.)
- [Yang 1988] F. Yang et R. W. Wilde. *Observers for linear systems with unknown inputs*. IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 33, p.p 677, 1988. (Cité en pages 28, 36 et 40.)
- [Zasadzinski 2000] M. Zasadzinski, E. Magarotto et M. Darouach. *Unknown input reduced order observer for singular bilinear systems with bilinear measurements*. IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 1, p.p796-801, 2000. (Cité en page 28.)
- [Zemouri 2003] R. Zemouri. *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance*. thèse de doctorat, l'Université de Franche-Comté, 2003. (Cité en page 18.)
- [Zolgadri 2006] A. Zolgadri et D. Henry F.Castang. *Design of robust fault detection filters for multivariable feedback systems*. International journal of modeling and simulation, ACTA Prass, Vol.26, N 1, 2006. (Cité en pages 46 et 70.)
- [Zwingelstein 1995] Zwingelstein. *Diagnostic des défaillances-Theorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris, Hermes, 1995. (Cité en pages 6 et 18.)

Résumé

Les enjeux actuels de l'automatique sont essentiellement l'optimisation de performances et la surveillance des processus qui répondent respectivement aux demandes croissantes en termes de rendement, d'exploitation et de sécurité des installations et des opérateurs. L'enjeu est très important pour la surveillance des systèmes complexes critiques où le déterminisme des tâches de diagnostic et de contrôle de cohérence est une condition sine qua non. Ces objectifs se traduisent par le besoin de lois de commande plus efficaces et par l'intégration de modules de surveillance sophistiqués. L'un comme l'autre requiert la collecte d'une information précise et complète quant à l'état du processus à commander et à surveiller.

Les travaux développés dans le cadre de cette thématique concernent la surveillance et le diagnostic des systèmes à base de modèles dynamiques très perturbés par l'utilisation d'observateurs à entrées inconnues. Notre contribution porte sur le problème de la sensibilité des indicateurs de défauts (actionneurs-capteurs) par rapport à ces entrées inconnues (bruits de mesure-défauts de modélisation et perturbations) par la mise en oeuvre de deux méthodes de génération de capteurs informatiques dites à découplage parfait et à découplage approximatif. Les applications et la mise en oeuvre de ces méthodes sont testées sur des processus hydrauliques du fait de l'existence réelle de ces systèmes, de la simplicité de leurs modélisations mais aussi qu'ils sont très didactiques.

Mots clés : Surveillance, Diagnostic, Observateurs à Entrées Inconnues, Découplage, LMI.

Abstract

Today's challenges of automatic control engineering focus essentially on performance optimization and monitoring of processes which have to meet the respective growing demands in terms of performance, operation and safety of facilities and operators. The issue is very important for monitoring complex critical systems where the determinism of diagnosis and consistency control tasks is essential. To meet these objectives, more efficient control laws are needed and sophisticated monitoring modules are to be integrated. Each one requires collecting accurate and complete information about the status of the process to be controlled and monitored. It works developed within this theme deal with the monitoring as well as the diagnosis of systems based on very disturbed dynamic models, using unknown input observers. The present work investigates the problem of sensitivity of fault indicators (actuators - sensors) with respect to these unknown inputs (measurement noise, modeling faults and disturbances) through the implementation of two methods of generating computer sensors. These methods are known as perfect decoupling and approximate decoupling.

The implementation of these methods is tested on hydraulic processes, because these systems exist in reality; they are simple to model and are very didactical.

Mots clés : Monitoring, Diagnosis, Unknown Inputs Observers, Decoupling, Linear Matrix Inequality.

ملخص

العمل المنجز في هذه المذكرة يبين طريقة تقدير الحالة وكذلك كشف وتحديد الاعطاب التي تصيب النماذج الغير الخطية بالاعتماد على الملاحظات وذلك لتحسين الأداء وعملية الرصد التي تلبي الطلبات المتزايدة على التوالي من حيث الأداء والتشغيل وسلامة المنشآت والمشغلين. الرهانات جدا مهمة لرصد النظم الحيوية حيث المهام المعقدة الحتمية للتشخيص وتدقيق التناسق هو شرط مسبق. وتنعكس هذه الأهداف الحاجة إلى قوانين مراقبة أكثر فعالية ودمج وحدات الرصد متطورة. واحد مثل غيرها يتطلب جمع معلومات دقيقة وكاملة حول حالة عملية يمكن السيطرة عليها ومراقبتها.

العمل موضوع في هذه المذكرة هو رصد أنظمة التشخيص على أساس نماذج ديناميكية مزعوجة جدا عن طريق استخدام المراقبين المدخلات غير معروف. وتركز مساهمتنا على مشكلة الحساسية مؤشرات العيوب (المحرك استشعار) فيما يتعلق المدخلات غير معروف النمذجة مدى خطأ والاضطرابات) من خلال تنفيذ طريقتين جيل من أجهزة استشعار الكمبيوتر اقول فصل مثالية وفصل تقريبيه.

ويتم اختبار التطبيقات وتنفيذ هذه الأساليب على العمليات الهيدروليكية نظرا لوجود الفعلي لهذه النظم، وبساطة نماذجها ولكن أيضا هم تعليمية للغاية.

كلمات البحث: الرصد والتشخيص والمراقبون الإدخال غير معروف، فك الارتباط، تباين المصفوفات الخطية.