

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Département du Génie Electrique
Spécialité Automatique

Projet de fin d'études

*Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique*

THÈME

**Contribution aux Méthodes de Diagnostic
à Base d'Observateurs
et à la Commande Tolérante aux Défauts
Application à la Machine Asynchrone
et au Robot SCARA**

Etudié par :

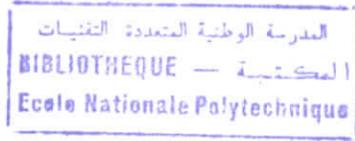
M^{elle} LALEG Taous Meriem

Proposé et dirigé par :

M^r. M. TADJINE
M^r. M.S. BOUCHERIT

Juin 2004

*Laboratoire de Commande des Processus
Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie*



Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.



DEDICACES

A qui puis je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également,

A mes deux, très chers, frères, Nazim et Aziz, pour leur soutien, leur aide, leurs encouragements.

A mes deux grand-mères, je pense qu'elles sont fières de leur petite fille fétiche.

A la mémoire de mon regretté grand père.

A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines.

A Monsieur Loumachi, mon professeur de mathématique au Lycée de Tadmaït, à qui, je ne saurais comment exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude pour ses perpétuels conseils et encouragements.

A tous les amis de mes frères, que ce soit à Tadmaït (Nabil, Redouane, Madjid, Foued, Ghanou, Djamel...) ou à Polytech (Wissem, Azzedinne, Tichou, Adem, Djallel, Said, Malek, Boualem, Mehdi ...) et qui me considèrent comme leur sœur.

A tous mes amis de Polytech, Assia, Khawla, Khadîdja, Amina, Amine, Youcef...

A toute personne qui porte de l'estime pour moi.



REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire de fin d'études ont été effectués au sein du Laboratoire de Commande des Processus (LCP) de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP), sous la direction de Messieurs M. Tadjine et M.S. Boucherit, que je remercie pour leur encadrement, leur aide, leurs directives, leurs conseils précieux et surtout à la confiance qu'ils m'ont accordée.

Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.

Je remercie également tous les professeurs du département d'Automatique de l'ENP, pour leur aide, leurs conseils et leur compréhension.

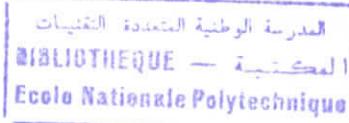
J'exprime ma reconnaissance à Mademoiselle Boutekedjiret et Madame Chami pour leurs conseils précieux.

Je n'oublie pas également de remercier le personnel de la bibliothèque de l'ENP et plus particulièrement « Ami Salah » pour sa gentillesse remarquable.

Mes vifs remerciements à Monsieur Jean du CCU.

Je tiens également à remercier les transports ALGER/TIZI-OUZOU et en particulier les transports FERTAL, pour leur sérieux, leur ponctualité, leur compréhension me permettant ainsi d'effectuer la navette dans les meilleures conditions.

Je remercie toute personne qui m'a apporté son aide, ne serait-ce que minime.



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
 CHAPITRE I. INTRODUCTION AU DIAGNOSTIC DES DEFAUTS A BASE DE MODELE.	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définitions et concepts.....	5
I.3 Principe du diagnostic des défauts.....	6
I.3.1 Redondances d'informations.....	6
I.3.2 Procédure de détection et d'isolation des défauts.....	7
I.4 Présentation des Méthodes du diagnostic.....	8
I.4.1 Méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique.....	9
I.4.1.1 Méthodes des équations de parité.....	9
I.4.1.2 Méthodes d'estimation paramétrique.....	9
I.4.1.3 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs.....	10
I.4.2 Détection des défauts par traitement du signal.....	10
I.4.3 Diagnostic à base de modèle qualitatif.....	11
I.4.4 Méthodes de Classification.....	11
I.4.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle.....	11
I.5 Modélisation du système en vue du diagnostic.....	12
I.5.1 Types de défauts.....	12
I.5.2 Modélisation des défauts.....	13
I.5.3 Modélisation des perturbations.....	13
I.5.4 Comportement des défauts.....	14
I.6 Critères de performance d'un système de diagnostic.....	15
I.7 Principe de génération et d'évaluation du vecteur résidu pour la détection et la localisation des défauts.....	16
I.7.1 Méthodologie générale de génération du vecteur résidu.....	16
I.7.2 Techniques d'évaluation de résidus.....	17
I.8 Problème de robustesse dans les méthodes à base de modèle mathématique.....	18
I.8.1 Problème de génération de résidus robustes : le découplage.....	19
I.8.2 Evaluation robuste des résidus.....	20
I.9 Conclusion.....	21

CHAPITRE II. METHODES A BASE D'OBSERVATEURS ET PROBLEME FPRG

II.1 Introduction.....	22
II.2 Principe et méthodologie.....	22
II.3 Problème Fondamental de Génération des Résidus.....	23
II.3.1 Positionnement du problème.....	23
II.3.2 Découplage.....	24
II.3.3 Structuration des résidus.....	24
II.3.3.1 Structure d'observateur simplifié (SOS).....	24
II.3.3.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS).....	25
II.3.3.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS).....	25
II.4 Résolution du FPRG.....	26
II.4.1 Exemple de l'utilisation de l'observateur de Luenberger généralisé.....	26
II.4.2 Approche géométrique pour la résolution du FPRG.....	28
II.4.2.1 Introduction.....	28
II.4.2.2 Cas des systèmes linéaires.....	28
II.4.2.3 Cas des systèmes non linéaires affines en la commande.....	31
II.4.2.4 Exemple académique.....	34
II.5 Conclusion.....	36

CHAPITRE III. OBSERVATEURS DEDES AU DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES SYSTEMES NON LINEAIRES

III.1 Introduction.....	37
III.2 Observateurs dédiés au diagnostic des défauts des systèmes non linéaires.....	37
III.2.1 Observateurs non linéaires.....	37
III.2.2 Observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire.....	39
III.2.3 Observateurs par modes glissants dédiés à la détection et la localisation des défauts.....	41
III.2.3.1 Introduction.....	41
III.2.3.2 Observateur par modes glissants d' Edwards, Spurgeon et Patton pour les systèmes linéaires.....	42
III.2.3.3 Observateurs par modes glissants de Walkat-Zak pour les systèmes non linéaires.....	47
III.2.3.4 Observateurs par modes glissants étape par étape.....	47
III.2.3.5 Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes.....	50
III.3 Conclusion.....	54

CHAPITRE IV. SUR LA COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS

IV.1 Introduction.....	55
------------------------	----

IV.2 Définitions et concepts.....	55
IV.3 Positionnement du problème.....	56
IV.4 Les différentes approches de commandes tolérantes aux défauts.....	58
IV.4.1 Accommodations passives.....	59
IV.4.2 Accommodations actives.....	59
IV.4.3 Accommodations adaptatives.....	59
IV.5 Différentes méthodes de commandes tolérantes aux défauts.....	60
IV.5.1 Méthode de la pseudo inverse.....	60
IV.5.2 Commande adaptative.....	60
IV.5.3 Commande multi modèle.....	61
IV.5.4 Commande à structure variable (modes glissants).....	61
IV.5.5 Intégration du processus de surveillance des défauts dans la procédure de Commande.....	61
IV.6 Proposition d'une méthode FTC.....	62
IV.7 Conclusion.....	67

CHAPITRE V. DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR LES METHODES A BASE D'OBSERVATEURS

V.1 Introduction.....	68
V.2 Défauts de la machine asynchrone.....	68
V.3 Méthodes de diagnostic des défauts de la machine asynchrone.....	69
V.3.1 Les méthodes de tests.....	69
V.3.2 Les méthodes modernes.....	70
V.3.2.1 Les méthodes d'estimation des paramètres.....	70
V.3.2.2 Les méthodes d'analyse spectrale.....	71
V.4 Modélisation de la machine asynchrone en vue de son diagnostic.....	71
V.5 Application des méthodes à base d'observateur par modes glissants pour la détection et la localisation des défauts de la MAS.....	72
V.5.1 Observateur d'Edwards, Spurgeon et Patton.....	72
V.5.2 Observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants.....	76
V.5.2.1 Structure de l'observateur de défauts.....	76
V.5.2.2 Synthèse d'un observateur par modes glissants avec capteur de vitesse pour la MAS.....	77
V.5.3 Comparaison entre les deux approches	85
V.6 Conclusion.....	86

CHAPITRE VI. DETECTION DES DEFAUTS ET RECONFIGURATION DES LOIS DE COMMANDE POUR LES ROBOTS MANIPULATEURS

VI.1 Introduction.....	87
------------------------	----

VI.2 Défauts des robots manipulateurs.....	87
VI.3 Modélisation du robot SCARA à quatre degrés de liberté en vue de son diagnostic.....	88
VI.3.1 Modèle du robot sain.....	88
VI.3.2 Modélisation des défauts.....	89
VI.4 Détection et accommodation : première approche.....	91
VI.4.1 Détection et estimation des défauts.....	91
VI.4.1.1 Phase de détection.....	92
VI.4.1.2 Phase d'estimation des défauts.....	103
VI.4.2 Accommodation aux défauts.....	105
VI.5 Accommodation aux défauts par la méthode proposée dans le paragraphe (IV.6)...	108
VI.6 Comparaison entre les deux approches	115
VI.7 Conclusion	115
CONCLUSION GENERALE.....	116
BIBLIOGRAPHIE.....	118
ANNEXE	
Annexe A. Notions de géométrie différentielle.....	I
Annexe B. Notions d'observabilité pour les systèmes linéaires et non linéaires.....	IV
Annexe C. Machine asynchrone.....	VIII
Annexe D. Robot SCARA à quatre degrés de liberté.....	XVII



Nomenclature

I. Symboles

C_r :	couple résistant.
$d(t)$:	vecteur des perturbations (entrées inconnues).
$E_d(x)$:	distribution vectorielle modélisant l'effet des perturbations.
$E_f(x)$:	distribution vectorielle modélisant l'effet des défauts.
$f(t)$:	vecteur des défauts.
$f_a(t)$:	défauts du type actionneur.
$f_c(t)$:	défauts du type capteur.
$f_p(t)$:	défauts composants ou paramétriques.
$G(\theta)$:	vecteur gravitationnel.
$J(r(t))$:	fonction de décision.
j :	moment d'inertie
K_f :	coefficient de frottements.
L :	sous espace engendré par les colonnes de $E_f(x)$.
L_s :	inductance cyclique statorique.
L_r :	inductance cyclique rotorique.
$M(\theta)$:	matrice d'inertie.
P :	sous espace engendré par les colonnes de $E_d(x)$.
$(Q_p^*)^\perp$:	sous espace d'observabilité minimal, invariant et contenant l'effet des perturbations.
$r(t)$:	vecteur résidus.
R_s :	résistance statorique.
R_r :	résistance rotorique.
$T(t)$:	seuil de détection.
$T(x)$:	matrice de découplage.
$u(t)$:	vecteur de commande.
U :	commande globale (accommodée).
U_c :	commande additive (terme qui compense l'effet des défauts).
U_n :	commande nominale (en absence de défauts).
$V(\theta, \dot{\theta})$:	vecteur des forces centrifuges et de coriolis.

$x(t)$:	vecteur d'état.
$y(t)$:	vecteur de sortie.
$\Phi(x)$:	transformation de l'état (difféomorphisme).
\sum^p :	distribution minimale, involutive, invariante et contenant l'effet des perturbations.
$(\sum^p)^\perp$:	codistribution de \sum^p .
θ :	vecteur position articulaire.
$\dot{\theta}$:	vecteur vitesse articulaire.
$\ddot{\theta}$:	vecteur accélération articulaire.
τ :	vecteur couple/force d'entrée.
η :	incertitudes de modélisation.
η_0 :	borne supérieure des incertitudes.
$span\{ \}$:	espace engendré par un ensemble de vecteurs.

Les autres symboles utilisés sont définis dans le texte.

II. Abréviations

DOS:	structure d'observateurs dédiés (Dedicated Observer Scheme).
FDI :	détection et isolation des défauts (Fault Detection and Isolation).
FPRG :	problème fondamental de génération des résidus (Fundamental Problem of Residual Generation).
FTC :	commande tolérante aux défauts (Fault Tolerant Control).
GOS :	structure d'observateurs généralisés (Generalized Observer Scheme).
l-NLFPRG :	problème local de génération de résidus pour les systèmes non linéaires (Local Non Linear Fundamental Problem of Residual Generation).
MAS:	Machine Asynchrone.
MPIM:	Méthode de la Pseudo Inverse Modifiée.
o.c.a:	algorithme des codistributions observables (Observability Codistribution Algorithm).
RBFN :	réseaux de neurones à base radiale (Radial Basis Function Network).
SCARA :	Selective Compliance Assembly Robot Arm.
SOS :	structure d'observateur simplifié (Simplified Observer Scheme).



INTRODUCTION GENERALE

Suite au développement important et rapide qu'a connu le monde industriel, les procédés de fabrication sont de plus en plus complexes et sophistiqués. Par conséquent, l'augmentation de la fiabilité, la disponibilité et la sûreté de fonctionnement, constitue à l'heure actuelle, l'une des préoccupations majeures des industriels.

Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis le début des années 70 [MAQ00], [REI99], [ZWI95], [ZWI96]. En effet, la recherche dans ce domaine n'a fait que prendre de l'importance dans le monde entier. Généralement, lorsqu'on parle du diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers que l'on retrouve dans la littérature sous la forme FDI (Fault Detection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de détecter la présence du défaut et de localiser sa provenance le plus rapidement possible [CLA75], [CLA79], [DEP00], [FRA90], [HUO01], [ISE84], [MAS86], [PAT91], [WIL76]. Néanmoins, dans certains systèmes complexes, comme dans l'aéronautique ou les centrales nucléaires, la phase de détection et de localisation des défauts, bien qu'elle soit nécessaire, n'est pas suffisante pour garantir la sûreté de fonctionnement. Il est, en effet, indispensable de modifier la loi de commande en temps réel afin de maintenir la stabilité et de garantir au mieux les performances du système. Ceci étant possible en associant au diagnostic une loi de commande tolérante aux défauts [BLA01], [JAM03], [NOU00], [PAT97], [SAU03].

L'approche la plus intuitive pour la détection et la localisation des défauts consiste à ajouter des capteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système: c'est la redondance matérielle. Néanmoins, celle-ci s'avère coûteuse. Ainsi, dans le but d'assurer un diagnostic moins onéreux et plus écologique, des méthodes, dites de redondance analytique, ont été proposées. Ces dernières consistent à développer des algorithmes de détection et de localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système.

Une classification des méthodes de diagnostic consiste à séparer entre les méthodes à base de modèle mathématique et les méthodes symboliques. Dans le premier cas, on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le second cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son

état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme ou à l'intelligence artificielle.

Notons que le point commun à toutes les approches à base de modèle mathématique est la synthèse d'un signal, nommé résidu, dont le rôle principal consiste à assurer la distinction entre le fonctionnement normal du système et un fonctionnement anormal dû à l'apparition d'un défaut, indépendamment des perturbations, des bruits et des incertitudes de modélisation, d'une part et de différencier l'effet des différents défauts entre eux d'autre part. Ainsi le problème de détection et de localisation des défauts, par ces méthodes, revient à un problème de génération et d'évaluation des résidus, couramment connu sous le nom FPRG (Fundamental Problem of Residual Generation). Parmi les différentes approches proposées dans ce contexte :

- L'approche à base d'observateur [CLA79],[EDW00], [JOI02], [LOO01], [TAN02].
- L'approche à base d'estimation paramétrique [ISE84].
- L'approche par projection dans l'espace de parité [MAQ00].

Les méthodes à base d'observateurs s'avèrent très efficaces pour la détection et la localisation des défauts. Elles ont connu un essor considérable pour le cas des systèmes linéaires. En effet, des méthodes très performantes permettent aujourd'hui d'accomplir les objectifs d'une détection et d'une localisation des défauts d'une manière efficace et rapide. Néanmoins, l'extension au cas non linéaire demeure particulièrement difficile. Ainsi, les modèles non linéaires sont communément linéarisés autour d'un point de fonctionnement afin d'appliquer les méthodes développées pour le cas linéaire [EDW00], [LAL04], [OUC04]. Cependant, cette linéarisation est la cause principale d'erreurs de modélisation engendrant des fausses alarmes. Une seconde alternative consiste à concevoir des observateurs, tenant compte directement du caractère non linéaire du procédé [DEP00], [IEN99], [JOI02], [LOO01]. Néanmoins, il n'existe pas de méthodes générales applicables pour tout système non linéaire.

Récemment, une nouvelle approche, basée sur des concepts géométriques et permettant la génération des résidus en utilisant des observateurs, a été proposée. Dotée de propriétés intéressantes, celle-ci offre des avantages considérables pour la résolution du FPRG, en particulier pour les systèmes non linéaires [DEP00], [JOI02], [MAS86].

En parallèle au développement des méthodes FDI, diverses recherches ont été dédiées à la commande tolérante aux défauts: FTC (Fault Tolerant Control) [JAM03], [NOU00], [PAT97], [SAU03]. Cette dernière a pour but de maintenir la stabilité et les performances d'un système de commande en présence de défauts. Les méthodes proposées dans ce domaine peuvent être regroupées en trois approches : l'approche passive, l'approche adaptative et l'approche active. L'approche passive utilise des techniques de commandes robustes. Dans l'accommodation adaptative, la structure de la commande est fixe, seuls les paramètres de celle-ci sont modifiés. L'approche active, quant à elle, est plutôt récente. Elle est basée sur le principe de reconfiguration et de correction de la loi de commande dès détection d'un défaut. Ainsi,

l'objet des études actuelles dans ce domaine, aujourd'hui, consiste à savoir comment intégrer les techniques de diagnostic existantes au profit de la commande tolérante aux défauts [JAM03], [NOU00], [SAU03].

La détection et la localisation des défauts ainsi que la commande tolérante aux défauts se voient impliquer dans divers domaines : industriel, aéronautique, militaire et automobile...etc. Néanmoins, le choix de la méthode la plus appropriée à un système donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles. En effet, l'industriel devra choisir la méthode qui lui sera techniquement et économiquement la plus efficace. Ainsi, le problème du diagnostic diffère selon le contexte et le domaine d'application.

Le diagnostic des machines électriques, en particulier de la machine asynchrone, a mobilisé aujourd'hui un nombre important de chercheurs. En effet, en raison de sa fiabilité, sa robustesse, son coût relativement faible et sa simplicité de conception, la machine asynchrone bénéficie d'une attention particulière intégrant ainsi différentes applications industrielles. Cependant, malgré les qualités évoquées, il n'est pas rare que ces machines présentent quelques défaillances. Le besoin de surveillance et de diagnostic se fait alors, de plus en plus, sentir pour tendre vers une maintenance prédictive où l'arrêt d'urgence ou forcé, qui engendre des pertes de production et des réparations coûteuses, serait exclu.

Initialement, la surveillance de la MAS s'appuyait sur des méthodes de test, utilisant des grandeurs caractéristiques de celle-ci. Bien que ces méthodes soient simples, elles sont imprécises et ne permettent pas la localisation des défauts. En réponse à ces limitations, des méthodes modernes ont été développées. Elles se subdivisent en des approches d'analyse spectrale [CRU99], [HAM95], [RAZ03] et des méthodes d'estimation des paramètres [CHR99], [HEN99], [LAL04], [MOR99], [SCH99]. C'est dans cette dernière catégorie que rentre l'approche à base d'observateurs, qui bien qu'aujourd'hui, présente des limitations concernant le diagnostic des défauts de la MAS, elle constitue une solution performante pour la génération des résidus.

Le domaine de la robotique est un autre exemple qui sollicite énormément les techniques FDI et FTC. En effet, de par leurs caractéristiques, telles que leur puissance, rapidité et résistance en milieux hostiles, les robots manipulateurs ont intégré de nombreux domaines y compris le domaine industriel. Néanmoins, une anomalie de comportement au sein d'un robot peut occasionner des dégâts importants, dont des pertes en productivité, une diminution de la durée de vie du système mais favorisent également un environnement dangereux pour l'opérateur humain. Les facteurs engendrant ces anomalies peuvent provenir de l'environnement externe au robot, qui change d'une manière permanente (température, humidité...etc.) ou encore de son environnement interne, qui subit des changements importants et indésirables dus par exemple aux frottements, aux bruits et aux vibrations. Vu l'enjeu, diverses méthodes ont été proposées pour la détection et la localisation des défauts ainsi que pour la commande tolérante aux défauts pour les robots manipulateurs [FAN03], [KME02], [PAR96], [TIN01], [TIN02] [VIS91].

Le travail, présenté dans le cadre de ce projet de fin d'études, consiste à faire une synthèse sur l'état de l'art de la détection et de la localisation des défauts ainsi que de la commande tolérante aux défauts. Mais aussi, à travers deux applications : la machine asynchrone et le robot industriel SCARA, nous voulons sensibiliser sur la problématique du diagnostic : c'est un domaine très vaste, qui dépend de divers facteurs et touche un nombre important d'applications. Ce travail contribue également à enrichir les méthodes à base d'observateurs dédiées à la détection et la localisation des défauts, en proposant une structure d'observateur de défauts applicable aux systèmes linéaires et non linéaires. Cette même structure sera utilisée pour des objectifs de reconfiguration de lois de commande.

Le présent travail comporte six chapitres.

Le premier chapitre présente les principes fondamentaux sur lesquels repose le diagnostic des défauts des systèmes physiques. Un intérêt particulier sera consacré aux méthodes à base de modèle.

Les approches à base d'observateurs feront l'objet du deuxième chapitre, dans lequel il sera présenté le principe de celles-ci ainsi que les techniques utilisées pour la résolution du problème FPRG. Il sera ainsi présenté les concepts de base de l'approche géométrique.

Le troisième chapitre recense quelques observateurs dédiés au problème de détection et d'isolation des défauts des systèmes non linéaires. L'intérêt portera surtout sur l'utilisation des observateurs robustes et plus particulièrement les observateurs par modes glissants, en raison de leurs propriétés très intéressantes. Et c'est dans ce contexte, que nous proposerons un générateur de résidus, constitué d'un observateur de défauts associé à un observateur d'état par modes glissants.

Le quatrième chapitre concerne la commande tolérante aux défauts. Après présentation de l'état de l'art de celle-ci, une approche d'accommodation aux défauts, basée sur l'utilisation de l'observateur de défauts proposé dans le troisième chapitre, sera présentée.

Le cinquième chapitre touche au diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Il est question de positionner le problème et d'étudier les performances des approches à base d'observateurs pour la détection et la localisation des défauts de celle-ci.

Enfin, le dernier chapitre s'intéresse au problème de détection des défauts et de reconfiguration des lois de commande pour les robots manipulateurs. Des simulations seront effectuées sur le modèle du robot industriel SCARA à quatre degrés de liberté.

Une conclusion générale donnera une synthèse du travail effectué et résumera les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

1.1 INTRODUCTION

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI), est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ». [ZW195].

En général, 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, en anglais). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications. Ainsi, les travaux de Chandler, Clark, De Persis, Edwards, Frank, Gertler, Hammouri, Isermann, Isidori, Massoumnia, Patton, Willskey et bien d'autres constituent des références dans ce domaine [CLA75], [CLA79], [DEP00], [EDW00], [FRA90], [HEN99], [HUO01], [ISE84], [JOI02], [LOO01], [MAQ00], [MAS86], [PAT91], [TAN02], [OUC04], [WIL76].

Ce chapitre est une introduction à l'état de l'art du diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. L'intérêt portera essentiellement sur le problème de détection et d'isolation des défauts. Il est question, dans un premier temps, de mettre en relief les différents concepts et notions rencontrés dans la littérature du diagnostic des défauts car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base du diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine.

D'autre part, nous allons présenter 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. Mais auparavant, nous allons introduire la manière avec laquelle aborder un problème FDI. Nous insisterons sur la phase de modélisation du système et des différents défauts et entrées inconnues. Nous aborderons également les critères de performance d'un système FDI et nous nous intéresserons, plus particulièrement, au problème de robustesse.

1.2 DEFINITIONS ET CONCEPTS [OUC04], [ZW195]

- Une **anomalie** est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique.
- Une **défaillance** est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique.

- **Une panne** est l'incapacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- **Un défaut** est une anomalie de comportement au sein du système. 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 donc de panne.
- **Une perturbation** consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, bon ou mal, représenté par un modèle de référence.
- **Un résidu** est un signal conçu comme un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
- **Un symptôme** est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.

I.3 PRINCIPE DU DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS

I.3.1 Redondances d'informations

Le principe de base du diagnostic des défauts repose sur la notion de redondance, qui fournit au système plusieurs informations différentes sur une même variable. Des tests vont alors permettre de vérifier la cohérence de ces informations. Cependant, il existe deux approches:

- La première est dite traditionnelle et consiste à ajouter des capteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système. C'est la redondance matérielle [MEZ00].

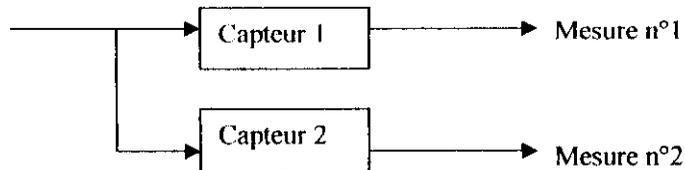


Figure I.1 : Schéma représentant la redondance matérielle.

L'inconvénient majeur de cette approche est le coût additionnel en équipement.

➤ La deuxième approche est dite redondance analytique. Elle consiste à développer des algorithmes de détection et de localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système. Une équation de redondance analytique est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. Pour éviter les fausses alarmes ou les manques de détection, ces algorithmes doivent tenir compte des bruits de mesure, des perturbations ainsi que des erreurs de modélisation. Les méthodes basées sur cette approche sont plus simples, plus flexibles, moins coûteuses et plus écologiques que l'approche traditionnelle [HOU01], [LEU02], [MAQ00], [OUC04].

1.3.2 Procédure de détection et d'isolation des défauts

La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles [MEZ00], [LOO01]:

- a. **La détection** : C'est l'étape qui décide si le système est soumis à un défaut ou pas. Elle consiste dans la plus part des cas à générer le vecteur résidu, qui est nul en fonctionnement normal et est comparé en ligne aux signatures de pannes. La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.
- b. **La localisation** : Cette étape permet de localiser le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie.
- c. **L'identification** : L'ampleur et le type des défauts sont estimés dans cette phase.

Ces étapes sont résumées sur la figure suivante :

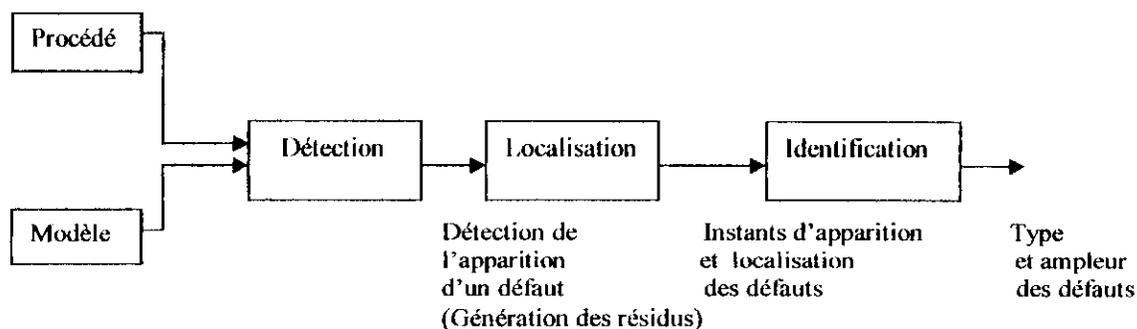


Figure I.2 : Procédure de détection et d'isolation des défauts.

I.4 PRESENTATION DES METHODES DE DIAGNOSTIC

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Il est possible de les classer selon le schéma de la figure (I.3).

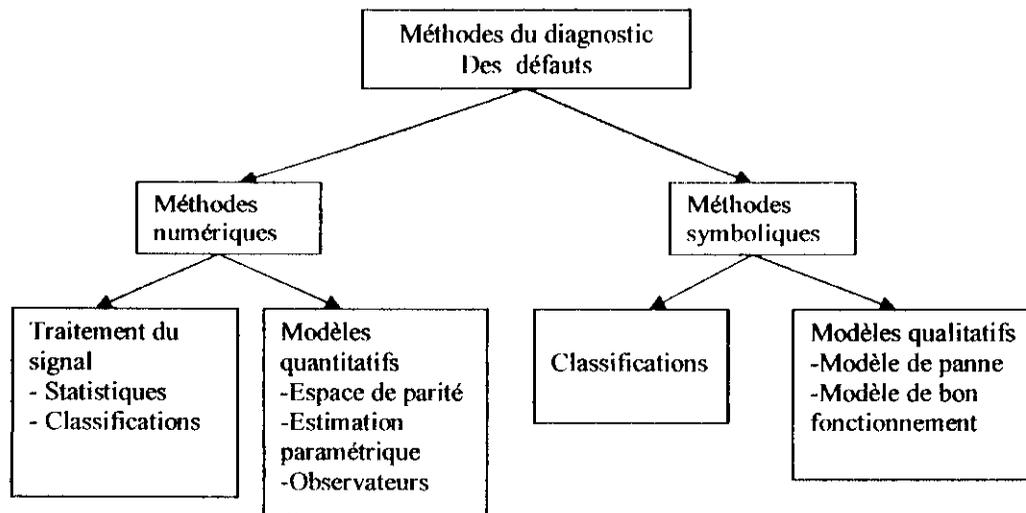


Figure I.3 Méthodes du diagnostic des défauts.

Selon que l'on dispose, ou pas, d'un modèle mathématique représentatif du système, les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes. Dans le premier cas, on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme ou à l'intelligence artificielle [IHU01], [MEZ00], [OUC04].

Les méthodes les plus familières aux automaticiens sont les méthodes basées sur l'utilisation de modèles mathématiques. Celles-ci utilisent la redondance existant entre les différentes variables mesurées en terme de relations statiques ou dynamiques.

Dans l'étude qui suit, il sera question de présenter les différentes méthodes de détection et d'isolation des défauts. L'intérêt portera surtout sur les méthodes à base de modèle mathématique.

I.4.1 Méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique

Les méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique reposent sur la connaissance approfondie du procédé sous la forme d'un modèle numérique représentatif, qui fournit des grandeurs caractéristiques du procédé. Ces dernières sont constamment comparées aux grandeurs issues du procédé réel. Le problème FDI à base de modèle mathématique a attiré l'attention de nombreux chercheurs, tels que Willskey [WIL76], Isermann [ISE84], Frank [FRA90], Patton [PAT91]...etc. Les méthodes proposées, dans ce contexte, peuvent être regroupées en trois catégories:

- Méthodes d'espace de parité.
- Méthodes d'estimation paramétrique.
- Méthodes à base d'observateurs.

Bien que ces approches soient différentes, leur but est le même; il consiste à générer un vecteur caractéristique : le résidu, qui est sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence. Ainsi, le problème de diagnostic des défauts par ces méthodes peut se reformuler sous la forme d'un problème de génération de résidus. Ces derniers devant justifier de certaines propriétés. C'est ce que l'on retrouve dans la littérature sous le nom du Problème Fondamental de Génération de Résidus : "FPRG", (Fundamental Problem of Residual Generation) [JOI02], [LOO01], [DEP00], [MAS86].

I.4.1.1 Méthodes des équations de parité

Initialement, les méthodes des équations de parité utilisaient des schémas dits de redondance parallèle [MAQ00]. Pour ces structures, le nombre de mesures est plus grand que le nombre de variables et les résidus sont directement issus de la comparaison de mesures redondantes. Cette approche a été ensuite généralisée pour l'utilisation de la redondance temporelle. Par dualité, cette redondance est également appelée redondance série [MAR00]. Le terme parité a été emprunté au vocabulaire employé par les systèmes logiques où la génération des bits de parité permet la détection des erreurs.

Dans cette approche, l'ensemble des valeurs que peuvent prendre les résidus compose un espace, dans lequel, le vecteur de parité est défini comme étant la valeur des résidus à un instant donné. Ce vecteur prend alors une direction dans le cas de l'apparition d'un défaut.

I.4.1.2 Méthodes d'estimation paramétrique

La détection et la localisation des défauts peuvent être effectuées en utilisant des techniques d'identification, si la structure du modèle est connue [ISE84]. L'idée de base consiste à estimer les paramètres du système en temps réel et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts. On en distingue deux approches : [MEZ00], [OUC04] :

- Méthodes de l'erreur d'équation.
- Méthodes de l'erreur de sortie.

La procédure de détection de défauts par la méthode d'estimation paramétrique est résumée dans ce qui suit :

1. Modélisation mathématique du procédé.
2. Description des relations entre les constantes physiques supposées connues et les paramètres du modèle.
3. Estimation des paramètres du modèle à partir des entrées et sorties du système.
4. Estimation des paramètres du système.
5. Le vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entre les grandeurs estimées et les valeurs nominales.

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de paramètres, dont il est possible de citer : l'estimation par projection orthogonale, l'estimation Bayésienne, l'estimation au sens du maximum de vraisemblance ou encore l'estimation au sens des moindres carrés.

I.4.1.3 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Les méthodes de diagnostic des défauts à base d'observateurs sont basées sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). Cette technique se voit donner une importance grandissante car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles.

De très nombreux travaux ont été développés concernant la synthèse d'observateurs pour le diagnostic des systèmes physiques. Les travaux de Clark vers la fin des années 70, constituent les premiers pas dans ce domaine [CLA75], [CLA79]. D'autres études ont été effectuées par la suite par Basseville, Frank, Al, Massoumnia, Patton, Ding...etc. [HUU01], [JOI02], [LOO01], [MAQ00], [MEZ00], [OUC04]. Ce point sera amplement développé dans les chapitres (II) et (III).

I.4.2 Détection des défauts par traitement du signal

L'analyse d'un signal est une source d'informations. En effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts [MEZ00], [ZWI95], [ZWI96]. Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale.

I.4.3 Diagnostic à base de modèle qualitatif

Il est souvent difficile de développer des modèles mathématiques permettant de représenter la dynamique du système de manière exacte. D'autre part, il est plus aisé de manipuler des descriptions générales des systèmes. C'est dans ce contexte que des approches de diagnostic de défauts, basées sur des connaissances sur le système réel, ont été développées. Ces méthodes sont dites qualitatives ou encore heuristiques. [HUU01], [ZWI96]. L'information heuristique peut être exprimée de plusieurs manières, telles que l'utilisation de termes linguistiques (petit, grand, moyen...) ou les observations de l'opérateur humain ou encore l'arbre de défaillance, qui représente les connexions entre les symptômes et les défauts [HUU01], [REI99], [ZWI96]. D'autres approches de méthodes qualitatives ont été proposées telles que l'utilisation des systèmes experts [FRA90] et des chaînes de Markov [HUU01], [ZWI95], [ZWI96].

I.4.4 Méthodes de Classification

Le rôle d'un système de diagnostic est d'identifier le défaut le plus probable qui a engendré l'apparition d'un symptôme. Ce dernier se traduit par la différence entre des dispositifs en fonctionnement et les mêmes dispositifs fonctionnant sans défaillance. La relation entre les dispositifs et les symptômes passe par une procédure d'apprentissage expérimentale. Elle est sauvegardée de façon à avoir une base de données. Le principe des méthodes de classification est illustré sur la figure (I.4).

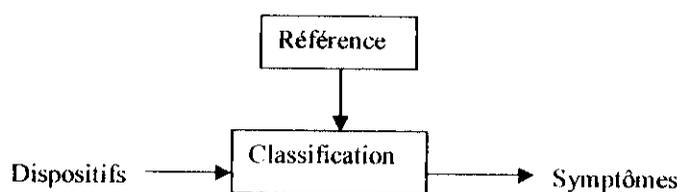


Figure I.4 Principe des méthodes de classification.

Parmi les approches de classification, il est possible de citer : la classification Bayésienne, la classification géométrique, l'approche par logique floue et l'approche à base de réseaux de neurones [HUU01], [ZWI96], [TIN01].

I.4.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

L'intégration des connaissances symboliques et quantitatives, en utilisant un système neuro-flou, constitue un nouvel axe de recherche dans le domaine de la détection et de la

localisation des défauts. De tels systèmes combinent entre l'habilité des réseaux de neurones et la représentation explicite de la logique floue, ce qui constitue un avantage considérable pour la résolution du problème FDI, en particulier, pour les systèmes non linéaires [HUO01].

I.5 MODELISATION DU SYSTEME EN VUE DU DIAGNOSTIC

Modéliser le système en vue du diagnostic diffère de la modélisation de ce dernier pour des objectifs de commande. En effet, il est primordial de mettre en évidence les effets des défauts et des perturbations pour le diagnostic par les méthodes à base de modèle mathématique. Ceci se justifie par la nécessité de différencier entre les défauts et surtout d'assurer l'insensibilité des résidus (dans la mesure du possible) vis-à-vis des perturbations. [OUC00]. Nous allons présenter les différents types de défauts rencontrés dans les systèmes de commande, la manière de les modéliser ainsi que leur comportement.

I.5.1 Types de défauts

Si l'on considère un procédé de régulation, il est possible de classer les défauts en trois catégories :

- **Défaut actionneur** : agit au niveau de la partie opérative et détériore ainsi le signal d'entrée du système, par exemple une perte de puissance d'un moteur ou une fuite dans un vérin.
- **Défaut système ou composant** : s'identifie par la modification des caractéristiques du système proprement dit. Le vieillissement des matériaux en est un exemple.
- **Défaut capteur** : c'est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système, par exemple un mauvais étalonnage ou un vieillissement de l'organe récepteur d'un capteur.

La figure (I.5) illustre ces différents types de défauts :

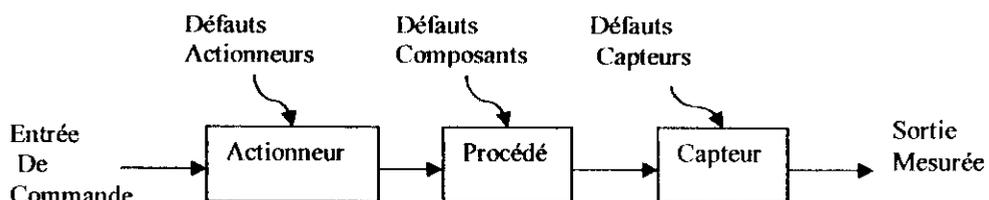


Figure I.5 : Types de défauts.

1.5.2 Modélisation des défauts

Supposons que l'on dispose d'un modèle linéaire d'un procédé sous la forme d'une représentation d'état, telle que :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

Où $x(t)$ représente le vecteur d'état, $u(t)$ le vecteur de commande et $y(t)$ le vecteur de sortie du système, tels que : $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ et $y \in \mathbb{R}^p$. A , B , C et D sont des matrices de dimensions respectives $n \times n$, $n \times m$, $p \times n$ et $p \times m$. Alors :

- Les défauts actionneurs sont modélisés comme des signaux additifs aux signaux d'entrée.
- Les défauts composants sont modélisés comme une dynamique additionnelle avec une matrice de distribution.
- Les défauts capteurs sont modélisés par des signaux additifs aux signaux de sortie.

Si l'on suppose que les trois types de défauts agissent sur le système, la modélisation mettant en évidence ces derniers peut être donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

Où $f_a(t)$, $f_p(t)$ et $f_c(t)$ représentent respectivement les défauts d'actionneurs, les défauts composants et les défauts des capteurs, tels que : $f_a(t) \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $f_p(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ et $f_c(t) \in \mathbb{R}^{p \times 1}$. La matrice H est dite matrice de distribution de $f_p(t)$.

1.5.3 Modélisation des perturbations

En plus des défauts, le système peut être soumis à d'autres signaux dits entrées inconnues (perturbations et bruits), ainsi qu'à des incertitudes de modélisation. Si l'influence de ces signaux sur le système est connue, alors il est possible de réécrire les équations précédentes sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t)) + Ed_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) + d_c(t) \end{cases} \quad (1.3)$$

Où $d_a(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ et $d_c(t) \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ représentent respectivement les perturbations et les bruits agissant sur le système. La matrice E est dite matrice de distribution de $d_a(t)$.

L'origine des perturbations est souvent due à une modélisation imparfaite du système, engendrant une action non connue sur ce dernier. Les perturbations font l'objet de caractéristiques particulières. Lorsque ces dernières sont d'ordre statistique, le système est dit bruité. Cet axe de recherche (stochastique) est particulier et a fait l'objet de peu d'études [JAM03]. L'étude en cours prend en compte le cas des perturbations déterministes.

Pour des raisons de simplicité, il est possible de mettre le système (I.3) sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_d d(t) + F_f f(t) \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Où $E_f = \begin{bmatrix} B & H & 0_{n \times p} \end{bmatrix}$, $E_d = \begin{bmatrix} E & 0_{n \times p} \end{bmatrix}$, $F_f = \begin{bmatrix} 0_{p \times m} & 0_{p \times c} & I_{p \times p} \end{bmatrix}$, $F_d = \begin{bmatrix} 0_{p \times d} & I_{p \times p} \end{bmatrix}$, $d(t) = \begin{bmatrix} d_a & d_c \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^q$ et $f(t) = \begin{bmatrix} f_a & f_c & f_p \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^s$. Les matrices $I_{p \times p}$ et $0_{n \times p}$ sont respectivement la matrice identité de dimension $p \times p$ et la matrice nulle de dimension $n \times p$.

Généralement, dans les problèmes de détection et de localisation des défauts à base d'observateurs, c'est cette dernière modélisation qui est prise en compte. Cependant, il faut signaler que selon le contexte, les objectifs du diagnostic, les techniques utilisées et bien d'autres critères, ce modèle peut différer de façon à s'adapter aux exigences. Par exemple, pour résoudre le problème de détection et de localisation des défauts, il est possible de décomposer le vecteur défaut en des défauts que l'on désire détecter et qui constitueront alors le vecteur $f(t)$ et les défauts que l'on ne veut pas détecter et que l'on regroupera dans le vecteur $d(t)$.

Pour être exploitable, au vu des objectifs de diagnostic fixés, le modèle doit traduire au mieux le comportement du système. Cependant, la précision d'un modèle est généralement obtenue au détriment de sa simplicité. Le choix entre :

- Les modèles linéaires pour lesquels de nombreuses méthodes de traitement sont connues mais possédant une plage de fonctionnement limitée.
- Les modèles non linéaires d'utilisation complexe mais possédant un domaine de validité étendu.

est difficile à effectuer.

1.5.4 Comportement des défauts

Selon leur comportement, il est possible de distinguer trois types de défauts, à savoir:

- **Le biais** correspond à un saut brutal du signal défaut. C'est généralement le cas des capteurs dont un composant élémentaire est défaillant. Ce défaut affecte le système d'une manière permanente et peut occasionner de graves dégâts.

- **La dérive** se manifeste par une croissance lente et continue du signal défaut et donc un éloignement progressif de sa valeur nominale. Ces défauts permanents sont plus difficiles à détecter à leur origine à cause de leur faible amplitude et de leur évolution lente. C'est le cas de l'effet d'usure et de vieillissement des composants par exemple.
- **Les valeurs aberrantes** se manifestent par un écart important par rapport à la valeur nominale du signal. Elles affectent le système de manière instantanée. Généralement, leur cause est due à des parasites, par exemple à des perturbations électromagnétiques.

En conclusion, l'identification de la nature du défaut ainsi que son type et comportement constitue une étape importante lors de la conception des systèmes de diagnostic.

I.6 CRITERES DE PERFORMANCE D'UN SYSTEME DE DIAGNOSTIC

La conception d'un système de diagnostic nécessite la prise en compte d'un certain nombre de critères, qui permettront d'en évaluer les performances. Les principaux critères à prendre en considération sont [LOO01], [OUC04]:

- **La détectabilité** se traduit par l'aptitude du système de diagnostic à déceler la présence d'un défaut. Ce critère est fortement lié au résidu qui doit être généré de manière à détecter l'apparition du défaut le plus rapidement possible.

- **L'isolabilité** consiste en l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir retrouver quel organe a été affecté par le défaut. Cette notion est liée à la structure du résidu qui doit permettre la discrimination entre les différents défauts afin de retrouver leur origine.

- **La 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.

- **La robustesse** qui s'explique par le fait que le système de diagnostic doit être non seulement sensible aux défauts que l'on désire détecter mais aussi insensible aux entrées inconnues (perturbations) et aux entrées de commande. Ceci se traduit par la génération de résidus dits robustes, c'est-à-dire, sensibles aux défauts tout en rejetant les perturbations et les signaux de commande. Le problème de robustesse fera l'objet du paragraphe (I.8).

Il existe cependant, d'autres critères qu'il est nécessaire de prendre en compte en pratique, tels que : la rapidité de détection, le coût et les contraintes ergonomiques et économiques.

I.7 PRINCIPE DE GENERATION ET D' EVALUATION DU VECTEUR RESIDU POUR LA DETECTION ET LA LOCALISATION DES DEFAUTS

Le Problème FDI, par les méthodes à base de modèle mathématique, revient à un problème de génération et d'évaluation des résidus qui peut s'avérer très délicat car il dépend de la structure des systèmes ainsi que des défauts à détecter.

Le résidu doit contenir une information sur l'instant d'apparition du défaut mais aussi sur sa provenance. Le cas idéal, où le résidu est parfaitement nul en absence de défauts et non nul en leur présence, existe rarement car les systèmes physiques sont soumis à des entrées inconnues qui engendrent des fausses alarmes. C'est pour cette raison, qu'en général, des seuils de détection sont introduits. Si l'on note $J(r(t))$ la fonction de décision et $T(t)$ le seuil de détection alors la détection de l'apparition du défaut s'effectue selon :

$$\begin{cases} J(r(t)) \leq T(t) & \text{pour } f(t) = 0 \\ J(r(t)) > T(t) & \text{pour } f(t) \neq 0 \end{cases} \quad (I.5)$$

I.7.1 Méthodologie générale de génération du vecteur résidu

Une structure typique d'un générateur de résidus est représentée sur la figure suivante :

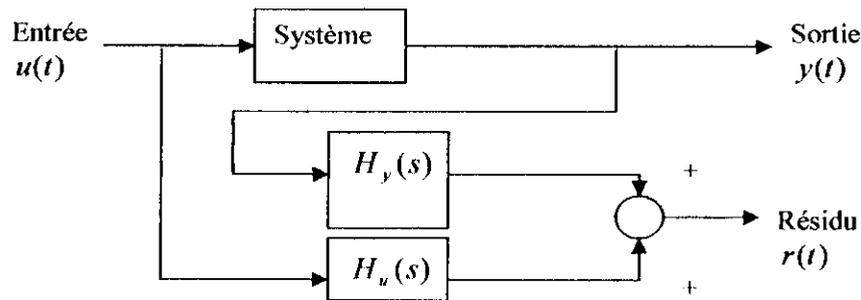


Figure I.6 : Exemple d'un générateur de résidus.

Ainsi, pour un système physique, soumis à une commande $u(t)$ et à des défauts $f(t)$, la sortie peut être écrite en utilisant la transformée de LAPLACE:

$$Y(s) = G_u(s)U(s) + G_f(s)f(s) \quad (I.6)$$

Où $G_u(s)$ et $G_f(s)$ représentent respectivement les transferts sortie/commande et sortie/défaut. Le résidu est défini comme étant égal à :

$$R(s) = H_u(s)U(s) + H_y(s)Y(s) \quad (1.7)$$

D'où :

$$R(s) = (H_u(s) + H_y(s)G_u(s))U(s) + H_y(s)G_f(s)f(s) \quad (1.8)$$

Comme le résidu doit être nul en absence de défauts, il faut que la condition suivante soit vérifiée :

$$H_u(s) + H_y(s)G_u(s) = 0 \quad (1.9)$$

Par conséquent le problème de génération de résidus revient à la détermination des matrices $H_u(s)$ et $H_y(s)$, telles que la condition (1.9) soit vérifiée.

1.7.2 Techniques d'évaluation de résidus

Une fois le résidu généré, une évaluation de ce dernier est effectuée afin de distinguer un défaut particulier des autres : c'est l'étape de prise de décision. Il en existe deux approches: il s'agit de générer des résidus directionnels ou des résidus structurés.

a. Résidus directionnels

La génération de résidus directionnels consiste à concevoir, pour chaque défaut, des résidus de sorte que leur vecteur reste confiné dans une direction spécifique de l'espace des résidus. En absence de défauts, le module du vecteur résidu est nul. Le problème d'isolation, dans ce cas, consiste à déterminer le défaut dont la direction du vecteur de résidus généré est la plus proche parmi tous les autres défauts. La figure suivante illustre ceci.

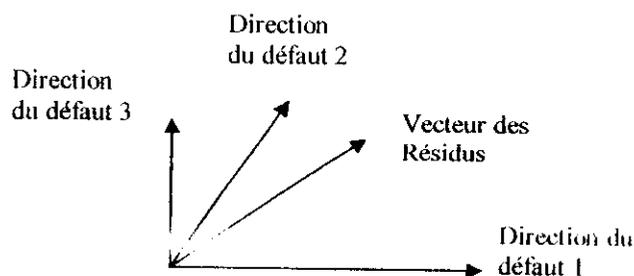


Figure 1.7: Structure de résidus directionnels.

b. Résidus structurés

Les résidus structurés sont conçus de manière à être sensibles à des sous ensembles de défauts différents et de façon à ce que pour chaque défaut corresponde un sous ensemble de résidus particulier [HUU01] [LOO01]. Ces sous ensembles permettent de structurer une table de signature appelée matrice d'incidence. La localisation des défauts est alors facilitée. En effet, les valeurs des résidus sont à chaque instant comparées à des seuils. Les tests peuvent être réalisés en parallèle et chaque décision issue de ces tests conduit à une variable booléenne : 0 correspond à la valeur du résidu en dessous du seuil ; et 1 celle où le résidu a dépassé le seuil fixé. On distingue trois types de matrices d'incidence [LOO01] :

- **Matrice d'incidence non-localisante** qui se traduit par le fait qu'une colonne soit nulle ou bien au moins deux colonnes soient identiques.
- **Matrice d'incidence faiblement localisante** est caractérisée par le fait que les colonnes soient non nulles et distinctes deux à deux.
- **Matrice d'incidence fortement localisante** est caractérisée par le fait qu'aucune colonne ne puisse être obtenue à partir d'une autre en remplaçant 1 par 0 ou vis versa.

	f_1	f_2	f_3		f_1	f_2	f_3		f_1	f_2	f_3
r_1	1	1	0	r_1	1	1	1	r_1	1	1	0
r_2	1	1	1	r_2	1	0	1	r_2	1	0	1
r_3	1	1	1	r_3	1	1	0	r_3	0	1	1
	Non-localisante				Faiblement localisante				Fortement localisante		

Figure I.8 : Illustration des propriétés d'une table de signatures.

I.8 PROBLEME DE ROBUSTESSE DANS LES METHODES A BASE DE MODELE MATHEMATIQUE

Etant donné que les systèmes physiques sont toujours affectés par des entrées inconnues, des perturbations, des bruits et des dynamiques négligées, il est très difficile d'élaborer des modèles mathématiques reflétant pour le mieux la dynamique de ces derniers. Ceci constitue une limitation des méthodes à base de modèle mathématique. Les systèmes FDI doivent donc justifier de propriétés de robustesse. Cette dernière se traduit par la capacité à détecter et isoler les défauts en présence des entrées inconnues [HUU01], [LOO01], [OUC04]. Elle

constitue donc une propriété importante et un critère de performance d'un système de diagnostic. Sa négligence peut conduire à des détections erronées ou des fausses alarmes.

La prise en compte des entrées inconnues lors de la synthèse d'un système FDI, peut être effectuée au niveau de la phase de génération des résidus ou au niveau de l'évaluation de ces derniers. De nombreuses études ont été dédiées à la résolution de ce problème [HUU01], [JOI02], [HEN99].

1.8.1 Problème de génération de résidus robustes : le découplage

Le principe d'un générateur de résidus robustes consiste à générer des résidus très sensibles aux défauts mais découplés des perturbations. Le découplage est défini comme étant l'opération qui consiste à rendre le résidu complètement insensible à une entrée préalablement déterminée [JOI02].

Les méthodes FDI à base d'observateurs constituent un moyen efficace pour la génération de résidus robustes. A cet effet, différentes méthodes ont été proposées pour les systèmes linéaires, telles que celles utilisant les observateurs à entrées inconnues [HEN99], [LAL03], [LAL04], celles basées sur l'utilisation de deux décompositions en valeurs singulières [JOI02], les approches par placement de structure propre [OUC04] ou encore l'approche géométrique [DEP00], [MAS86], [JOI02], [LOO01].

En ce qui concerne les systèmes non linéaires, une première approche consiste à linéariser le système autour de son point de fonctionnement et à appliquer les méthodes développées pour les systèmes linéaires. Cependant, la linéarisation n'est pas toujours efficace car il suffit que le système dévie de son point de fonctionnement pour que les résultats ne soient plus valides. Le découplage tenant compte du caractère non linéaire des systèmes fait l'objet de recherches. On en distingue essentiellement deux approches, à savoir, la méthode analytique, résultant des travaux de Garcia et Frank [JOI02] et la méthode géométrique, introduite essentiellement par Isidori et De Persis et utilisée par d'autres chercheurs tels que Hammouri et Al [DEP00], [LOO01], [JOI02].

Il ne faut pas oublier, qu'en parallèle aux méthodes à base de modèle mathématique, les méthodes à base de réseaux de neurones et de logique floue ont fait aussi leur preuve en ce qui concerne la résolution du problème de robustesse pour FDI [HUU01].

Pour aborder le problème de génération de résidus robustes, il est nécessaire de tenir compte des entrées inconnues dans le modèle du système, tel que proposé dans le paragraphe (1.5.3). Pour le modèle du système défini par les équations (1.4), la sortie s'écrit :

$$y(s) = (G_u(s) + \Delta G_u(s))U(s) + G_f(s)f(s) + G_d(s)d(s) \quad (1.10)$$

Tels que :

$$\begin{cases} G_u(s) = C(SI - A)^{-1} B + D \\ G_f(s) = C(SI - A)^{-1} E_f + F_f \\ G_d(s) = C(SI - A)^{-1} E_d + F_d \end{cases} \quad (I.11)$$

$\Delta G_u(s)$ représente des erreurs de modélisation.

Si l'on reprend la structure du générateur de résidus défini par les équations (I.7) et en tenant compte du fait que la condition : $H_u + H_y G_u = 0$ soit satisfaite, le résidu sera égal à :

$$R(s) = H_y(s) \Delta G_u(s) U(s) + H_y(s) G_d(s) d(s) + H_y(s) G_f(s) f(s) \quad (I.12)$$

Afin de détecter et de localiser les défauts indépendamment des entrées inconnues, les résidus doivent être découplés de celles-ci. Ceci se traduit par la condition de découplage suivante :

$$H_y(s) G_d(s) = 0 \quad (I.13)$$

Cependant, un découplage parfait n'est pas toujours réalisable. Il est alors préférable d'effectuer un découplage approximatif, par exemple basé sur la minimisation du critère suivant :

$$J = \frac{\|H_y(j\omega) G_d(j\omega)\|}{\|H_y(j\omega) G_f(j\omega)\|} \quad (I.14)$$

D'autres méthodes de génération de résidus robustes ont été proposées telles que : la méthode H_∞ , les méthodes d'optimisation...etc [HUO01], [JOI02].

I.8.2 Evaluation robuste des résidus

Le problème de robustesse peut être pris en compte dans la procédure d'évaluation des résidus. Ceci peut être effectué en utilisant des seuils de détection variables. Parmi les approches proposées, les méthodes d'adaptation de seuil [HUO01], dont le principe est illustré sur la figure (I.9).

Soit le résidu, donné par l'équation (I.12) et telle que, la condition (I.13) soit vérifiée. En supposant les erreurs de modélisation bornées:

$$\|\Delta G_u(j\omega)\| \leq \delta \quad (I.15)$$

Alors:

$$\|R(j\omega)\| \leq \delta \|H_y(j\omega) U(j\omega)\| \quad (I.16)$$

Ainsi, le seuil adaptatif est défini par :

$$T(s) = \delta H_y(s)U(s) \quad (I.17)$$

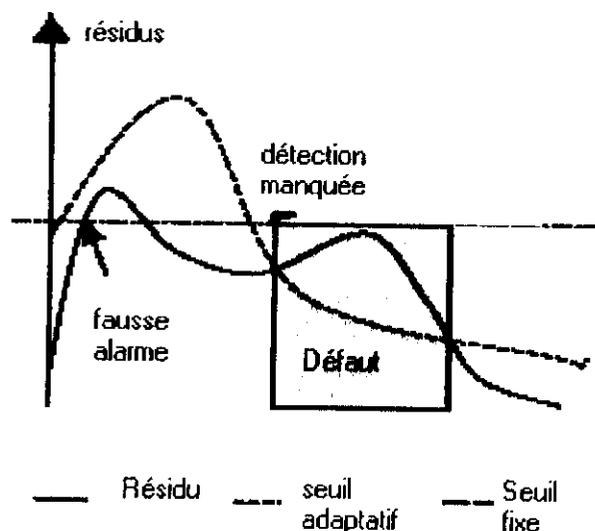


Figure I.9 : Evaluation robuste des résidus par adaptation du seuil de détection.

I.9 CONCLUSION

Ce chapitre a eu pour objectif d'introduire les différents concepts relatifs au diagnostic des défauts et de présenter les différentes méthodes proposées dans ce domaine. Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs classifications, nous avons distingué, essentiellement, entre les méthodes analytiques (estimation d'état, estimation paramétrique, équation de parité) qui sont basées sur l'existence de modèles mathématiques et les méthodes symboliques basées sur les approches de l'intelligence artificielle, de la logique floue, des réseaux de neurones...etc. Ces dernières sont utilisées dans le cas où la modélisation mathématique du système serait complexe ou inexistante.

Notre intérêt a porté sur l'étude des méthodes à base de modèle mathématique. Nous avons présenté la procédure de détection et de localisation des défauts par celles-ci. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur des résidus. Nous avons vu que pour aborder un problème FDI par ces approches, il est nécessaire de modéliser le système de manière à mettre en évidence l'effet des défauts et des perturbations. Nous avons décrit aussi les critères de performance d'un système FDI et en particulier, nous nous sommes intéressés au problème de robustesse, qui se traduit par la nécessité de générer des résidus insensibles à l'effet des entrées inconnues.

II.1 INTRODUCTION

Depuis les travaux de LUENBERGER en 1971, la théorie des observateurs a connu un développement sans précédent, donnant naissance à divers types de reconSTRUCTEURS d'états dotés de propriétés extrêmement intéressantes. La détection et la localisation des défauts à base de modèle en a tout naturellement tiré profit. Des chercheurs ont alors investi dans ce domaine, dont il est possible de citer les travaux de: Al, Clark, Chen, Edwards, Frank, Garcia, Massoumnia, Patton, Spurgeon, Tan et bien d'autres [CLA79], [EDW00], [JOI02], [LOO01], [MAQ00], [MAS86], [TAN02].

L'approche à base d'observateurs se voit donner un intérêt grandissant car ces derniers constituent un moyen efficace pour la résolution de ce que l'on trouve dans la littérature sous le nom FPRG, à savoir le problème fondamental de génération de résidus [DEP00], [JOI02], [LOO01], [MAS86]. Ce dernier énonce les propriétés d'un générateur de résidus permettant la détection et la localisation de tous les défauts indépendamment des entrées inconnues.

Dans le cas des systèmes linéaires, les méthodes FDI à base d'observateurs ont connu un essor considérable [CLA79], [EDW00], [MAQ00], [MAS86], [MEZ00], [LAL04], [OUC04]. Alors que pour les systèmes non linéaires, la conception de générateurs de résidus est particulièrement difficile. Néanmoins des travaux ont été effectués [ADJ94], [DEP00], [HEN99], [JOI02], [LOO01], [OUC04].

Dans le présent chapitre, nous allons introduire la méthodologie générale de détection et d'isolation des défauts à base d'observateurs ainsi que le problème fondamental de génération de résidus. Nous présenterons l'idée de base permettant la génération de résidus robustes à travers l'observateur de Luenberger généralisé, appliqué aux systèmes linéaires [MEZ00], [LAL04], [OUC04]. Nous parlerons ensuite de l'approche géométrique qui semble plus générique bien qu'elle demande un effort particulier de formalisme [MAS86], [DEP00]. Elle constitue, ces dernières années, un centre d'intérêt des chercheurs dans le domaine. Nous considérerons dans ce dernier cas, les systèmes linéaires et les systèmes non linéaires affines en la commande. Nous terminerons le chapitre par un exemple académique illustrant la résolution du FPRG par l'approche géométrique.

II.2 PRINCIPE ET METHODOLOGIE

L'idée principale, des méthodes de génération du vecteur résidu à base d'observateurs, consiste à estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. Le résidu est alors généré en formant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties estimées et les sorties réelles. 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 (II.1).

Cette approche a connu un développement important car elle offre des propriétés très intéressantes. En effet, elle donne lieu à des générateurs de résidus très flexibles. Un observateur apporte des degrés de liberté supplémentaires lors de sa synthèse. Cette souplesse, dans le choix des paramètres, permet de s'affranchir de certaines entrées perturbatrices, améliorant ainsi les caractéristiques des résidus, telles que leur robustesse vis-à-vis de celles-ci et leur sensibilité aux défauts.

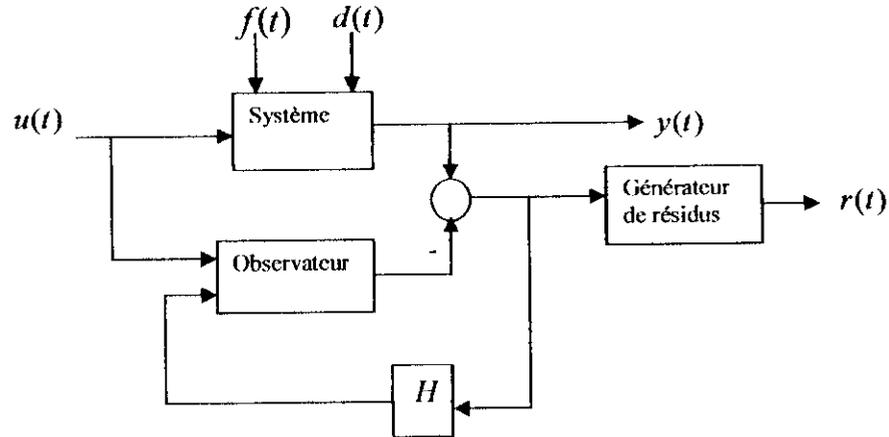


Figure II.1 : Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs.

Tels que $u(t) \in \mathbb{R}^m$ et $y(t) \in \mathbb{R}^p$ dénotent respectivement les vecteurs de commande et de sortie du procédé. $d(t) \in \mathbb{R}^q$ et $f(t) \in \mathbb{R}^s$ représentent respectivement les vecteurs perturbations et défauts. $r(t)$ est le vecteur résidu généré.

II.3 PROBLEME FONDAMENTAL DE GENERATION DES RESIDUS

II.3.1 Positionnement du problème

Le problème de détection et de localisation des défauts, par les méthodes à base d'observateurs, revient à un problème de génération de résidus (FPRG). Ces derniers doivent être dotés de propriétés assurant leur sensibilité aux défauts que l'on veut détecter tout en rejetant les perturbations, d'une part, et de propriétés permettant la distinction entre les différents défauts agissant sur le système, d'autre part. Dans le premier cas, on parle de découplage et dans le second de structuration des résidus.

II.3.2 Découplage

Le problème fondamental de génération de résidus FPRG, dans ce cas, consiste à concevoir un générateur de résidus de manière à satisfaire les conditions suivantes :

- Le résidu est robuste vis-à-vis des entrées inconnues et la commande.
- Le résidu est sensible aux défauts à détecter.
- Le résidu converge asymptotiquement vers zéro en absence de défauts.

Les conditions d'existence d'un tel générateur de résidus sont rappelées par la suite mais il faut préciser qu'elles sont très restrictives. En effet, le découplage « parfait » est difficilement réalisable pour un système réel. Le découplage des résidus de l'effet des perturbations a fait l'objet de plusieurs études aboutissant à diverses techniques qu'il est possible de retrouver dans [DEP00], [HEN99], [JOI02], [LAL03], [LOO01], [MAS86].

II.3.3 Structuration des résidus

Le FPRG, dans ce cas, stipule que les résidus doivent permettre la distinction entre les défauts agissant sur le système. Si l'on dispose d'un seul observateur générant un vecteur résidu, ce dernier doit être non seulement de dimension égale au nombre de défauts mais aussi, il doit posséder la propriété suivante [JOI02]:

$$r(t) = \begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \vdots \\ r_q(t) \end{pmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \text{composante sensible au défaut } f_1 \\ \leftarrow \text{composante sensible au défaut } f_2 \\ \\ \leftarrow \text{composante sensible au défaut } f_q \end{matrix} \quad \text{Avec : } q = \dim(f(t)) \quad (II.1)$$

Cette structure du vecteur résidu est difficile à établir. Il est préférable de considérer un banc d'observateurs. Ainsi les contraintes de construction ne se concentrent plus sur un unique observateur mais se répartissent sur l'ensemble. Il existe trois structures d'observateurs connues à savoir:

II.3.3.1 Structure d'observateur simplifié (SOS)

Dans ce cas, un seul observateur constitue le banc. Il est synthétisé de sorte à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Si un des défauts auquel est sensible l'observateur apparaît alors les estimations sont erronées. Dans le cas contraire, elles sont exactes.

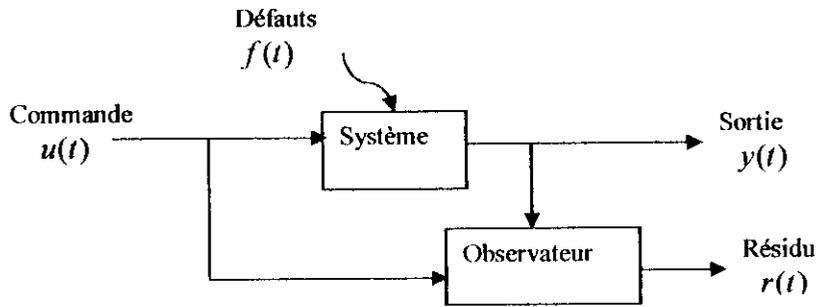


Figure II.2: Structure d'observateur simplifié.

II.3.3.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS)

Cette structure consiste à synthétiser autant d'observateurs que de défauts. Chacun de ces observateurs permet la génération d'un résidu insensible à tous les défauts sauf un. L'occurrence du défaut est indiquée par l'observateur, source d'une mauvaise estimation. Ce dernier n'est sensible qu'à un seul défaut et permet donc sa détection et sa localisation. Cette structure donne de bons résultats mais elle n'est pas toujours possible et ne permet pas de s'affranchir des entrées inconnues et des bruits.

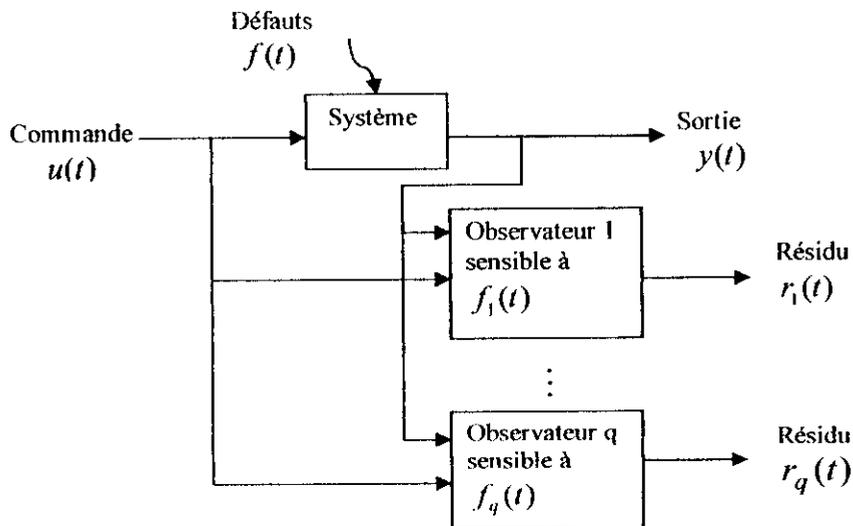


Figure II.3 : Structure d'observateurs dédiés.

II.3.3.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Ce cas consiste à synthétiser q observateurs, chacun d'entre eux étant insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît, l'estimation de l'ensemble du sous espace d'état sensible à ce défaut est erronée si elle ne provient pas de l'observateur insensible à ce seul défaut.

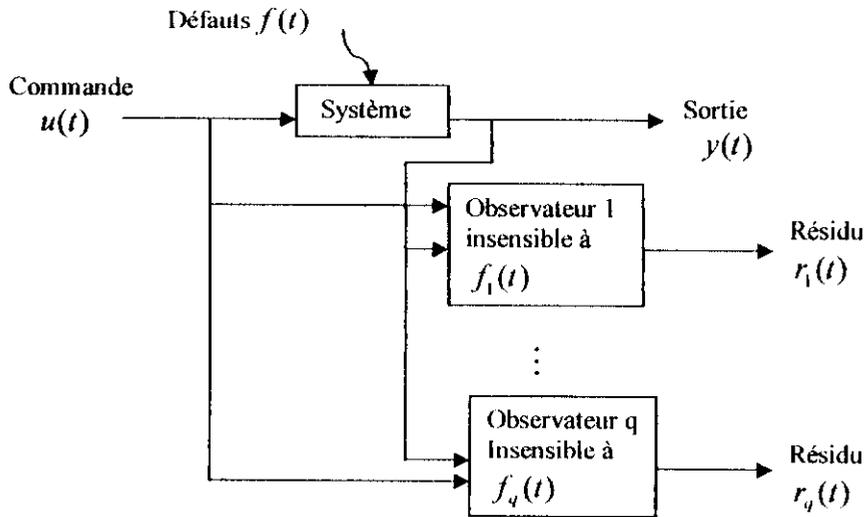


Figure II.4 : Structure d'observateurs généralisés.

II.4 RESOLUTION DU FPRG

II.4.1 Exemple de l'utilisation de l'observateur de LUENBERGER généralisé

L'une des solutions, proposées pour la résolution du problème FPRG, consiste à utiliser des observateurs permettant l'estimation de combinaisons linéaires de l'état, découplées de l'effet des perturbations [HEN99], [LAL04], [MEZ00], [OUC04]. Nous allons donc voir un exemple pour le cas des systèmes linéaires. En ce qui concerne les systèmes non linéaires, ce point sera amplement développé dans le chapitre (III).

Le principe de l'utilisation de l'observateur de LUENBERGER généralisé, pour la détection et la localisation des défauts, consiste à estimer une combinaison linéaire de l'état, à savoir: $Tx(t)$ et à utiliser cette estimation ainsi que les grandeurs disponibles pour la génération du vecteur résidu. Soit le système linéaire défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + F_d d(t) + F_f f(t) \end{cases} \quad (II.2)$$

Où $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ et $y(t) \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement les vecteurs d'état, de commande et de sortie du système. $d(t) \in \mathbb{R}^q$ et $f(t) \in \mathbb{R}^s$ sont respectivement les vecteurs des perturbations et des défauts. $A, B, C, D, E_d, E_f, F_d$ et F_f sont des matrices de dimensions appropriées. La dynamique de l'observateur de LUENBERGER est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}(t) = N\hat{z}(t) + Gy(t) + Mu(t) \\ r(t) = P\hat{z}(t) + Ky(t) + Uu(t) \end{cases} \quad (II.3)$$

Où $\hat{z}(t)$ représente l'estimation de la combinaison linéaire des états. $r(t)$ est le vecteur résidu, déterminé à partir des états estimés, de la commande et de la sortie du système. F, G, M, P, K et U sont des matrices de dimensions appropriées. La dynamique de l'erreur d'estimation et le résidu sont donnés par :

$$\begin{cases} \dot{e} = NT\hat{x} - (TA - GC)x - (TB - M - GD)u - (TE_d - GF_d)d - (TE_f - GF_f)f \\ r = P\hat{z} + KCx + Uu + KDu + KF_d d + KF_f f \end{cases} \quad (II.4)$$

Pour assurer la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation et du résidu, en absence de défauts et indépendamment des perturbations et de l'entrée de commande, il suffit que les matrices de l'observateur vérifient les conditions suivantes [LAL03], [MEZ00], [OUC04]:

$$\begin{cases} N \text{ stable} \\ NT = TA - GC \\ M = TB - GD \\ GF_d - TE_d = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} PT = -KC \\ U = -KD \\ KF_d = 0 \end{cases} \quad (II.5)$$

Si les conditions (II.5) sont vérifiées, alors en présence de défauts, les expressions de la dynamique de l'erreur et du résidu seront données par:

$$\begin{cases} \dot{e} = NT(\hat{x} - x) + (GF_f - TE_f)f \\ r = PT(\hat{x} - x) + KF_f f \end{cases} \quad (II.6)$$

Les degrés de liberté restants vont permettre de fixer la sensibilité des résidus vis-à-vis des défauts.

Nous constatons que l'observateur de LUENBERGER généralisé répond bien aux exigences d'un problème de détection et de localisation des défauts car il permet la génération de résidus robustes, découplés des perturbations et sensibles aux défauts simultanément. Ces propriétés sont explicitées à travers l'analyse fréquentielle du vecteur résidu. En effet, en exprimant ce dernier dans le domaine fréquentiel, nous avons:

$$R(s) = G_{rd}(s)D(s) + G_{rf}(s)F(s) \quad (II.7)$$

G_{rd} et G_{rf} représentent respectivement les transferts résidus/perturbations et résidus/Défauts, tels que :

$$\begin{cases} G_{rd}(s) = P(SI - N)^{-1} [GF_d - TE_d] + KF_d \\ \text{et} \\ G_{rf} = P(SI - N)^{-1} [GF_f - TE_f] + KF_f \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Du fait des conditions d'existence restrictives d'un découplage parfait, des méthodes de découplage approximatif, visant, non pas à annuler mais à minimiser l'influence des perturbations par rapport à l'influence des défauts sur les résidus, ont fait l'objet de plusieurs études [OUC04]. Parmi ces approches la minimisation du critère :

$$J = \frac{\|P(SI - N)^{-1} [GF_d - TE_d] + KF_d\|_{\infty}}{\|P(SI - N)^{-1} [GF_f - TE_f] + KF_f\|_{\infty}} \quad (\text{II.9})$$

II.4.2 Approche géométrique Pour la résolution du FPRG

II.4.2.1 Introduction

Parmi les différentes approches, proposées pour la détection et la localisation des défauts dans les systèmes physiques, l'approche géométrique s'est vue donner un intérêt grandissant. En effet, cette dernière offre des avantages considérables par rapport à l'approche analytique car elle répond à différents problèmes, dont la détection et la localisation des défauts pour les systèmes non linéaires.

L'approche géométrique permet donc la résolution du problème FPRG. Elle a été introduite initialement pour les systèmes linéaires par Massoumnia [MAS86]. Des études ont été ensuite effectuées pour des classes particulières de systèmes non linéaires, dont il est possible de citer les travaux de Depersis et Isidori [DEP00], [JOI02], [LOO01] qui ont établi une condition nécessaire de génération de résidus pour les systèmes bilinéaires en utilisant la géométrie différentielle, plus particulièrement, les distributions d'inobservabilité.

Dans ce paragraphe, il sera question de présenter d'une manière générale cette approche et de mettre en revue les conditions d'existence de solutions ainsi que les solutions au problème FPRG, pour les systèmes linéaires et les systèmes bilinéaires [DEP00], [JOI02], [LOO01], [MAS86]. Il faut préciser que le problème FPRG, tel qu'il a été abordé dans ce paragraphe, concerne le problème de découplage des résidus vis-à-vis des entrées inconnues.

II.4.2.2 Cas des systèmes linéaires

La résolution du problème FPRG, en utilisant les approches géométriques, est étroitement liée à la notion de « sous espace d'inobservabilité » lors de la présence d'entrées inconnues

déterministes agissant sur le système. L'approche présentée, dans ce qui suit, est celle proposée par Massoumnia [LOO01], [MAS86].

Soit le système linéaire, invariant, défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + E_d d + E_f f \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $y \in \mathbb{R}^p$, $d \in \mathbb{R}^q$ et $f \in \mathbb{R}^s$ sont respectivement les vecteurs d'état, de commande, de sortie, de perturbation et de défaut. A, B, C, E_d et E_f sont des matrices de dimensions appropriées.

Soit le générateur de résidus défini par :

$$\begin{cases} \dot{\xi} = F\xi + Ku + Ey \\ r = J\xi + Hy \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Où $\xi \in \mathbb{R}^{\bar{n}}$ et $r \in \mathbb{R}^{\bar{p}}$ représentent respectivement la dynamique du générateur de résidus et le vecteur résidu. F, K, E, J et H sont des matrices de dimensions appropriées. Le système augmenté est alors donné par les équations (II.12).

$$\begin{cases} \dot{x}^e = A^e x^e + B^e u^e + E_f^e f \\ r = C^e x^e \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Tels que :

$$x^e = \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix}, u^e = \begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix}, A^e = \begin{bmatrix} A & 0 \\ EC & F \end{bmatrix}, B^e = \begin{bmatrix} B & E_d \\ K & 0 \end{bmatrix}, E_f^e = \begin{bmatrix} E_f \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } C^e = [HC \ J].$$

Définition II.1

En considérant le système (II.10), le problème FPRG consiste à synthétiser un générateur de résidus (II.11), dont les matrices inconnues sont déterminées de manière à satisfaire les conditions suivantes :

1. Le vecteur résidu r n'est pas affecté par le vecteur u^e . Ceci se traduit par le fait que le transfert entre r et u^e , donné par la matrice $C^e (SI_{n+\bar{n}} - A^e)^{-1} B^e$ soit identiquement nul. Autrement dit, le résidu doit être découplé des entrées inconnues et de la commande.

2. Le transfert entre le vecteur résidu r et les défauts f , donné par la matrice $C^e(SI_{n+n} - A^e)^{-1}E_f^e$ doit être non nul. Autrement dit, il faut que le résidu soit sensible aux défauts.
3. Les pôles de la matrice $C^e(SI_{n+n} - A^e)^{-1}$ doivent être asymptotiquement stables. C'est-à-dire: le sous système observable du système augmenté doit être stable.

Il a été montré que l'existence d'une solution au problème FPRG pour le système (II.10), dépend d'une simple relation entre le sous espace $L = span\{E_f\}$ contenant l'effet des défauts et le sous espace d'inobservabilité minimal contenant l'effet des perturbations: $P = span\{E_d\}$. Les définitions relatives aux notions d'observabilité peuvent être retrouvées en annexe (B). La notion de sous espace d'inobservabilité dispose de propriétés intéressantes, à partir desquelles, il est possible de déduire que cet espace a un unique élément minimal [LOO01]. Un algorithme permettant la détermination de ce sous espace a été proposé. Il est résumé dans ce qui suit :

1. Considérons la suite de sous espaces de R^n , donnée par :

$$\begin{aligned} S_0 &= span\{E_d\} \\ S_{i+1} &= span\{E_d\} + A(S_i \cap Ker\{C\}) \end{aligned} \tag{II.13}$$

Avec : $i = 0, \dots, n-1$ et $S_n^* = S_{n-1}$

2. Considérons la suite de sous espaces de l'espace dual de R^n , telle que

$$\begin{aligned} Q_0 &= (S_0^*)^\perp \cap span\{C\} \\ Q_{i+1} &= (S_{i+1}^*)^\perp \cap (Q_i A + span\{C\}) \end{aligned} \tag{II.14}$$

Avec : $i = 0, \dots, n-1$ et $Q_n^* = Q_{n-1}$

Alors, le sous espace d'inobservabilité minimal, invariant, contenant P est égal à $(Q_n^*)^\perp$. Ce sous espace joue un rôle crucial dans la résolution du problème FPRG [MAS86].

Théorème II.1

Considérons le système (II.10), alors il existe une solution au problème FPRG si et seulement si $L \cap (Q_n^*)^\perp = \{0\}$.

Si cette condition est satisfaite, il est possible de déterminer une transformation de l'état de sorte à décomposer l'espace d'état en deux sous espaces, dont l'un est découplé de l'effet

des perturbations. Il a été montré que cette décomposition est fortement liée au sous espace $(Q_p^*)^\perp$ [JOI02], [LOO01].

II.4.2.3 Cas des systèmes non linéaires affines en la commande

Soit le système défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i + E_f f + \sum_{i=1}^q E_{d_i} d_i \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Où $x \in X \subset \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u_i, i=1, \dots, m$ représentent les commandes, $y \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur de sortie, $d = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_q]^T \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur d'entrées inconnues et f est un défaut scalaire. $A(x), h(x), g_i(x) (i=1, \dots, m), E_{d_i}(x) (i=1, \dots, q)$ et $E_f(x)$ sont des champs de vecteurs de dimension appropriée.

Soit le générateur de résidus défini par:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \bar{A}(\xi, y) + \sum_{i=1}^m \bar{g}_i(\xi, y)u_i \\ r = \bar{h}(\xi, y) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Où $\xi \in \mathbb{R}^{\bar{q}}$ et $r \in \mathbb{R}^{\bar{p}}$ représentent respectivement la dynamique du générateur de résidus et le vecteur résidu.

Le problème local de génération de résidus pour les systèmes non linéaires I-NLFPRG consiste à concevoir un générateur de résidus, donné par le système d'équations (II.16), de manière à satisfaire les conditions de résolution du FPRG, explicitées dans le paragraphe (II.3.2) [DEP00], [JOI02], [LOO01].

L'idée de la résolution du I-NLFPRG consiste à déterminer une distribution d'inobservabilité et une transformation appropriée de coordonnées de sorte à synthétiser des résidus répondant aux exigences explicitées précédemment. Dans ce qui suit, nous allons présenter brièvement cette solution. Pour plus de détails, se référer à [DEP00], [LOO01].

❖ Etape 1

Pour vérifier s'il existe une solution à un problème I-NLFPRG, il suffit de calculer la distribution involutive et invariante Q qui contient l'effet des différentes entrées inconnues et

des défauts que l'on ne veut pas détecter. Si cette distribution ne contient pas l'effet des défauts à détecter, une solution géométrique peut exister. Il a été proposé dans [DEP00] un algorithme, qui constitue une version non linéaire de celui proposé pour les systèmes linéaires, permettant le calcul de la distribution Q :

1. Soit le sous espace contenant l'effet des perturbations :

$$P = span\{E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dq}\} \quad (II.17)$$

Où E_{di} représentent les vecteurs colonnes de la distribution vectorielle $E_d(x)$

2. Soit la suite de distributions :

$$\begin{cases} S_0 = \bar{P} \\ S_{k+1} = \bar{S}_k + \sum_{i=0}^m [g_i, \bar{S}_k \cap Ker\{dh\}] \end{cases} \quad (II.18)$$

$\bar{\Delta}$ représente la plus petite distribution involutive contenant la distribution Δ (Pour $\Delta = cst$, $\bar{\Delta} = \Delta$), g_0, g_1, \dots, g_m représentent les vecteurs colonnes de $g(x)$ et $f(x)$, tel que $f(x) = g_0(x)$, dh est la matrice Jacobienne de $h(x)$ et le symbole $[,]$ désigne le crochet de Lie. Une condition d'arrêt de la séquence précédente est :

$$\bar{S}_i = S_{i+1} \Rightarrow S_i^* = \bar{S}_i^* \quad (II.19)$$

On définit k^* comme étant le nombre limite pour lequel $S_{k^*+1} = \bar{S}_{k^*}$, alors $\bar{S}_{k^*} = \sum_{\cdot}^p$ est minimale, involutive, invariante et contient l'effet des perturbations. Si \sum_{\cdot}^p est bien définie et non singulière alors $(\sum_{\cdot}^p)^1$ est générée par des différentielles exactes (Théorème de Frobenius, Annexe (A.)). La codistribution $(\sum_{\cdot}^p)^1$ est maximale (dans le sens de l'inclusion des codistributions). Pour plus de détails sur les notions de géométrie différentielles, se référer à l'annexe (A.).

A titre indicatif, pour des raisons de commodité, il est plus intéressant d'utiliser les co-distributions (espace dual des distributions). A cet effet, la séquence non décroissante de co-distributions suivante est développée :

Soit θ une codistribution fixe, alors l'algorithme des codistributions d'observabilité (o.c.a) est défini par la suite des codistributions, suivante :

$$\begin{cases} Q_0 = \theta \cap \text{span}\{dh\} \\ Q_{k+1} = \theta \cap \left(\sum_{i=0}^m L_{g_i} Q_k + \text{span}\{dh\} \right) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Où $\text{span}\{dh\}$ est une codistribution générée par les différentielles des lignes de $h(x)$. On suppose que toutes les codistributions de la séquence précédente sont non singulières de manière à trouver : $k^* < n-1$ tel que $Q_k = Q_{k^*}$ pour $k > k^*$. On pose $\Omega^* = \Omega_{k^*}$ et on note $\Omega^* = \text{o.c.a}\{\theta\}$.

- Une codistribution Ω est observable si $\begin{cases} L_{g_i} \Omega \subset \Omega + \text{span}\{dh\} \quad \forall i = 0, \dots, m \\ \text{o.c.a}(\Omega) = \Omega \end{cases}$
- Une distribution Δ est dite inobservable si Δ^\perp est une codistribution observable.

Si $\text{o.c.a}\left(\left(\sum_{\cdot}^P\right)^\perp\right)$ est une codistribution d'observabilité maximale, localement générée par des différentielles exactes contenant P^\perp . La distribution d'inobservabilité Q correspondant peut être obtenue à l'aide de: $Q = \left(\text{o.c.a}\left(\left(\sum_{\cdot}^P\right)^\perp\right)\right)^\perp$. Par conséquent, Q est la plus petite distribution d'inobservabilité, involutive, invariante et contenant P . C'est la distribution la plus appropriée vérifiant les conditions du I-NLFPRG [DEP00].

Ainsi, il est possible de trouver un changement d'état $\tilde{x} = \Phi(x)$, tel que, dans le nouveau repère, le système s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{A}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_2) + \tilde{g}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_2)u + \tilde{E}_{f_1}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)f_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{A}_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) + \tilde{g}_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)u + \tilde{E}_{d_2}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)d + \tilde{E}_{f_2}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)f_2 \\ \tilde{y}_1 = \tilde{h}_1(\tilde{x}_1) \\ \tilde{y}_2 = \tilde{h}_2(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Où $\tilde{x}_1 \in R^v$, $v = \text{co dim}(Q)$, $\tilde{E}_{f_1}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) \neq 0$ localement autour de $\Phi(0)$.

Il faut noter que le difféomorphisme $\Phi(x)$ dépend de la distribution $(S_\cdot^P)^\perp$. En effet, il a été montré qu'un choix judicieux de $\Phi(x)$ consiste à poser:

$$\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = \left(\begin{array}{c} \frac{\partial \varphi(x)}{\partial x} \\ ((S_\cdot^P)^\perp)^T \end{array} \right) \quad (\text{II.22})$$

$\frac{\partial \varphi(x)}{\partial x}$ est choisie de manière à ce que $\Phi(x)$ soit un difféomorphisme (annexe (A.)). Par conséquent, le sous espace insensible aux entrées inconnues est défini par: $(S_\cdot^P)^\perp$. Néanmoins, ce choix n'est pas unique.

❖ **Etape 2**

Elle consiste à synthétiser un observateur pour le sous système (II.23), résultant de la transformation précédente. Cet observateur jouera le rôle du générateur de résidus. Des études ont été dédiées à ce problème [JOI02], [LOO01].

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{A}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_2) + \tilde{g}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_2)u \\ \tilde{y}_1 = \tilde{h}_1(\tilde{x}_1) \end{cases} \quad (II.23)$$

II.4.2.4 Exemple académique

Soit le système linéaire d'ordre 4, défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + d + f \\ \dot{x}_2 = x_1 - x_2 \\ \dot{x}_3 = x_2 - x_3 + x_4 \\ \dot{x}_4 = -x_3 + f \\ y_1 = x_3 \\ y_2 = x_4 \end{cases} \quad (II.24)$$

Les différentes matrices caractérisant le système sont donc données par :

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, E_d = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, E_f = [1 \ 0 \ 0 \ 1]^T \text{ et } C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

• En se référant à l'approche explicitée dans le paragraphe (II.4.2), nous nous proposons d'étudier le système en question. La première étape consiste à calculer le sous espace d'inobservabilité, minimal, invariant et contenant l'effet des perturbations.

Ainsi, nous avons :

$$\triangleright P = \text{span}\{E_d\} = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T\} \quad (II.26)$$

• En se basant sur l'algorithme (II.13) nous avons :

$$S_0 = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T\} \quad (II.27)$$

$$S_1 = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T\} + A(S_0 \cap \text{Ker}\{C\}) \quad (II.28)$$

Or :

$$\text{Ker}\{C\} = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, (0 \ 1 \ 0 \ 0)^T\} \quad (\text{II.29})$$

D'où :

$$S_1 = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, (-1 \ 1 \ 0 \ 0)^T\} \quad (\text{II.30})$$

De même, nous calculons S_2 et S_3 :

$$S_2 = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, (-1 \ 1 \ 0 \ 0)^T, (1 \ -2 \ 1 \ 0)^T\} \quad (\text{II.31})$$

$$S_3 = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, (-1 \ 1 \ 0 \ 0)^T, (1 \ -2 \ 1 \ 0)^T\} \quad (\text{II.32})$$

Par conséquent :

$$S_*^p = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, (-1 \ 1 \ 0 \ 0)^T, (1 \ -2 \ 1 \ 0)^T\} \quad (\text{II.33})$$

L'espace dual est donc donné par:

$$(S_*^p)^\perp = \text{span}\{(0 \ 0 \ 0 \ 1)^T\} \quad (\text{II.34})$$

➤ Soit maintenant la suite de sous espaces de l'espace dual de \mathbb{R}^4 :

$$Q_0 = (S_*^p)^\perp \cap \text{span}\{C\} = \text{span}\{(0 \ 0 \ 0 \ 1)^T\} \quad (\text{II.35})$$

D'où :

$$Q_p^* = \text{span}\{(0 \ 0 \ 0 \ 1)^T\} \quad (\text{II.36})$$

Ainsi, le sous espace d'inobservabilité, minimal, invariant et contenant P est donné par:

$$(Q_p^*)^\perp = S_*^p \quad (\text{II.37})$$

• Vérifions maintenant la condition d'existence d'une solution à ce FPRG, qui est donnée par le théorème (II.1), à savoir : $L \cap (Q_p^*)^\perp = \{0\}$ où :

$$L = \text{span}\{E_f\} = \text{span}\{(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T\} \quad (\text{II.38})$$

Nous constatons qu'effectivement, le problème en question a une solution, autrement dit, il existe une transformation de l'état $\Phi(x)$ permettant de découpler une partie de l'espace d'état de l'effet des perturbations. Cette transformation peut être définie par :

$$\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \\ \left((S_*^p)^\perp\right)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \\ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Tel que $\Phi(x)$ constitue un difféomorphisme. Par conséquent :

$$\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ D'où : } \Phi(x) = \begin{pmatrix} x_1 \\ -x_1 + x_2 \\ x_1 - 2x_2 + x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \quad (\text{II.40})$$

En posant $z = \Phi(x)$, nous avons:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -z_1 + d + f \\ \dot{z}_2 = z_1 - z_2 - d - f \\ \dot{z}_3 = -z_1 + z_2 - z_3 + z_4 + d + f \\ \dot{z}_4 = -z_1 - z_3 - 2z_2 + f \\ y_{z1} = z_1 + 2z_2 + z_3 \\ y_{z2} = z_4 \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Ainsi, seul l'état z_4 constitue le sous espace insensible à la perturbation. Ce dernier étant de dimension 1, égale à la dimension de $(S_c^p)^\perp$.

II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la détection et la localisation des défauts par les méthodes à base d'observateurs. Nous avons présenté le principe de ces dernières qui se résume en un problème de génération de résidus, connu sous le nom FPRG. Nous avons vu qu'il existe plusieurs approches pour la résolution de ce problème. Nous avons alors présenté un exemple sur l'utilisation des observateurs de LUENBERGER généralisés pour la génération de résidus sensibles aux défauts et découplés des entrées inconnues dans le cas des systèmes linéaires. Nous avons ensuite introduit une approche récente: il s'agit de l'approche géométrique. Cette dernière est dotée de propriétés particulièrement intéressantes pour la résolution du FPRG, notamment pour les systèmes non linéaires. Les solutions proposées par certains chercheurs dans le domaine ont été ainsi présentées pour les systèmes linéaires et bilinéaires. Nous avons terminé par un exemple académique illustrant l'application de l'approche géométrique pour la résolution du FPRG.

III.1 INTRODUCTION

En pratique, les systèmes physiques sont non linéaires, ainsi le problème de détection et de localisation des défauts par les méthodes à base d'observateurs est relativement complexe. Deux approches peuvent être distinguées. La première consiste à appliquer les méthodes développées pour le cas linéaire après linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement [EDW00], [LAL03], [TAN02]. Cependant, ceci peut engendrer de fausses alarmes et des détections erronées dues aux erreurs de linéarisation. La deuxième approche consiste à utiliser des observateurs non linéaires [ADJ94], [DEP00], [HEN99], [JOI02], [ILOO01], [OUC04]. Néanmoins, ceci nécessite une connaissance exacte des paramètres et de la structure du modèle. Ainsi, de par la diversité du caractère non linéaire des processus, il n'est pas évident de déterminer un générateur de résidus général applicable pour tout système. Actuellement, il est possible de surmonter ces contraintes à l'aide d'observateurs robustes, tels que les observateurs par modes glissants [ALS99], [EDW00], [FLO04], [TAN02].

Dans ce chapitre, il sera question, dans un premier temps, de présenter quelques observateurs dédiés au diagnostic des défauts des systèmes non linéaires. Un intérêt particulier sera consacré aux observateurs par modes glissants. Ces derniers sont dotés de propriétés de robustesse particulièrement intéressantes pour la résolution du problème FPRG. D'autre part, nous proposerons une méthode de génération de résidus robustes: il s'agit d'un observateur de défauts, associé à un observateur d'état par modes glissants.

III.2 OBSERVATEURS DEDIES AU DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES SYSTEMES NON LINEAIRES

III.2.1 Observateurs non linéaires

➤ Structure de l'observateur

Soit le système non linéaire défini par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Tels que $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ et $y \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement les vecteurs d'état, de commande et de sortie du système. Soit l'observateur non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + g(y) - g(\hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Où g est une fonction analytique définie de $R^p \rightarrow R^n$. Elle est déterminée de manière à assurer la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation des états $e = x - \hat{x}$. La dynamique de cette erreur est donnée par :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = f(x, u) - f(\hat{x}, u) - g(y) + g(\hat{y}) \quad (III.3)$$

En supposant que l'état estimé tende asymptotiquement vers l'état réel, il est possible d'écrire un développement de Taylor du premier ordre des fonctions $f(x, u)$ et $g(y)$:

$$f(x, u) = f(\hat{x} + e, u) = f(\hat{x}, u) + D_{\hat{x}}(f)e, \text{ tel que : } D_{\hat{x}}(f) = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x^T} \right|_{x=\hat{x}} \quad (III.4)$$

$$g(y) = g(\hat{y}) + D_{\hat{y}}(g)Ce, \text{ avec } D_{\hat{y}}(g) = \left. \frac{\partial g(y)}{\partial y^T} \right|_{y=\hat{y}} \quad (III.5)$$

Ainsi, l'équation (III.3) devient:

$$\dot{e} = (D_{\hat{x}}(f) - D_{\hat{y}}(g)C)e \quad (III.6)$$

Le problème consiste donc à déterminer une fonction $g(y)$, de sorte que l'erreur d'estimation converge asymptotiquement vers 0. La méthodologie de synthèse de cet observateur, telle que décrite dans [ADJ94], suppose que :

$$g(y) = R(\hat{x}, u)y \quad (III.7)$$

Et

$$R(\hat{x}, u) = P^{-1}F(\hat{x}, u)C^TQ \quad (III.8)$$

P est une matrice définie positive, telle que $V(e) = \frac{1}{2}e^T P e$ définit une fonction de Lyapounov.

$F(\hat{x}, u)$ et Q sont des matrices carrées de dimensions respectives $n \times n$ et $p \times p$ vérifiant les conditions suivantes :

$$\|PD_{\hat{x}}(f)\| < \|F(\hat{x}, u)\| \text{ et } \|F(\hat{x}, u)\| \text{ semi définie positive} \quad (III.9)$$

$$[C^TQC - I] \text{ est semi définie positive} \quad (III.10)$$

Où le symbole $\| \cdot \|$ désigne la norme euclidienne.

La matrice $F(\hat{x}, u)$ a été proposée dans [ADJ94] sous la forme:

$$F(\hat{x}, u) = \text{diag}(\Phi_i(\hat{x}, u)), \text{ avec } \Phi_i(\hat{x}, u) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n |\alpha_{ij}(\hat{x}, u) + \alpha_{ji}(\hat{x}, u)| \quad (III.11)$$

Le symbole *diag* définit une matrice diagonale, dont les éléments diagonaux sont $\Phi_i(\hat{x}, u)$ et les α_{ij} sont les éléments de $PD_{\hat{x}}(f)$.

L'observateur non linéaire, ainsi obtenu, est défini par l'équation suivante :

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + P^{-1} F(\hat{x}, u) C^T Q (y - C\hat{x}) \quad (\text{III.12})$$

Ce dernier présente un inconvénient majeur qui réside dans la nécessité d'une connaissance parfaite du modèle du système.

➤ Application de l'observateur non linéaire au diagnostic des défauts

L'idée consiste à reconstruire l'état et la sortie du système. Une analyse de l'erreur d'estimation de la sortie va permettre alors d'effectuer une détection et éventuellement une localisation des défauts. Ainsi, en présence de défauts du type capteur, actionneur ou des défauts paramétriques, la dynamique du système se met sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) + F_a \\ y = Cx + F_c \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Où $F_a \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur représentant les défauts paramétriques et/ou actionneurs. Le vecteur $F_c \in \mathbb{R}^p$ modélise les défauts du type capteur. La dynamique de l'erreur d'estimation est alors donnée par :

$$\dot{e} = [D_x(f) - R(\hat{x}, u)C]e - R(\hat{x}, u)F_c + F_a \quad (\text{III.14})$$

Le résidu, dans ce cas, peut être défini par l'erreur d'estimation de la sortie, puisqu'en absence de défauts, cette dernière est nulle, alors qu'en leur présence, elle diffère de zéro. Pour résoudre le problème d'isolation des défauts, il est possible d'appliquer les techniques proposées dans le chapitre (II).

III.2.2 Observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire

Soit le système régi par l'équation dynamique non linéaire suivante:

$$\dot{x} = A(x, u) + E_d(x)d(t) + E_f(x)f(t) \quad (\text{III.15})$$

Où $A(x, u)$ dépend du vecteur d'état $x(t)$ et de l'entrée $u(t)$. $f(t) \in \mathbb{R}^s$ et $d(t) \in \mathbb{R}^q$ représentent respectivement les défauts et les perturbations, reliés au système à travers les distributions respectives $E_f(x)$ et $E_d(x)$. Les observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire sont basés sur la notion d'états découplés. Ainsi la synthèse de ces derniers pour le diagnostic des défauts passe par deux étapes : la première est consacrée à la

génération de l'état découplé et la seconde à la synthèse de l'observateur et la génération du résidu [HEN99], [LAL03], [LAL04], [OUC04].

➤ Génération de l'état découplé

Le concept d'observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire emploie une transformation non linéaire de l'état $T(x)$, afin d'obtenir un état $z = T(x)$, appelé état découplé, dont la dynamique est découplée des entrées inconnues $d(t)$. L'équation dynamique traduisant l'évolution de l'état découplé est donnée par :

$$\dot{z} = \frac{\partial T(x)}{\partial x} (A(x, u) + E_d(x)d(t) + E_f(x)f(t)) \quad (\text{III.16})$$

La dynamique de z est donc découplée des entrées inconnues $d(t)$ si la transformation $T(x)$ satisfait la condition de découplage suivante:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} E_d(x) = 0 \quad (\text{III.17})$$

Sous certaines conditions, il existe $n - q$ solutions indépendantes du système (III.17), tel que $T(x)$ soit un difféomorphisme et $\text{rang}(E_d(x)) = q, \forall x \in \mathcal{R}^n$. Afin d'obtenir un modèle représentatif du procédé, il est nécessaire d'augmenter l'état découplé z par les sorties y^* vérifiant la relation:

$$x = \Psi_0(z, y^*) \quad (\text{III.18})$$

Où $y^* = \Phi^*(y)$ représente une transformation linéaire ou non du vecteur de sortie. Les conditions d'existence de $\Psi_0(z, y^*)$ sont rappelées dans [HEN99]. Ainsi, le modèle d'état du système peut être réécrit, en considérant l'état découplé z , comme suit :

$$\begin{cases} \dot{z} = \frac{\partial T(x)}{\partial x} (A(x, u) + E_f(x)f) \Big|_{x=\Psi_0(z, y^*)} \\ y = h(x) \Big|_{x=\Psi_0(z, y^*)} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

➤ Synthèse de l'observateur

Supposons qu'une relation de la forme $R(z, y) = 0$ existe. Pour reconstruire l'état découplé z , la structure de l'observateur, décrite sur la figure (III.1), peut être utilisée.

L'observateur est défini par le système d'équations (III.20) :

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \frac{\delta F(\hat{x})}{\delta \tilde{x}} A(\hat{x}, u) + H R(\hat{z}, y) \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases} \Big|_{\hat{x} = \Psi_0(\hat{z}, y^*)} \quad (\text{III.20})$$

Où \hat{x} et \hat{z} dénotent respectivement les estimations de x et z . Le vecteur de résidus r , quant à lui, est donné par $r = R(\hat{z}, y)$. H est le gain de l'observateur pouvant dépendre de l'état et de la commande. Ce gain est déterminé de façon à ce qu'en l'absence de défauts, $e = 0$ soit un point d'équilibre localement stable de l'équation différentielle décrivant la dynamique de reconstruction, telle que $e = z - \hat{z}$. La méthodologie de synthèse de cet observateur est détaillée dans [HEN99], [LAL03], [OUC04].

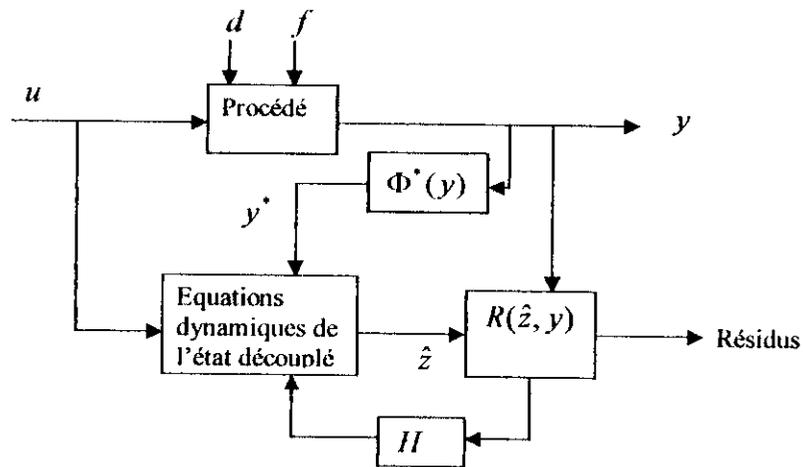


Figure III.1: Structure de l'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire.

Cette approche est performante pour la détection et la localisation des défauts en présence de perturbations, dont l'effet sur le système, est connu. Néanmoins, elle nécessite des conditions particulières qui limitent son utilisation.

III.2.3 Observateurs par modes glissants dédiés à la détection et la localisation des défauts

III.2.3.1 Introduction

De par leurs propriétés, les modes glissants offrent des avantages considérables. Parmi leurs caractéristiques, qu'il est possible d'exploiter pour la résolution du problème FDI, la robustesse explicite vis-à-vis des entrées inconnues et des défauts, l'obtention des résultats en un temps fini mais aussi, le fait que les modes glissants consistent en une théorie, applicable pour les systèmes non linéaires, sans linéarisation de ces derniers autour d'un point de

fonctionnement et sans connaître les paramètres du modèle avec précision [ALS99], [EDW00], [FLO04], [TAN02].

Les observateurs par modes glissants ont fait l'objet de plusieurs recherches dans le cadre de la détection et de la localisation des défauts. Initialement, les travaux ont été orientés vers la conception d'observateurs par modes glissants, en supposant que les états du système soient disponibles et de façon à ce que l'apparition d'un défaut, détruise le régime de glissement. En revanche, Edwards, Spurgeon et Patton [EDW00] ont proposé, récemment, une autre approche, qui suppose que les états du système ne soient pas disponibles et que la synthèse de l'observateur s'effectue de manière à maintenir le régime de glissement en présence des défauts. Ces derniers seront détectés et estimés à l'aide de la surface équivalente pendant le régime de glissement. Dans ce contexte, une autre méthode de détection et de reconstruction des défauts a été proposée par Tan et Edwards [TAN02].

Dans ce paragraphe, il est question, tout d'abord, d'introduire l'idée de conception d'observateurs par modes glissants pour la détection et la localisation des défauts, pour les systèmes linéaires, à travers l'approche proposée par Edwards, Spurgeon et Patton [EDW00]. Nous présenterons ensuite des observateurs par modes glissants utilisés pour le diagnostic des systèmes non linéaires. Enfin, nous proposerons une méthode de génération de résidus robustes, pour les systèmes linéaires et non linéaires, en utilisant un observateur de défauts, associé à un observateur d'état par modes glissants.

III.2.3.2 Observateur par modes glissants d'Edwards, Spurgeon et Patton pour les systèmes linéaires

Soit le système linéaire défini par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_f f_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Où $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ et $y(t) \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de commande et le vecteur de sortie du système. Et telles que $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ et $E_f \in \mathbb{R}^{n \times q}$. $f_a(t) \in \mathbb{R}^q$ et $f_c(t) \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement les vecteurs défauts actionneurs et capteurs, inconnus mais bornés. Nous supposons également que les états du système ne sont pas mesurables, seules les entrées de commande et les sorties le sont.

➤ Synthèse de l'observateur par modes glissants

L'objectif consiste à reconstruire les états à partir d'un observateur, de manière à ce que l'erreur d'estimation de la sortie tende vers zéro en un temps fini. Soit l'observateur suivant:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - G_1 e_y + G_n S \quad (\text{III.22})$$

Où G_1 et G_n représentent les gains de l'observateur de dimension $n \times p$. S est une fonction discontinue et $e_y = C\hat{x} - y$. Supposons, dans un premier temps, le cas où seuls des défauts actionneurs agissent sur le système et que ces derniers vérifient :

$$\|f_a(t)\| \leq \rho(t, y, u) \quad (\text{III.23})$$

$\rho(t, y, u) : \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$, est connue. En supposant que $p \geq q$, les conditions d'existence d'un tel observateur, robuste vis-à-vis des défauts $f_a(t)$, sont :

$$C_1 : \text{rang}(CE_f) = q.$$

$$C_2 : \text{Les zéros invariant de } (A, E_f, C) \text{ sont stables.}$$

Si la première condition est satisfaite, alors il existe un changement de variables $x \rightarrow Tx$ tel que :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + E_{f2}f_a \\ y = x_2 \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Où $A_{11} \in \mathbb{R}^{(n-p) \times (n-p)}$ est une matrice stable, $E_{f2} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ est non singulière. Une méthode de synthèse de l'observateur (III.22) a été proposée dans [EDW00]. Ce dernier se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u - A_{12}e_y \\ \dot{\hat{x}}_2 = A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u - (A_{22} - A_{22}^s)e_y + S \\ \hat{y} = \hat{x}_2 \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Où la matrice A_{22}^s est une matrice stable, et $e_y = \hat{x}_2 - x_2$ est l'erreur d'estimation de la sortie. La fonction discontinue S est proposée sous la forme suivante :

$$S = \begin{cases} -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\|} & \text{si } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

$P_0 \in \mathbb{R}^{p \times p}$ est une matrice semi définie positive, c'est la matrice de Lyapov de A_{22}^s , solution de l'équation :

$$P_0 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_0 = -I \quad (\text{III.27})$$

La dynamique de l'erreur d'estimation des états est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{11}e_1 \\ \dot{e}_y = A_{21}e_1 + A_{22}^s e_y + S - E_{f2}f_a \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Le système (III.28) est stable. Un régime de glissement s'instaure en forçant e_y à zéro.

Les gains de l'observateur (III.22) sont donc donnés par:

$$G_l = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad G_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

➤ **Reconstruction des défauts actionneurs ou composants:**

Supposons qu'un observateur, tel que défini par les équations (III.25), a été synthétisé et que le régime de glissement est établi. Durant le régime de glissement, nous avons:

$$e_y = 0 \text{ et } \dot{e}_y = 0 \quad (\text{III.30})$$

Il s'en suit que :

$$0 = A_{21}e_1 - E_{f2}f_a + S_{eq} \quad (\text{III.31})$$

Où S_{eq} est la surface équivalente qui représente l'effort nécessaire pour maintenir le régime de glissement [EDW00]. En utilisant le fait que A_{11} soit stable et donc $e_1(t) \rightarrow 0$, alors:

$$S_{eq} \rightarrow E_{f2}f_a \quad (\text{III.32})$$

Il a été proposé, pour le calcul de S_{eq} , de remplacer la fonction discontinue par une fonction continue, donnée par [EDW00]:

$$S_\delta = -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\| + \delta} \quad (\text{III.33})$$

Où δ est un scalaire positif, suffisamment petit. Ainsi le défaut peut être estimé à l'aide de:

$$f_a(t) \approx -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| (E_{f2}^T E_{f2})^{-1} E_{f2}^T \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\| + \delta} \quad (\text{III.34})$$

➤ Reconstruction des défauts capteurs

Supposons, à présent, que le système (III.21) soit soumis à des défauts capteurs seulement:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (III.35)$$

Où $f_c(t) \in \mathbb{R}^p$ représente le vecteur des défauts capteurs. Dans ce cas : $e_y = e_2 - f_c$ et la dynamique de l'erreur d'estimation devient alors:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{11}e_1 + A_{12}f_c \\ \dot{e}_y = A_{21}e_1 + A_{22}^s e_y - \dot{f}_c + A_{22}f_c + S \end{cases} \quad (III.36)$$

Le régime de glissement étant établi, il est possible d'écrire :

$$0 = A_{21}e_1 - \dot{f}_c + A_{22}f_c + S_{eq} \quad (III.37)$$

En supposant que le défaut est lentement variable, alors,

$$S_{eq} \approx -(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})f_c \quad (III.38)$$

De la même manière que précédemment, il est possible de calculer la surface équivalente à partir de l'expression (III.33) et par conséquent, si $(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})$ est non singulière, le défaut capteur peut être reconstruit à l'aide de l'équation (III.38). Pour plus de détails sur les démonstrations relatives à cette approche se référer à [EDW00].

Une seconde approche a été donnée par Tan et Edwards [TAN02], concernant la reconstruction des défauts capteurs. Celle-ci est basée sur l'introduction d'un second observateur par modes glissants. La procédure consiste à définir un nouvel état $z_f \in \mathbb{R}^p$:

$$\dot{z}_f = -A_f z_f + A_f S_{eq} \quad (III.39)$$

Où $-A_f \in \mathbb{R}^{p \times p}$ est un filtre matriciel stable. Généralement A_f est une matrice diagonale définie positive. L'erreur d'estimation est donnée par:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{z}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ -A_f A_{21} & -A_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ -A_f A_{22} \end{bmatrix} f_c \quad (III.40)$$

En écrivant z_f sous la forme:
$$z_f = \begin{bmatrix} 0 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} \quad (III.41)$$

Alors nous aboutissons au système défini par:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{z}_f \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} + F_0 f_c \\ z_f = C_0 \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

Où
$$A_0 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ -A_f A_{21} & -A_f \end{bmatrix}, F_0 = \begin{bmatrix} A_{12} \\ -A_f A_{22} \end{bmatrix}, C_0 = [0 \quad I_p]$$
 (III.43)

Ainsi, le système obtenu ressemble au système (III.21). Il est donc possible de synthétiser un observateur par modes glissants comme précédemment. Cette méthode est dite méthode du « second observateur ». La condition nécessaire pour l'existence de cet observateur est que la matrice $(A_{11} - A_{12}(A_{22})^{-1}A_{21})$ soit stable et A_{22} inversible. L'estimé de f_c est donné par [TAN02]:

$$\hat{f}_c = -A_{22}^{-1} A_f^{-1} S_{eq0} \quad (\text{III.44})$$

Où S_{eq0} représente la surface équivalente du second observateur. La structure générale de la détection de défauts par cette méthode est représentée sur la figure suivante :

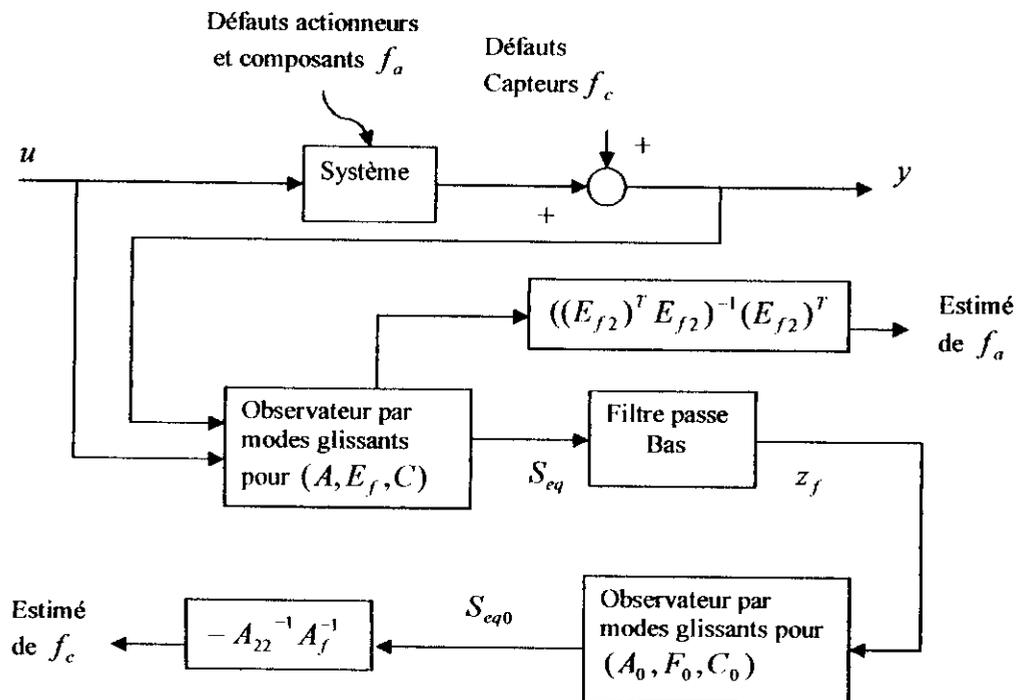


Figure III.2 : Principe de la détection de défauts par la méthode dite « du second observateur ».

III.2.3.3 Observateurs par modes glissants de Walkot-Zak pour les systèmes non linéaires

Soit la classe particulière, de systèmes non linéaires, définie par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{III.45})$$

Où $x \in X \subset \mathbb{R}^n$, $u \in U \subset \mathbb{R}^m$ et $y \in Y \subset \mathbb{R}^p$ représentent les vecteurs d'état, de commande et de sortie du système. Les matrices A et C sont de dimensions appropriées. $f(x, u)$ est une fonction non linéaire. L'observateur par modes glissants de Walkot-Zak est défini par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + f(\hat{x}, u) + L(y - C\hat{x}) + S(\hat{x}, y) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

Où $S(\hat{x}, y)$ est une fonction discontinue donnée par:

$$S = \begin{cases} \frac{P^{-1}C^T C e}{\|Ce\|} & \|Ce\| > \varepsilon \\ \frac{P^{-1}C^T C e}{\varepsilon} & \|Ce\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

$e = x - \hat{x}$ représente l'erreur d'estimation des états et ε est la borne supérieure des incertitudes. P est une matrice définie positive, elle est solution de l'équation de Riccati suivante :

$$(A - LC)^T P + P(A - LC) + \lambda_f P P + I = -Q \quad (\text{III.48})$$

Q est une matrice définie positive, λ_f représente la constante de lipschitz de f , telle que:

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq \lambda_f \|x_1 - x_2\| \quad \forall x_1, x_2 \in X \quad (\text{III.49})$$

Différentes approches ont été proposées pour l'application de cet observateur pour des fins de diagnostic. Pour plus de détails se référer à [ALS99], [OUC04].

III.2.3.4 Observateurs par modes glissants étape par étape

Soit le système défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + g(x)u + E_d(x)d + E_f(x)f \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.50})$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement les états, la commande et les sorties du système. $d \in \mathbb{R}$ et $f \in \mathbb{R}$ sont respectivement la perturbation et le défaut agissant sur le système.

Nous avons introduit dans le chapitre (II) l'approche géométrique utilisée pour la résolution du problème FPRG. Nous avons, donc, rapporté les conditions d'existence de solutions à ce problème par cette approche. Cependant, ces conditions n'étant pas toujours satisfaites, la solution au FPRG n'existe pas toujours. Néanmoins, il est possible de réaliser les objectifs du FPRG par une autre technique, cette dernière consiste non pas à découpler le résidu de l'effet des perturbations mais à estimer celles-ci. Ceci étant possible s'il existe une transformation adéquate permettant la décomposition de l'espace d'état en deux sous systèmes affectés par les entrées inconnues, mais un seulement est sensible aux défauts. L'un sera alors utilisé pour reconstruire la perturbation alors que l'autre sera de détecter le défaut.

➤ Conception de l'observateur de perturbations

En ce qui concerne les concepts de géométrie différentielle, il est possible de se référer à l'annexe (A.)

Sous certaines conditions et en appliquant le théorème de Frobenius, il a été montré dans [FLO04] qu'il est possible de décomposer le système précédent en deux sous systèmes :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \tilde{A}_1(z) + \tilde{g}_1(z)U + \tilde{E}_{d1}(z)d + \tilde{E}_{f1}(z)f \\ y_1 = \tilde{h}_1(z) = [h_1(x) \cdots h_{n-k}(x)]^T \end{cases} \quad (\text{III.51.a})$$

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = \tilde{A}_2(z_2) + \tilde{g}_2(z_2)U + \tilde{E}_{d2}(z_2)d \\ y_2 = \tilde{h}_2(z_2) = [\tilde{h}_{21}(x) \cdots \tilde{h}_{2k}(x)]^T \end{cases} \quad (\text{III.51.b})$$

Où : $z_1 = [z_{11} \cdots z_{1d}]^T$, $z_2 = [z_{2(d+1)} \cdots z_{2n}]^T$. Le deuxième sous système est sensible à l'entrée inconnue et insensible au défaut, il va permettre d'estimer la perturbation. Pour cela, il a été proposé dans [FLO04] l'utilisation des observateurs par modes glissants afin d'exploiter leur propriété, assurant une estimation en un temps fini, plus particulièrement, l'observateur triangulaire. Un changement de variable de la forme suivante est effectué :

$$\xi = \theta(z_2) = [\tilde{h}_2(z_2) \cdots L_{\tilde{A}_2}^{n-d-1} h_2(z_2)]^T \quad (\text{III.52})$$

Sous certaines conditions [FLO04], le sous système (III.51.b) devient :

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \bar{A}_2 \xi + \bar{F}_2(\xi) + \bar{g}_2(\xi)u + \bar{E}_{d_2}(\xi)d \\ y_2 = \xi_1 \end{cases} \quad (\text{III.53})$$

$$\text{Où : } \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{E}_{d_2}(\xi) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ E_{d_2}(\xi) \end{bmatrix} \quad E_{d_2}(\xi) = dL_{\bar{A}_2}^{n-d-1} \tilde{h}_2(z_2) \tilde{E}_{d_2}$$

$$\bar{F}_2(\xi) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \tilde{f}_2(\xi) \end{bmatrix} \quad \tilde{f}_2(\xi) = L_{\bar{A}_2}^{n-d} \tilde{h}_2(z_2) \quad \text{Et} \quad \tilde{g}_2(\xi) = \begin{bmatrix} g_{2,1}(\xi_1) \\ g_{2,2}(\xi_1, \xi_2) \\ \vdots \\ g_{2,(n-d-1)}(\xi_1, \dots, \xi_{n-d-1}) \\ g_{2,(n-d)}(\xi) \end{bmatrix}$$

$$\bar{g}_{2,j}(\xi_1, \dots, \xi_j) = L_{\bar{g}_2} L_{\tilde{f}_2}^{-1} \tilde{h}_2 \quad j = 1, \dots, n-d$$

Soit l'observateur, par modes glissants, étape à étape, permettant l'estimation de l'état ξ donné par les équations (III.54).

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}}_1 = \hat{\xi}_2 + \bar{g}_{2,1}(\xi_1)u + \lambda_1 \text{sign}_1(\xi_1 - \hat{\xi}_1) \\ \dot{\hat{\xi}}_2 = \hat{\xi}_3 + \bar{g}_{2,2}(\xi_1, \tilde{\xi}_2)u + \lambda_2 \text{sign}_2(\tilde{\xi}_2 - \hat{\xi}_2) \\ \vdots \\ \dot{\hat{\xi}}_{n-d-1} = \hat{\xi}_{n-d} + \bar{g}_{2,n-d-1}(\xi_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_{n-d-1})u + \lambda_{n-d-1} \text{sign}_{n-d-1}(\tilde{\xi}_{n-d-1} - \hat{\xi}_{n-d-1}) \\ \dot{\hat{\xi}}_{n-d} = \tilde{f}_2(\xi_1, \dots, \hat{\xi}_{n-d}) + \bar{g}_{2,n-d}(\xi_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_{n-d})u + \lambda_{n-d} \text{sign}_{n-d}(\tilde{\xi}_{n-d} - \hat{\xi}_{n-d}) \\ \hat{y}_2 = \hat{\xi}_1 \end{cases} \quad (\text{III.54})$$

$$\text{Où } \tilde{\xi}_i = \hat{\xi}_i + (\lambda_{i-1} \text{sign}(\xi_{i-1} - \hat{\xi}_{i-1}))_{eq} \quad i = 2, \dots, n-d$$

Afin d'estimer la perturbation, on procède étape par étape. Ainsi, en un temps fini t_f , nous avons :

$$d_{est} = \frac{1}{E_{d_2}(\xi)} (\lambda_{n-d} \text{sign}(e_{n-d})_{eq}) \quad (\text{III.55})$$

d_{est} représente l'estimé de la perturbation:

$$d = d_{est} + O(\varepsilon) \quad (III.56)$$

La valeur de $\lambda_n d \text{sign}(e_n d)_{eq}$ peut être obtenue par un filtre passe bas, ou par certaines approximations continues de la fonction signe, telle que celle donnée par l'équation (III.33).

➤ **Détection des défauts**

Sachant une estimation de l'entrée inconnue d et en se rapportant au premier sous système, donné par les équations (III.51.a), il est possible désormais de détecter la présence du défaut f , par les méthodes FDI connues.

III.2.3.5 Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes

L'idée de base de l'approche, que nous proposons pour la génération de résidus en utilisant la théorie des modes glissants, consiste à synthétiser des observateurs par modes glissants, robustes vis-à-vis, non seulement des entrées inconnues, mais aussi des défauts et d'utiliser ainsi les états estimés pour la génération de résidus robustes. Ces résidus, qui ne sont rien d'autre qu'une combinaison des différents défauts, vont permettre la détection de la présence d'un défaut tout en rejetant les perturbations et éventuellement la reconstruction de ce dernier. Cette approche est une continuité du travail effectué dans [OUC04].

La figure suivante illustre le principe de cette méthode :

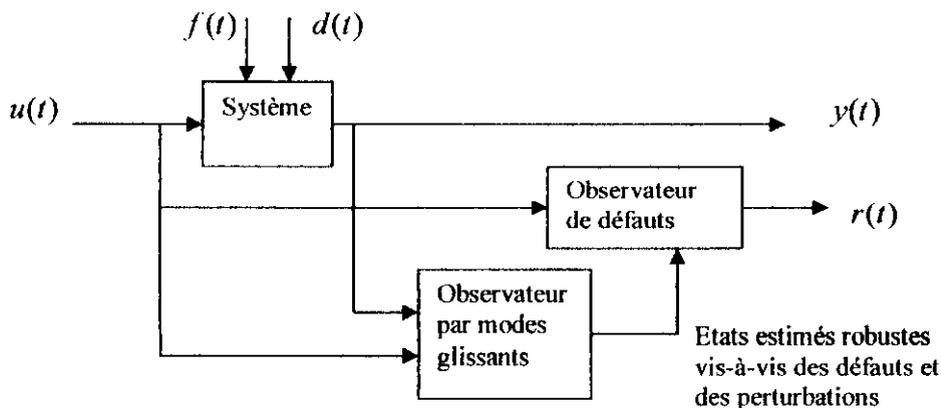


Figure III.3 Principe de la méthode à base d'observateur par modes glissants, Proposée pour la génération des résidus.

Soit le système, soumis à des défauts et perturbations, défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) + E_d(x)d + E_f(x)f \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.57})$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ et $y \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de commande et le vecteur de sortie. $d \in \mathbb{R}^q$ et $f \in \mathbb{R}^p$ sont respectivement les perturbations et les défauts agissant sur le système.

Proposition III.1

S'il existe une matrice constante T , vérifiant la condition $TE_d(x) = 0$. Alors, il est possible de définir un générateur de résidus sensibles aux défauts et insensibles aux perturbations, selon le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T\hat{x} - NTA(\hat{x}, u) \\ \hat{r} = z + NT\hat{x} \end{cases} \quad (\text{III.58})$$

Où \hat{x} désigne l'état estimé par un observateur par modes glissants, robuste vis-à-vis des défauts et des perturbations. \hat{r} représente le vecteur des résidus. N est une matrice définie positive, déterminée de façon à avoir la dynamique de l'observateur plus rapide que celle du système.

Preuve

Le système (III.57) peut être réécrit sous la forme suivante:

$$E_f(x)f = \dot{x} - A(x, u) - E_d(x)d \quad (\text{III.59})$$

En multipliant de part et d'autre de l'équation par une fonction vectorielle $T(x)$ de dimension appropriée, nous avons:

$$T(x)E_f(x)f = T(x)\dot{x} - T(x)A(x, u) - T(x)E_d(x)d \quad (\text{III.60})$$

Si $T(x)$ est choisie de manière à vérifier la condition suivante:

$$T(x)E_d(x) = 0 \quad (\text{III.61})$$

Alors le découplage des perturbations est assuré. Ainsi nous définissons le vecteur résidu comme étant égal à :

$$r = T(x)E_f(x)f \quad (\text{III.62})$$

D'où

$$r = T(x)\dot{x} - T(x)A(x,u) \quad (\text{III.63})$$

Nous constatons donc que ce résidu est bien sensible aux défauts et découplé des perturbations. Cependant, en raison de la difficulté de calcul directe de ce dernier, il a été proposé dans [OUC04] un observateur de défauts sous la forme:

$$\dot{\hat{r}} = -N(x)\hat{r} + N(x)T(x)(\dot{x} - A(x,u)) \quad (\text{III.64})$$

La dynamique de l'erreur d'estimation du résidu est donnée par :

$$\dot{e} = \dot{\hat{r}} - \dot{r} \quad (\text{III.65})$$

Mais, en supposant que le gain de l'observateur est défini de sorte que la dynamique de l'observateur soit beaucoup plus rapide que celle du système alors :

$$\dot{\hat{r}} \gg \dot{r} \quad (\text{III.66})$$

D'où :

$$\dot{e} \approx \dot{\hat{r}} \quad (\text{III.67})$$

Par conséquent :

$$\dot{e} = -N(x)\hat{r} + N(x)T(x)(\dot{x} - A(x,u)) \quad (\text{III.68})$$

Ainsi:

$$\dot{e} = -N(x)e \quad (\text{III.69})$$

Nous constatons donc que la matrice $N(x)$ doit être définie positive pour que l'erreur d'estimation du résidu tende asymptotiquement vers zéro.

Cependant, un inconvénient de l'application de cet observateur réside dans la difficulté de connaissance de la dérivée de l'état. Pour éliminer ce terme, nous proposons l'introduction d'une variable z telle que :

$$z = \hat{r} - N(x)T(x)x \quad (\text{III.70})$$

La dynamique de z est alors donnée par :

$$\dot{z} = \dot{\hat{r}} - \frac{\partial N(x)}{\partial x} \dot{x}T(x)x - N(x) \frac{\partial T(x)}{\partial x} \dot{x}x - N(x)T(x)\dot{x} \quad (\text{III.71})$$

En remplaçant \hat{r} par son expression, nous obtenons :

$$\dot{z} = -N(x)z - N^2(x)T(x)x - N(x)T'(x)A(x,u) - \frac{\partial N(x)}{\partial x} \dot{x}T(x)x - N(x) \frac{\partial T(x)}{\partial x} \dot{x}x \quad (\text{III.72})$$

Nous remarquons que si $T(x)$ et $N(x)$ sont constantes et indépendantes de x alors, il est possible d'écrire l'équation (III.72) sous la forme:

$$\dot{z} = -Nz - N^2Tx - NTA(x,u) \quad (\text{III.73})$$

Ainsi, la dynamique de z ne dépend plus de la dérivée de l'état. z peut être calculé pourvu que les états soient disponibles. Une fois z estimé, il est possible de retrouver le résidu dont la valeur est donnée par :

$$\hat{r} = z + NTx \quad (\text{III.74})$$

Lorsque des états du système ne sont pas disponibles, il est nécessaire d'associer à cet observateur des observateurs d'état robustes vis-à-vis des défauts et des perturbations. Ces derniers permettront d'avoir de bonnes estimations des états indépendamment des défauts et des perturbations. Vu les propriétés des observateurs par modes glissants, comme il a été mentionné précédemment, ces derniers correspondent bien à ce type de problèmes.

Ainsi, le générateur de résidus proposé se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T\hat{x} - NTA(\hat{x},u) \\ \hat{r} = z + NT\hat{x} \end{cases} \quad (\text{III.75})$$

Où \hat{x} désigne l'état estimé, robuste vis-à-vis des défauts et perturbations.

L'approche que nous venons de proposer, bien qu'elle ne soit pas générale, présente des propriétés très intéressantes pour la détection et l'isolation des défauts. Tout d'abord, elle est applicable pour les systèmes linéaires et non linéaires. Elle permet le découplage d'un nombre illimité d'entrées inconnues et ne nécessite pas des conditions de rang restrictives comme pour le cas des approches étudiées précédemment. Il est à remarquer qu'un choix approprié de la matrice de découplage peut permettre l'isolation des défauts et même la reconstruction de ces derniers. Ce qui s'avère avantageux pour des objectifs de commandes tolérantes aux défauts où l'on recherche à compenser l'effet des défauts. Ce dernier point sera développé dans le chapitre (IV).

Il faut signaler, également, que cette approche diffère des autres dans le sens où elle se base sur le découplage direct des résidus vis-à-vis des perturbations et non pas sur le découplage des états estimés.

Néanmoins, cette méthode présente des limitations qui sont dues à la difficulté de détermination d'une matrice de découplage constante et à la nécessité de vérifier la condition donnée par l'équation (III.66).

III.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, il a été question de présenter quelques observateurs dédiés à la détection et la localisation des défauts des systèmes non linéaires. Nous nous sommes intéressés, plus particulièrement, aux observateurs par modes glissants en raison de leurs propriétés intéressantes pour la résolution du problème FPRG. Nous avons ensuite proposé un observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants. Cette approche s'avère intéressante pour la génération de résidus robustes. Elle s'applique pour les systèmes linéaires et non linéaires et ne nécessite pas de conditions de synthèse restrictives. Elle peut éventuellement permettre l'estimation des défauts, ce qui peut être utilisé pour compenser l'effet de ces derniers.

IV.1 INTRODUCTION

Suite à la demande croissante de fiabilité dans les processus industriels, les techniques de détection et de localisation des défauts (F'DI) ont connu un développement sans précédent ces dernières années. Néanmoins, il est à noter qu'en parallèle, des travaux sont effectués dans le domaine de la commande tolérante aux défauts (FTC) qui est essentiellement conçue afin de maintenir au mieux les performances d'un système.

En dépit du fait que la commande tolérante aux défauts soit très récente dans le domaine de la commande des systèmes, des travaux de recherche ont été déjà effectués dans le domaine de l'aéronautique, aux Etats Unis, au début des années 80, sous l'impulsion de projets financés par la NASA. Les méthodes proposées étaient en général issues de techniques classiques de commande (commandes linéaires quadratiques, adaptatives, ou robustes) et étaient intimement liées au type d'applications considérées [HEI92], [JAM03], [PAT97]. Cependant, l'interaction diagnostic/commande n'apparaissait pas explicitement comme un moyen de synthèse car les techniques de diagnostic étaient développées comme un outil de surveillance et non pas comme une partie intégrante de la commande. Désormais, il s'agit de savoir comment intégrer les techniques de diagnostic existantes au profit de la commande tolérante aux défauts, conduisant ainsi les chercheurs impliqués à s'intéresser aux notions d'accommodation et de reconfiguration de lois de commande, le système de diagnostic jouant le rôle d'un capteur de défauts [JAM03], [NOU00].

Dans l'étude qui précède, nous avons proposé une méthode de détection et de localisation des défauts utilisant des observateurs de défauts associés à des observateurs par modes glissants. L'objectif de l'étude qui suit est de montrer comment il est possible d'utiliser les observateurs précédents pour résoudre le problème de l'accommodation aux défauts. Mais auparavant, un état de l'art de la commande tolérante aux défauts sera donné. Il est question donc de rappeler les différents concepts et définitions relatifs à ce domaine, de présenter les approches existantes ainsi que quelques méthodes de commandes tolérantes aux défauts.

IV.2 DEFINITIONS ET CONCEPTS

➤ La commande tolérante aux défauts

La commande tolérante aux défauts a pour but de s'accommoder automatiquement de l'effet des défauts tout en étant capable de maintenir la stabilité et au mieux les performances nominales du système. Elle a pour but aussi d'éviter l'arrêt immédiat du système et de permettre une dégradation contrôlée de son fonctionnement [BLA01], [JAM03], [NOU00], [SAU03].

➤ Reconfiguration d'une loi de commande

Elle consiste à changer les paramètres ou la structure de la commande lors de la détection de la présence d'un défaut afin de maintenir la stabilité et les performances du système ou de conduire le système vers un état de fonctionnement en mode dégradé.

➤ **Un défaut**

Comme il a été déjà défini dans le premier chapitre, un défaut consiste en tout type de dysfonctionnement ou de dégradation dans un processus pouvant engendrer une réduction des performances, voire même une altération de son fonctionnement. Néanmoins, il est important dans l'étude de la commande tolérante aux défauts de distinguer entre les différents types de défauts suivants [JAM03]:

a. Défauts non sévères

Ils engendrent des dégradations des performances du système, voire même une déstabilisation de ce dernier. Une approche de commande robuste s'avère suffisante pour éviter ces dégradations.

b. Défauts Sévères non catastrophiques

Dans cette catégorie, il est possible de distinguer:

- **Les défauts non critiques** qui peuvent être corrigés en modifiant la loi de commande, une fois le défaut détecté. Dans ce cas on parle de reconfiguration.
- **Les défauts critiques**, comme par exemple une perte d'actionneurs ou de capteurs. Dans ce cas, il faut également reconfigurer mais en considérant une dégradation des objectifs et des performances désirés. On parle donc de reconfiguration avec perte des objectifs.

c. Défauts catastrophiques

Ils engendrent des dysfonctionnements du système, impossible à corriger ou à contrer leur effet. Un exemple de défauts catastrophiques est un court-circuit au niveau d'un moteur. L'effet de ce dernier peut être dévastateur. Le seul moyen de corriger ce type de défauts est l'intervention de l'opérateur humain par le remplacement du composant défectueux.

IV.3 POSITIONNEMENT DU PROBLEME

L'idée de base d'un système de commande tolérant aux défauts est de concevoir un dispositif de commande particulier permettant de maintenir la stabilité et les performances du système à commander, sujet à des défauts qui peuvent le faire dévier de son point de

fonctionnement nominal. Le dispositif peut permettre aussi de mener le système de commande vers un autre point de fonctionnement, proche du point de fonctionnement nominal. On parle alors de reconfiguration avec changement d'objectifs. Dans ce dernier cas le système fonctionne en mode dégradé. Afin de satisfaire l'un de ces objectifs, les commandes robustes et adaptatives ne suffisent plus et il est nécessaire de faire appel à des techniques qui prennent en considération l'interaction entre le système de détection des défauts et la loi de commande. C'est ce dernier point qui constitue, aujourd'hui la préoccupation majeure des chercheurs dans le domaine.

La stratégie de commande tolérante aux défauts dépend des caractéristiques des défauts, de leur nature, leur nombre et leur effet sur le système. Elle dépend aussi, du système de commande, de ses propriétés (observabilité et commandabilité) et de ses constituants (capteurs et actionneurs). Ainsi, il est important de noter qu'avant de choisir une technique d'accommodation aux défauts, une étude de la nature des défauts et de leur effet sur le système (degrés de sévérité) est nécessaire. La figure suivante illustre ceci.

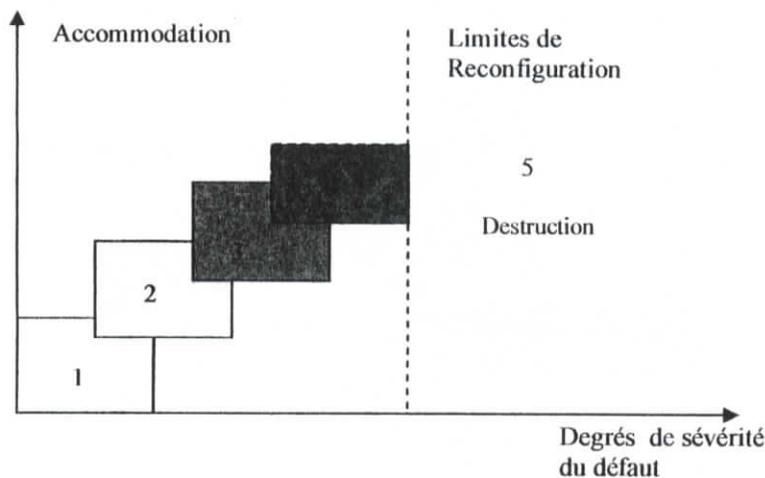


Figure IV.1 : Relation entre la commande tolérante et la nature des défauts.

1 : Défauts non sévères, une commande robuste s'avère suffisante.

2 : Défauts sévères, non catastrophiques, du type non critique, tels que les biais et les dérives. Dans ce cas, il est possible d'appliquer des commandes du type rejet de perturbations, commandes adaptatives et des commandes basées sur l'interaction diagnostic/commande.

3 : Défauts sévères, non catastrophiques, non critiques menant à une saturation du système ou à une instabilité. Dans ce cas, des méthodes de reconfiguration en maintenant des objectifs de commande acceptables sont nécessaires.

4 : Défauts sévères, non catastrophiques, mais critiques du type perte d'actionneurs ou de capteurs. Contrairement au cas précédent, les méthodes de reconfiguration dans ce cas nécessitent une modification des objectifs, qui demeurent dans une plage de fonctionnement acceptable. Le système fonctionnera alors en mode dégradé.

5 : Défauts catastrophiques engendrant la destruction du système si l'opérateur humain n'intervient pas. Il est alors nécessaire de remplacer le composant défectueux.

Le principe de reconfiguration est illustré sur la figure (IV.2). La procédure est très simple. Si un défaut apparaît, le système dévie de son point de fonctionnement nominal, défini par les variables entrées/sorties (u_0, y_0) , vers un autre point (u_f, y_f) . Le but de la commande tolérante dans ce cas précis est de déterminer une nouvelle loi de commande qui prend en compte les variations dues à l'apparition du défaut et permet d'amener le système, soit vers l'état de fonctionnement nominal et par conséquent les performances seront maintenues, soit vers un autre point de fonctionnement, défini par (u_c, y_c) , pour lequel les performances ne sont pas les mêmes qu'initialement mais en sont très proches (acceptables) [NOU00].

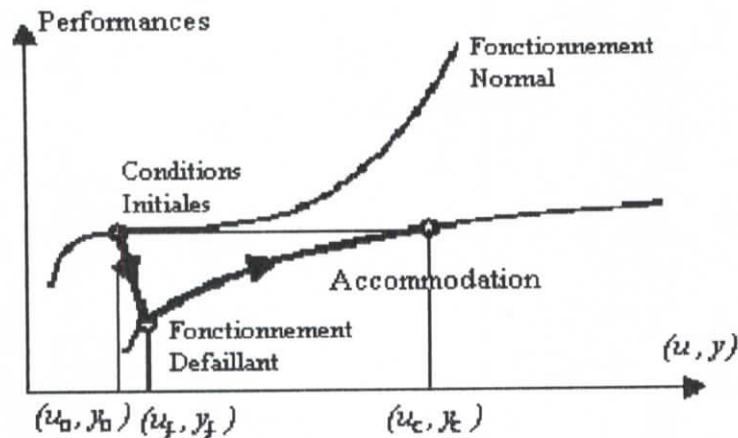


Figure IV.2 : Principe de reconfiguration.

IV.4 LES DIFFERENTES APPROCHES DE COMMANDES TOLERANTES AUX DEFAUTS

Actuellement, dans le domaine de la commande tolérante, on distingue trois approches : l'approche passive, l'approche active et l'approche adaptative [JAM03].

IV.4.1 Accommodations passives

Elles sont basées sur l'idée simple que les défauts (non sévères) représentent des perturbations que la loi de commande doit prendre en compte dès sa conception initiale, engendrant une structure de contrôle fixe à paramètres fixes. Elles utilisent des techniques de commandes robustes assurant l'insensibilité du système de commande vis-à-vis de certains défauts. Diverses méthodes ont été proposées dans ce sens, telles que la commande H_∞ , la commande à structures variables et la commande à rejet de perturbations [JAM03]. Ce type d'approches n'a besoin ni d'un module de diagnostic pour détecter la présence des défauts ni d'un bloc de reconfiguration de la structure et/ou des paramètres du système de contrôle.

IV.4.2 Accommodations actives

A l'opposé des méthodes passives, les méthodes actives réagissent à l'apparition d'un ou de plusieurs défauts par la restructuration du système de contrôle. Leur objectif principal est de compenser au mieux l'effet des défauts sur le système afin de maintenir sa stabilité et ses performances, en jouant sur la robustesse de la commande qui doit être améliorée à chaque détection d'un défaut. Elles sont composées essentiellement de trois éléments fondamentaux:

- a. Une commande reconfigurable.
- b. Un module de diagnostic permettant la détection, l'isolation et l'estimation de l'amplitude des défauts.
- c. Un mécanisme de reconfiguration.

Le problème majeur dans cette approche consiste en la limitation du temps disponible pour recalculer la loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut [KME02].

IV.4.3 Accommodations adaptatives

La commande tolérante aux défauts du type adaptatif est une approche à accommodation possédant une structure de commande fixe, seuls les paramètres de celle-ci sont modifiés. Dans le cas des systèmes linéaires à défauts additifs externes, elle consiste à générer un signal résidu reflétant le défaut à compenser. Ce résidu est alors utilisé pour générer la correction à apporter à la commande nominale du système [JAM03]. Dans le cas où la correction n'est effectuée que lorsque le défaut est déclaré significatif, par un test appliqué sur les résidus, alors la commande adaptative résultante peut être classée dans la catégorie des méthodes actives car elle est dépendante d'une prise de décision.

IV.5 DIFFERENTES METHODES DE COMMANDES TOLERANTES AUX DEFAUTS

Différentes méthodes de commandes tolérantes aux défauts ont été établies. Ces dernières utilisent des principes connus en automatique:

IV.5.1 Méthode de la pseudo inverse

Soit le système en boucle fermée, dont le modèle nominal est défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \\ u = -Kx \end{cases} \quad (IV.1)$$

Si un défaut apparaît au niveau du système alors le modèle change et devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_f = A_f x_f + B_f u_f \\ y_f = C_f x_f \end{cases} \quad (IV.2)$$

La méthode de la pseudo inverse consiste à calculer la matrice de gain K_f de manière à avoir la dynamique du système en boucle fermée approximativement égale à celle du système nominal. i.e :

$$u_f = -K_f x_f, \text{ telle que : } A - BK = A_f - B_f K_f \quad (IV.3)$$

D'où :

$$K_f = B_f^+ (A_f - A + BK) \quad (IV.4)$$

B_f^+ étant la matrice pseudo inverse de B_f .

C'est une méthode simple. Cependant, la solution n'est pas toujours satisfaisante car elle ne garantit pas la stabilité en mode défaillant. Pour remédier à cela la méthode de la pseudo inverse modifiée (MPIM) a été proposée [JAM03]. Il est à noter aussi qu'en pratique, il n'est pas possible d'anticiper l'apparition des défauts et donc le système défaillant ne peut être valide.

IV.5.2 Commande adaptative

C'est peut être l'approche la plus intuitive pour l'accommodation aux défauts internes. En effet, un défaut interne agit sur le système et provoque des variations des paramètres. L'identification en ligne de ces paramètres va permettre la modification de ceux du régulateur à structure fixe. Ces méthodes ont fait l'objet de beaucoup d'études, notamment dans le

domaine de l'aéronautique [JAM03], [NOU00]. Néanmoins, l'un des inconvénients de ces approches réside dans la difficulté de déterminer les matrices de pondération nécessaires au compromis stabilité/performance. Ainsi, les différentes situations étudiées ne font souvent intervenir que des défauts peu sévères et la présence de bruits n'est pas prise en compte.

IV.5.3 Commande multi-modèle

C'est une méthode qui attire l'attention des chercheurs pour la résolution du problème de l'accommodation pour les systèmes non linéaires. En effet, cette technique permet de commander un système non linéaire sur une large zone de fonctionnement, décomposée en plusieurs zones linéarisées autour de différents points de fonctionnements. Il est alors possible d'appliquer les techniques linéaires pour les systèmes non linéaires. La loi de commande globale, dans ce cas, est déterminée à partir de n lois de commandes calculées pour toutes les situations possibles du système, décrites par un ensemble de n modèles. Le premier modèle correspond au fonctionnement nominal du système. Les autres situations prennent en compte l'apparition d'un défaut particulier, entraînant le système en dehors de sa zone de fonctionnement nominal. La commande locale est alors calculée pour chacun des modes de fonctionnement du système et en utilisant un test de probabilité, il est possible de déterminer la loi de commande globale [JAM03].

IV.5.4 Commande à structure variable (modes glissants)

L'idée concernant l'utilisation de la commande par modes glissants provient du fait que cette dernière allège les problèmes engendrés par des variations paramétriques, des incertitudes de modélisation ou des dynamiques négligées. La commande par modes glissants a ainsi intégré un nombre important d'applications, telles que l'aérospatial, la robotique et différents problèmes de commande de procédés [JAM03]. Les raisons qui ont permis l'évolution et l'essor de cette commande résident dans ses performances considérables, aussi bien pour les systèmes linéaires que pour les systèmes non linéaires. Mais surtout à sa propriété de robustesse explicite vis-à-vis des perturbations et des incertitudes. La commande par modes glissants, telle qu'elle vient d'être décrite, rentre dans le cadre de l'approche passive de l'accommodation aux défauts. Cependant, des méthodes, utilisant cette commande dans le cadre de l'approche active, ont été proposées. Elles consistent à adapter le gain du régulateur par modes glissants afin de compenser l'effet des défauts, dès leur apparition.

IV.5.5 Intégration du processus de surveillance des défauts dans la procédure de Commande

Une autre approche de commande tolérante aux défauts consiste à intégrer le processus de surveillance des défauts dans la procédure de commande. Dans ce cas, les défauts possibles,

sont représentés par des signaux et estimés par le même algorithme qui calcule la loi de commande. Les défauts sont tout d'abord modélisés puis une commande insensible à ces derniers est conçue. Ainsi, l'opérateur peut être averti de la présence du défaut grâce aux processus de surveillance [NOU00].

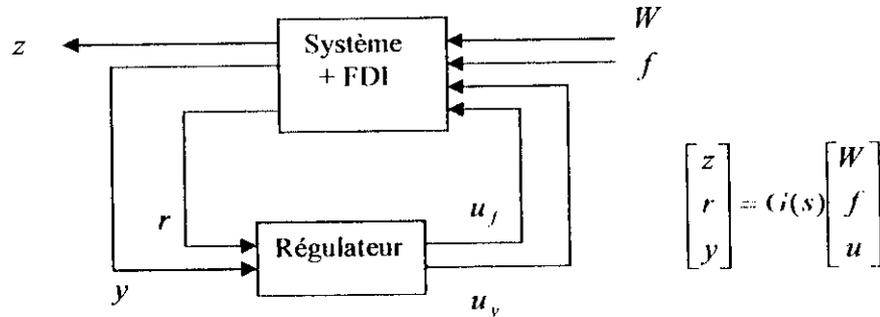


Figure IV.3 : Intégration du module de surveillance au processus de commande.

D'autres approches ont été proposées dans le cadre de la commande tolérante aux défauts, parmi lesquelles, l'utilisation de l'optimisation convexe ou encore la commande LQ où un choix adéquat des matrices de pondération permet d'atténuer l'effet des défauts sur le processus. Il est à noter aussi l'existence de méthodes basées sur des approches heuristiques [KME02], [NOU00].

IV.6 PROPOSITION D'UNE METHODE FTC

L'objectif du présent paragraphe consiste à proposer une méthodologie d'accommodation aux défauts en utilisant l'observateur défini dans le paragraphe (III.2.3.5) pour la détection et la localisation des défauts.

Soit le système dont le modèle nominal est défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{IV.5})$$

Où $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ et $y \in \mathbb{R}^p$ représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur de commande et le vecteur de sortie du système.

Différents types de défauts, additifs ou multiplicatifs, peuvent affecter le système. Ces derniers peuvent résulter aussi bien d'un dysfonctionnement ou du vieillissement du matériel.

Généralement, les défauts additifs représentent des pertes d'efficacité des actionneurs et des capteurs alors que les défauts multiplicatifs coïncident avec des défauts internes au système. Il est important de noter que dans la littérature du diagnostic des défauts, la distinction entre les défauts additifs et multiplicatifs s'avère parfois nécessaire alors que lorsqu'il s'agit de la commande tolérante aux défauts, le but consiste à compenser l'effet des défauts indépendamment de cette distinction.

L'apparition d'un défaut au niveau du système engendre une variation de son modèle nominal. Selon le contexte, diverses écritures du modèle défaillant peuvent être proposées. Par exemple, il est possible de traduire leur effet sous forme de variations des paramètres du modèle, et le système s'écrira:

$$\begin{cases} \dot{x}_f = A_f(x_f, u_f) \\ y_f = h_f(x_f) \end{cases} \quad (IV.6)$$

Où l'indice f désigne une variable défaillante. Et telles que :

$$A_f(x_f, u_f) = A(x, u) + \delta A(x, u) \quad (IV.7.a)$$

$$C_f(x_f) = C(x) + \delta C(x) \quad (IV.7.b)$$

$\delta A(x, u)$ et $\delta C(x)$ représentent les déviations des fonctions caractéristiques du système de leur valeur nominale. Cette représentation s'adapte plus au cas de défauts internes.

Une autre manière de représenter les défauts et qui est surtout utilisée pour les défauts du type actionneur ou capteur consiste à ajouter des termes additifs au modèle nominal :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) + E_f(x) f_a \\ y = h(x) + F_f(x) f_c \end{cases} \quad (IV.8)$$

Où E_f et F_f sont des distributions vectorielles représentant l'effet des défauts sur le système. Il faut noter que les deux représentations (IV.6) et (IV.8) sont équivalentes. Il est, en effet, possible de passer de l'une à l'autre sans aucune difficulté.

Supposons que E_f et F_f vérifient la propriété suivante: $e_i, f_i \neq 0$ lorsque $f_i \neq 0$, où e_i et f_i représentent respectivement la i^{eme} colonne de E_f ou F_f et le i^{eme} défaut [OUC04]. Alors le système (IV.8) peut être réécrit sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x, u) + F_a \\ y = h(x) + F_c \end{cases} \quad (IV.9)$$

L'étude qui suit prend en compte ces deux dernières représentations.

La structure de commande tolérante aux défauts, que nous proposons, est constituée d'un module de détection et d'isolation et d'un module d'estimation et de compensation des défauts. Celle-ci est illustrée sur la figure (IV.4).

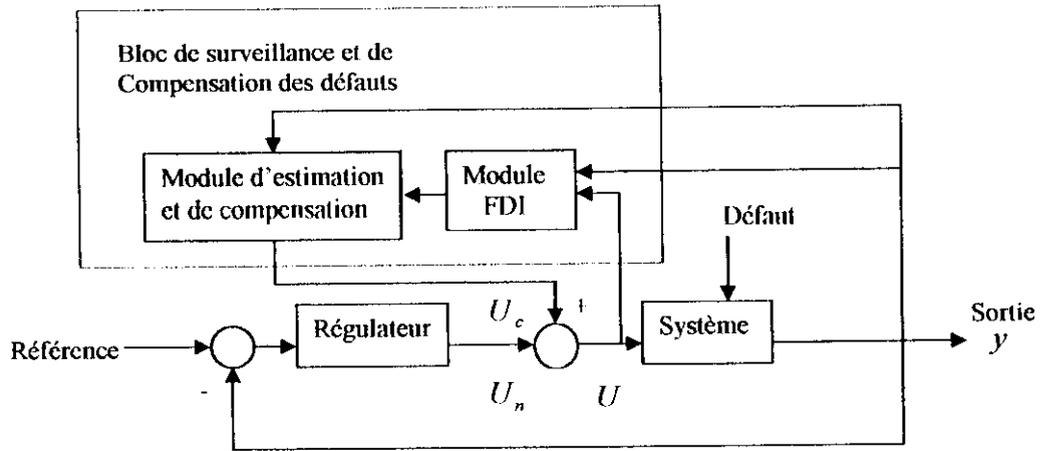


Figure IV.4 : Structure de la commande tolérante aux défauts proposée.

Dès qu'un défaut est détecté par le module FDI, son ampleur est estimée à l'aide du module d'estimation et aussitôt, une procédure de compensation est entamée afin de contrer son effet. Cependant cette compensation diffère selon qu'il s'agisse d'un défaut actionneur ou capteur. Nous traiterons seulement le cas des défauts actionneurs ou composants.

Soit un système défini par les équations (IV.9). Nous supposons que ce dernier est soumis à des défauts actionneurs ou composants seulement. Soit, alors la proposition :

Proposition IV.1

La procédure d'estimation des défauts s'effectue selon le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2x - NA(x, u) \\ \hat{F}_a = z + Nx \end{cases} \quad (IV.10)$$

N est une matrice définie positive et \hat{F}_a représente l'estimé du défaut.

La commande reconfigurable est donnée par :

$$u = \begin{cases} U_n & \text{Si aucun défaut n'est détecté} \\ U_n + U_c & \text{Si un défaut est détecté} \end{cases} \quad (IV.11)$$

Où U_n représente la commande nominale en absence de défauts et U_c un terme additif permettant la compensation du défaut. Ce dernier dépend de \hat{F}_a .

Pour illustrer la méthodologie d'accommodation aux défauts, nous proposons un exemple où les objectifs de commande sont des objectifs de poursuite. Soit alors y_d la sortie désirée.

Soit le modèle nominal défini par le système d'équations (IV.12) :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + g(x)u \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Supposons que ce système soit soumis à des défauts actionneurs ou composants. Le modèle défaillant est alors donné par :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + g(x)u + E_f f_a \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

Ou encore:

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + g(x)u + F_a \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

La conception de ce dispositif de commande tolérante passe essentiellement par deux étapes. Dans la première, nous synthétisons une loi de commande pour le modèle nominal permettant de réaliser les objectifs de poursuite. Dans la seconde, il s'agit de compenser l'effet des défauts qui arrivent sur le système, après détection et estimation de ces derniers.

➤ Etape 1 : Calcul de la loi de commande nominale

Soit l'erreur de poursuite :

$$e = y - y_d \quad (\text{IV.15})$$

La dynamique de cette erreur est donnée par:

$$\dot{e} = C(A(x) + g(x)u) - \dot{y}_d \quad (\text{IV.16})$$

Pour déterminer la commande nominale permettant de satisfaire les objectifs de poursuite, nous proposons de se référer à la théorie de Lyapunov. Soit la fonction de Lyapunov, définie positive, suivante :

$$V = \frac{1}{2} e^T e \quad \text{Alors : } \dot{V} = e^T \dot{e} = e^T (C(A(x) + g(x)u) - \dot{y}_d) \quad (\text{IV.17})$$

Pour un choix de la commande nominale donné par l'équation (IV.18), \dot{V} est définie négative.

$$u = U_n = (Cg(x))^{-1}[-CA(x) + \dot{y}_d - Ke] \quad (IV.18)$$

$Cg(x)$ étant inversible et K une matrice définie positive.

➤ **Etape 2 : Estimation et compensation du défaut**

Une fois le défaut détecté par le module FDI, les procédures d'estimation et de compensation sont entamées. La compensation doit, bien entendu, s'effectuer en un minimum de temps afin d'éviter des dégradations importantes des performances du système. La méthode de compensation en cours d'étude rentre dans le cadre de l'approche active, elle consiste à ajouter une commande additive à la commande nominale afin de contrer l'effet des défauts. Par conséquent, dans le but de déterminer la valeur de la commande additive, nous considérons le modèle défaillant du système précédent, défini par le système d'équations (IV.14) et de la même manière que précédemment, nous définissons la fonction de Lyapounov (IV.17). \dot{V} sera alors donnée par :

$$\dot{V} = e^T \dot{e} = e^T (C(A(x) + g(x)u + F_a) - \dot{y}_d) \quad (IV.19)$$

Les objectifs de poursuite sont réalisés pour une commande donnée par:

$$u = U = (Cg(x))^{-1}[-CA(x) - CF_a + \dot{y}_d - Ke] \quad (IV.20)$$

$Cg(x)$ étant inversible et K une matrice définie positive. Ainsi, la commande globale se met sous la forme :

$$u = U = U_n + U_c \quad (IV.21)$$

Où:

$$U_n = (Cg(x))^{-1}[-CA(x) + \dot{y}_d - Ke] \quad (IV.22)$$

Et

$$U_c = -(Cg(x))^{-1}[CF_a] \quad (IV.23)$$

U_n est la commande nominale et U_c représente le terme additif permettant la compensation de l'effet du défaut actionneur ou composant. Néanmoins, l'introduction de ce terme après apparition du défaut nécessite une estimation de ce dernier. Ceci peut être effectué à l'aide de l'observateur de défauts, défini dans le paragraphe (III.2.3.5) par le système d'équations:

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2x - N(A(x) + g(x)u) \\ \hat{F}_a = z + Nx \end{cases} \quad (IV.24)$$

Par conséquent, la commande additive sera donnée par :

$$U_c = -(Cg(x))^{-1} [C\hat{F}_a] \quad (IV.25)$$

Dans le cas où les états ne sont pas disponibles, nous proposons de les estimer à l'aide d'un observateur robuste aux défauts. Comme dans le cas du problème FDI, il est possible de choisir un observateur par modes glissants. L'estimateur de défauts sera alors donné par:

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2\hat{x} - N(A(\hat{x}) + g(\hat{x})u) \\ \hat{F}_a = z + N\hat{x} \end{cases} \quad (IV.26)$$

Et la commande additive:

$$U_c = -(Cg(\hat{x}))^{-1} [C\hat{F}_a] \quad (IV.27)$$

Où \hat{x} désigne l'état estimé.

IV.7 CONCLUSION

Ce chapitre a concerné la commande tolérante aux défauts. Après présentation des différentes approches et des méthodes existantes dans ce domaine, nous avons montré comment il est possible de compenser l'effet des défauts à l'aide de l'observateur de défauts, que nous avons introduit dans le chapitre (III). L'approche proposée rentre dans le cadre d'une approche active de commande tolérante aux défauts, basée sur un principe de commande additive. La structure de celle-ci étant composée de deux parties : un module de détection et d'isolation des défauts et un module d'estimation et de compensation de ces derniers.

CHAPITRE V

*DIAGNOSTIC DES DEFAUTS
DE LA MACHINE ASYNCHRONE
PAR LES METHODES A BASE
D'OBSERVATEURS*

V.1 INTRODUCTION

«La machine asynchrone est la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération, la moins coûteuse à sa fabrication..., c'est la machine de l'avenir ...». Ces propos sont amplement répandus dans la communauté électrotechnique. En effet, par sa simplicité de conception et d'entretien, la machine asynchrone a la faveur des industriels depuis son invention le siècle dernier. Cependant, cette simplicité s'accompagne d'une forte complexité physique liée aux interactions électromagnétiques existant entre le stator et le rotor. Ce qui a, en quelque sorte, limité son utilisation pendant longtemps.

Cependant, ces dernières années, la commande de la machine asynchrone a fait un grand bond grâce notamment au développement de l'électronique de puissance et des commandes automatiques [BAR03], [BUC01], [KAS00], [DEW00a], [DEW00b]. Désormais, les chercheurs dans ce domaine sont mobilisés afin de déterminer des méthodes de diagnostic des défauts de celle-ci car, en dépit de ces avantages, il n'est pas exclu que des défauts puissent apparaître aussi bien au niveau du stator qu'au niveau du rotor. Ceci peut engendrer des pertes de production considérables et des réparations très coûteuses. Ainsi diverses recherches ont été dédiées au diagnostic de la MAS [CAR99], [CHR99], [CRU99], [HAM95], [HEN99], [LAI.04], [MOR99], [RAZ03], [SCH99], [THO99].

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la détection et la localisation des défauts de la machine asynchrone. Il sera question, dans un premier temps, de présenter les différentes anomalies qui puissent apparaître au niveau de celle-ci ainsi que les méthodes proposées pour son diagnostic. Notre intérêt portera essentiellement sur les défauts engendrant des variations des résistances et inductances statoriques et rotoriques. Après modélisation de la machine en vue du diagnostic, nous allons tester les méthodes à base d'observateur par modes glissants. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'observateur d'Edwards, Spurgeon et Patton et l'observateur de défauts associé aux observateurs robustes que nous avons proposé dans le chapitre (III). La MAS présente une base idéale pour valider ces méthodes du moment qu'elle constitue un système multivariable, non linéaire et fortement couplé. Nous terminerons sur des remarques concernant le problème de diagnostic des défauts de la MAS par les méthodes à base de modèle ainsi qu'une comparaison entre les performances des deux observateurs précédemment cités.

V.2 DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les défauts typiques des machines asynchrones peuvent être regroupés comme suit [IIAM95], [CHA03], [RAZ03], [THO99]:

- Des défauts du stator ayant pour résultat l'ouverture ou le court circuit d'un ou plusieurs enroulements d'une phase statorique.
- Un raccordement anormal des enroulements du stator.

- Un défaut au niveau du rotor qui serait une rupture totale ou partielle d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écureuil ou une rupture d'une portion d'anneau.
- Un défaut de contact balai - bague dans le cas d'un rotor bobiné.
- Des irrégularités statiques et/ou dynamiques de l'espace vide entre stator et rotor (défauts d'excentricité).
- Un bobinage d'excitation du rotor court-circuité.
- Un axe coudé ou incliné (excentricité dynamique).
- Un défaut d'isolation électrique au niveau du bobinage du stator suite à un vieillissement prématuré dû au milieu de fonctionnement hostile ou non et à la façon dont est alimenté le moteur.
- Une dégradation par usure prématurée ou non des roulements à billes.

Des études ont permis d'effectuer une répartition des défauts de la MAS [RAZ03] :

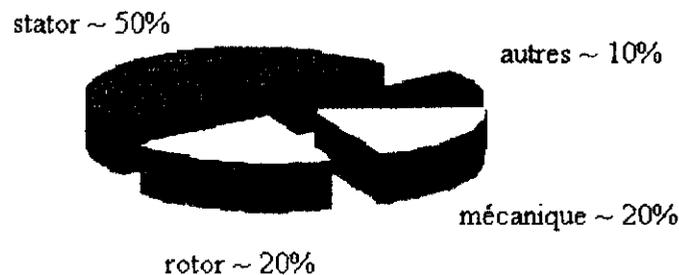


Figure V.1 : Répartition des défauts de la machine asynchrone.

V.3 METHODES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

L'intérêt grandissant porté à la détection des défauts de la machine asynchrone est dû essentiellement aux conséquences importantes causées par l'apparition d'une panne au niveau de celle-ci, qui, il faut le dire, a intégré de nombreuses applications industrielles. Il est donc primordial, non seulement de détecter l'apparition des défauts mais de les détecter de façon précoce afin d'y remédier dans les délais les plus brefs pour minimiser les dégâts. A cet effet, différentes méthodes de diagnostic de la MAS ont été proposées. Il est possible de les classer en deux catégories, comme illustré sur la figure (V.2) [HAM95].

V.3.1 Les méthodes de tests

Les méthodes de tests utilisent des grandeurs caractéristiques de la MAS (les courants, la puissance et la vitesse). Bien qu'elles soient simples, elles présentent des inconvénients :

elles sont imprécises et en général, elles ne permettent pas la localisation des défauts, puisque différents défauts peuvent influencer les mêmes grandeurs, de la même manière [HAM95].

V.3.2 Les méthodes modernes

Les méthodes modernes apportent des solutions nouvelles au diagnostic des défauts de la MAS et répondent aux limitations des méthodes de tests. Elles sont basées sur un traitement mathématique puissant qui met en valeur une information sensible aux défauts. Le développement des méthodes modernes s'accroît en raison des progrès en microélectronique ainsi qu'au développement des méthodes faisant appel aux outils mathématiques et de traitement du signal. Ces méthodes se subdivisent en deux classes :

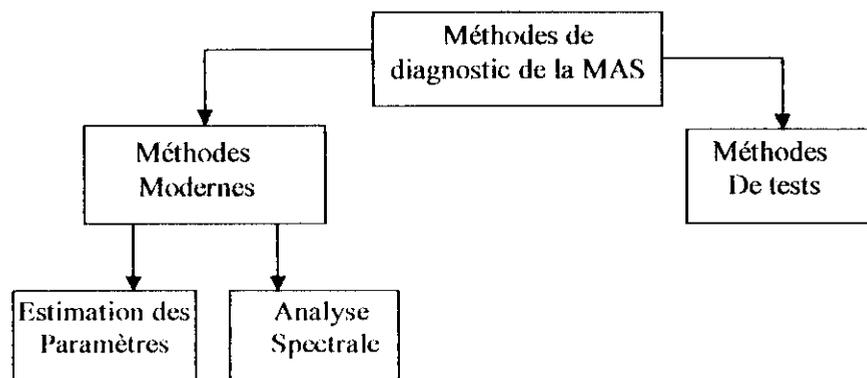


Figure V.2: Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone.

V.3.2.1 Les méthodes d'estimation des paramètres

Elles utilisent les variations des paramètres du modèle de la MAS pour détecter la présence d'un défaut [CHR99], [MOR99] car certains défauts peuvent être traduits sous forme de variations paramétriques. Par exemple : la rupture d'une barre dans la cage du rotor peut être traduite par une augmentation de la résistance rotorique. Cependant, un inconvénient majeur de cette méthode consiste en le fait qu'elle ne s'applique pas à tous les défauts puisque certaines anomalies ne peuvent être représentées sous forme de changements quantitatifs des paramètres. Ainsi, il n'est pas possible de détecter par exemple les défauts d'excentricité du rotor. Pour ce dernier cas, les méthodes d'analyse spectrale sont plus appropriées. Les méthodes FDI à base d'observateurs rentrent dans la catégorie des méthodes d'estimation des paramètres [HEN99], [LAI04].

V.3.2.2 Les méthodes d'analyse spectrale

L'analyse spectrale des grandeurs caractéristiques de la MAS, tel que le courant statorique permet de détecter la présence d'un nombre important de défauts. En effet, des études ont montré que chaque défaut fait apparaître des harmoniques à des fréquences spécifiques. Il est ainsi possible de détecter la présence de spires en court circuit, d'excentricité du rotor, la rupture d'anneau de la cage rotorique...etc [CRU99], [HAM95], [RAZ03].

V.4 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN VUE DE SON DIAGNOSTIC

Le diagnostic des défauts de la MAS par les méthodes à base de modèle, et plus particulièrement les méthodes à base d'observateurs, nécessite une modélisation adéquate de celle-ci où il sera mis en évidence les défauts que l'on désire détecter et éventuellement les entrées inconnues. Le modèle de la machine saine peut être consulté en annexe (C.2).

Dans cette étude, nous nous intéressons à la détection et la localisation des défauts se traduisant par des variations des grandeurs statoriques et rotoriques de la MAS, en supposant que la détection doit se faire indépendamment des variations du couple résistant, des frottements et de l'inertie. Ces dernières sont donc considérées comme étant des perturbations. Par conséquent, le vecteur défaut est représenté par les variations des grandeurs statoriques et rotoriques autour de leurs valeurs nominales, à savoir :

$$f = \begin{bmatrix} \Delta R_s \\ \Delta L_s \\ \Delta R_r \\ \Delta L_r \end{bmatrix} \text{ Tel que : } \begin{cases} \Delta R_s = R_s - R_{s0} \\ \Delta L_s = L_s - L_{s0} \\ \Delta R_r = R_r - R_{r0} \\ \Delta L_r = L_r - L_{r0} \end{cases} \quad (\text{V.1})$$

R_{s0} , L_{s0} , R_{r0} et L_{r0} étant respectivement les valeurs nominales de la résistance statorique de l'inductance statorique, de la résistance rotorique et de l'inductance rotorique.

Les perturbations sont représentées par les variations du couple résistant, des frottements et de l'inertie autour de leurs valeurs nominales données respectivement par C_{r0} , K_{f0} et j_0 :

$$d = \begin{bmatrix} \Delta C_r \\ \Delta K_f \\ \Delta j \end{bmatrix}, \text{ tel que } \begin{cases} \Delta C_r = C_r - C_{r0} \\ \Delta K_f = K_f - K_{f0} \\ \Delta j = j - j_0 \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

Le modèle défaillant de la machine se met sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \dot{X} = A(X,U) + E_d(X)d + E_f(X)f \\ Y = CX \end{cases} \quad (V.3)$$

Où $E_d(X)$ et $E_f(X)$ sont des distributions vectorielles déterminées en effectuant un développement de Taylor de $A(X,U)$ autour des valeurs nominales des paramètres considérés, telles que:

$$E_d(X) = \left. \frac{\partial A(X,U)}{\partial d} \right|_{C_{r0}, K_{f0}, J_0} \quad \text{et} \quad E_f(X) = \left. \frac{\partial A(X,U)}{\partial f} \right|_{R_{r0}, L_{r0}, R_{s0}, L_{s0}} \quad (V.4)$$

Les valeurs de ces distributions peuvent être consultées en annexe (C.3).

V.5 APPLICATION DES METHODES À BASE D'OBSERVATEURS PAR MODES GLISSANTS POUR LA DETECTION ET LA LOCALISATION DES DEFAUTS DE LA MAS

Nous proposons d'appliquer les observateurs par modes glissants, présentés au niveau du chapitre (III), pour la détection et la localisation des défauts se traduisant par des variations des grandeurs statoriques et rotoriques de la MAS. Ceci nous permettra éventuellement de vérifier la validité de ces approches et d'étudier leurs performances. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'observateur d'Edwards, Spurgeon et Patton ainsi que l'observateur de défauts associé à l'observateur par modes glissants que nous avons proposé.

V.5.1 Observateur d'Edwards, Spurgeon et Patton

Nous proposons dans ce paragraphe d'appliquer la méthode proposée par Edwards, Spurgeon et Patton, présentée dans le paragraphe (III.2.3.2). La procédure de synthèse de l'observateur par modes glissants, utilisé pour la détection et la reconstruction des défauts, est explicitée dans le paragraphe (III.2.3.2). Néanmoins, nous adapterons la méthode de façon à pouvoir non seulement détecter et reconstruire les défauts mais aussi isoler ces derniers et découpler le système FDI de l'effet des perturbations.

La première étape consiste à linéariser le système autour d'un point de fonctionnement. La linéarisation du modèle de la MAS dans le repère (d, q) peut être consultée en annexe (C.4). Le modèle linéaire obtenu se met alors sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + E_d d + E_f f \\ y = Cx \end{cases} \quad (V.5)$$

Nous considérons dans ce paragraphe que le vecteur de sortie y est donné par les courants statoriques.

Les conditions C_1 et C_2 , données dans le paragraphe (III.2.3.2), étant vérifiées, la procédure consiste tout d'abord à effectuer une transformation de l'état $x \rightarrow Tx$ permettant d'écrire le modèle de MAS sous la forme:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + E_{f2}f_a \\ y = x_2 \end{cases} \quad (\text{V.6})$$

Nous proposons d'exploiter cette transformation pour réaliser les objectifs de découplage et d'isolation. Pour le premier point, il suffit que la matrice de transformation vérifie la condition:

$$TE_d = 0 \quad (\text{V.7})$$

Alors que pour l'isolation, nous proposons de synthétiser deux observateurs. L'un dédié à la détection et la reconstruction des variations statoriques et l'autre des variations rotoriques. L'idée consiste alors à trouver deux transformations T_1 et T_2 de l'état de sorte à:

- Découpler les états issus de la première transformation T_1 de l'effet des variations rotoriques, ce qui se traduit par la vérification de la condition (V.8):

$$T_1 E_{f2}^2 = 0 \quad (\text{V.8})$$

Où E_{f2}^2 représente l'effet des défauts rotoriques sur le système.

- Découpler les états issus de la deuxième transformation T_2 de l'effet des variations statoriques, ce qui se traduit par la vérification de la condition (V.9):

$$T_2 E_{f2}^1 = 0 \quad (\text{V.9})$$

Où E_{f2}^1 représente l'effet des défauts statoriques sur le système.

Une fois les deux transformations calculées, nous synthétisons un observateur par modes glissants donné par les équations (III.25) pour chaque cas. Ainsi les défauts peuvent être reconstruits à l'aide de:

$$f_a(t) \approx -\rho \left\| E_{f2} \right\| \left\| (E_{f2}^T E_{f2})^{-1} E_{f2}^T \frac{P_0 e_y}{\left\| P_0 e_y \right\| + \delta} \right. \quad (\text{V.10})$$

δ est un petit scalaire positif.

Pour les différentes simulations, nous avons supposé que les résistances statorique et rotorique varient selon une certaine allure, telle que représentée sur les figures (V.4) et (V.5). La figure (V.3) illustre le cas de l'apparition d'une perturbation. Alors que les figures (V.4) et (V.5) représentent le comportement des résidus ainsi que la procédure de reconstruction des défauts, dans le cas de l'apparition d'un défaut se traduisant par des variations des résistances statorique et rotorique respectivement. Ces défauts apparaissent à l'instant $t = 0.5$ sec.

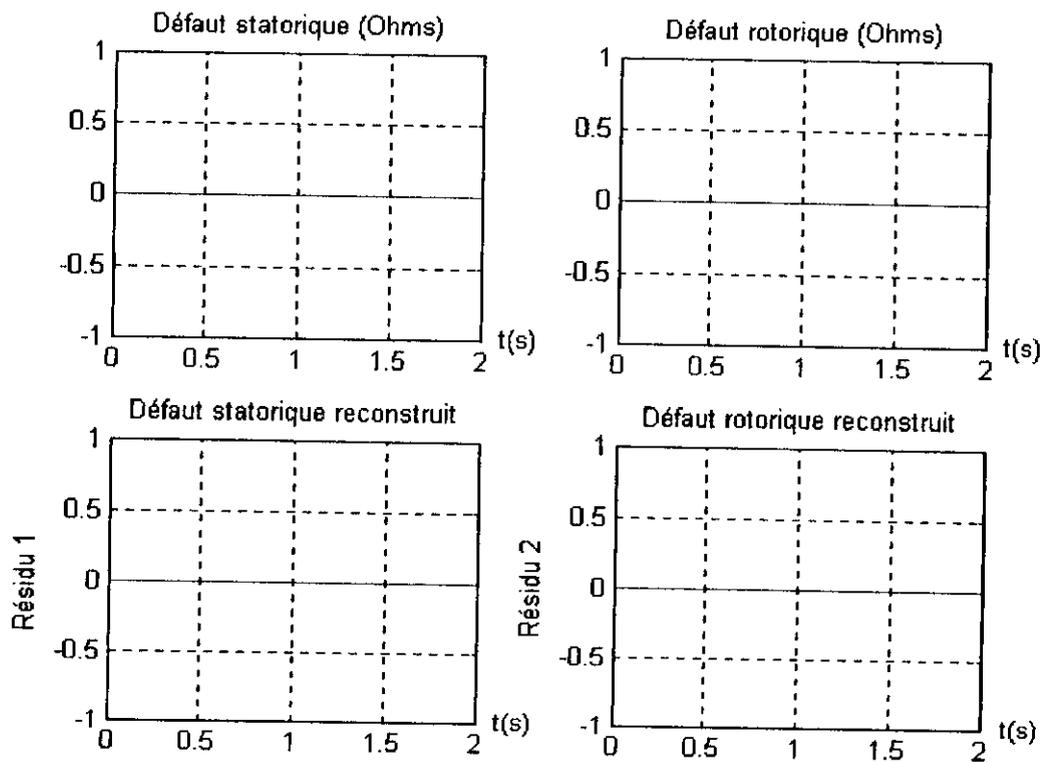


Figure V.3 : Représentation des résidus : Apparition d'une perturbation.

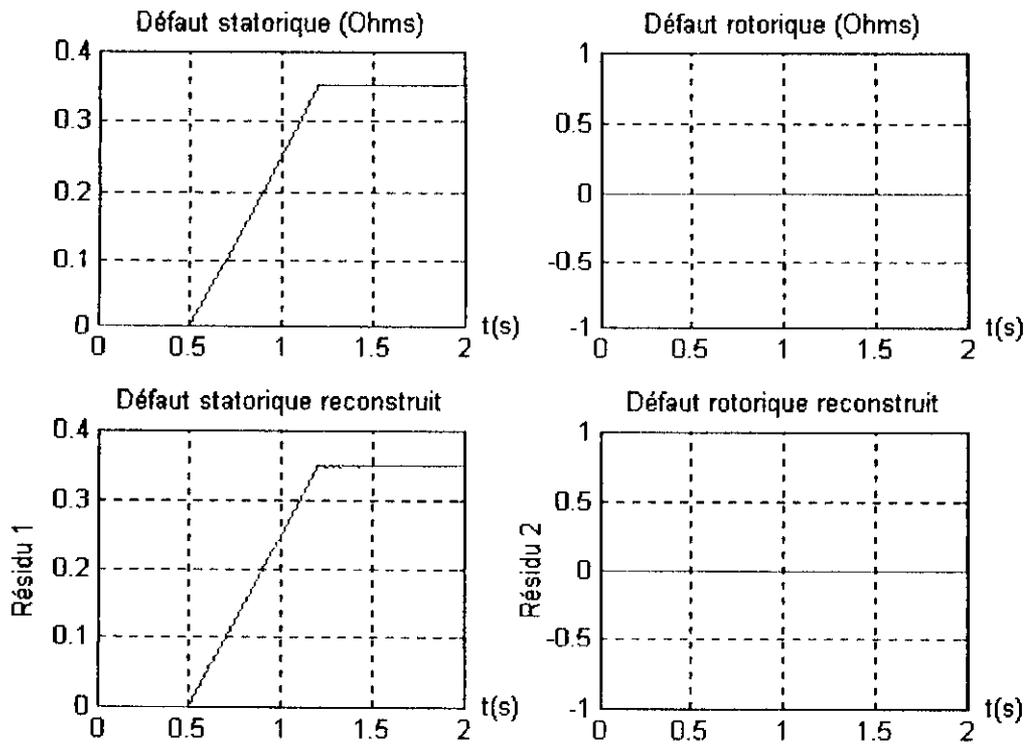


Figure V.4 : Détection et reconstruction des défauts : Variation de la résistance statorique.

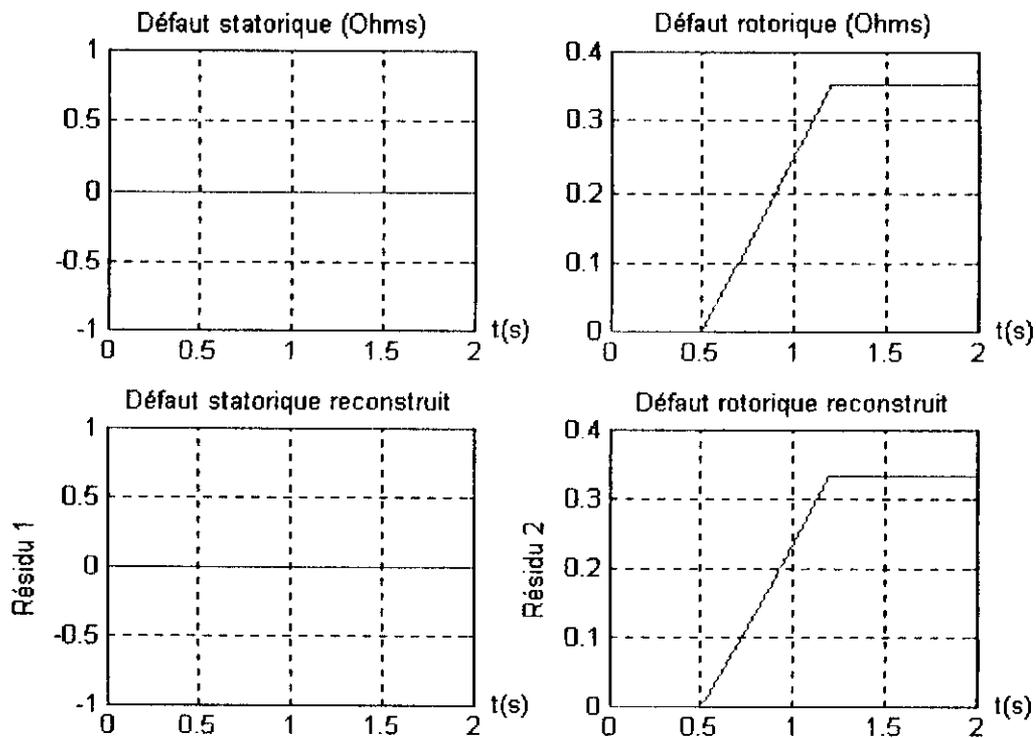


Figure V.5: Détection et reconstruction des défauts : Variation de la résistance rotorique.

- ❖ Nous constatons à travers les figures précédentes que la méthode appliquée permet une détection et une reconstruction des défauts. En étudiant les propriétés de sensibilité, de robustesse et d'isolabilité du système de diagnostic, constitué du banc d'observateurs synthétisés, nous remarquons que ce dernier est performant. En effet, en absence de défauts, les résidus sont nuls. Lorsqu'un défaut engendrant des variations de la résistance statorique apparaît, le premier résidu s'écarte de zéro et en plus, il reconstruit l'allure de la variation alors que le deuxième résidu demeure nul. Lorsqu'un défaut rotorique apparaît, l'inverse se produit, à savoir, le premier résidu demeure insensible à ce changement alors que le deuxième observateur reconstruit le défaut apparu. Il est donc possible de différencier entre les défauts statoriques et rotoriques. Lorsqu'une perturbation du type variation du couple résistant, de l'inertie ou des frottements apparaît, les résidus demeurent nuls, ils sont donc robustes vis à vis de celle-ci. Néanmoins, il est important de signaler que la reconstruction des défauts dépend fortement de la valeur de $\rho(t, y, u)$. Un choix adéquat de celle-ci est nécessaire pour une bonne estimation des défauts.

V.5.2 Observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants

V.5.2.1 Structure de l'observateur de défauts

L'observateur de défauts, tel que proposé dans le paragraphe (III.2.3.5), est donné par :

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2TX - NTA(X, U) \\ \hat{r} = z + NTX \end{cases} \quad (\text{V.11})$$

z étant la variable d'état définissant le générateur de résidu. \hat{r} représente l'estimé du vecteur résidu. N est une matrice définie positive déterminant la convergence du résidu vers sa vraie valeur. T est la matrice de découplage, elle est déterminée de manière à satisfaire la condition de découplage :

$$TE_d(X) = 0 \quad (\text{V.12})$$

Dans le cas de la machine asynchrone, la matrice T vérifiant la condition de découplage se calcule aisément. En effet, nous constatons qu'il suffit de prendre la dernière colonne de celle-ci nulle pour que la condition (V.12) soit vérifiée. Il est alors possible d'exploiter les autres colonnes de la matrice afin d'assurer la distinction entre les défauts statoriques et rotoriques.

Cependant, les flux rotoriques n'étant pas disponibles, il est nécessaire afin de pouvoir appliquer cette méthode, de disposer d'une très bonne estimation de ces derniers. Comme il a été déjà mentionné dans le paragraphe (III.2.3.5), l'utilisation d'observateurs par modes glissants robustes vis-à-vis des défauts et des perturbations, constitue une solution appropriée

pour la résolution de ce problème. Il est question donc de synthétiser un observateur par modes glissants robuste vis-à-vis des variations des différents paramètres et permettant l'estimation des flux rotoriques.

Après conception et étude de différents observateurs par modes glissants appliqués à la MAS [DEW00b], [FLO02], [KER99], notre choix a porté sur l'observateur par modes glissants avec capteur de vitesse [DEW00b], dont les détails de synthèse peuvent être consultés en annexe (C.5).

V.5.2.2 Synthèse d'un observateur par modes glissants avec capteur de vitesse pour la MAS

L'observateur par modes glissants proposé pour l'estimation des flux de la MAS est défini par les équations suivantes (Annexe (C.5)):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\gamma x_1 + a\hat{x}_3 + Kp\hat{x}_4 x_5 + eV_1 + \lambda_1^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\gamma x_2 + a\hat{x}_4 - Kp\hat{x}_3 x_5 + eV_2 + \lambda_2^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_3 = bx_1 - c\hat{x}_3 - p\hat{x}_4 x_5 + \lambda_3^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_4 = bx_2 - c\hat{x}_4 + p\hat{x}_3 x_5 + \lambda_4^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_5 = d(\hat{x}_3 x_2 - x_1 \hat{x}_4) - \frac{C_r}{j} - \frac{K_f}{j} x_5 + q_1(x_5 - \hat{x}_5) + \lambda_5^T I_s \end{cases} \quad (\text{V.13})$$

Où

$$I_s = [\text{sign}(S_1) \quad \text{sign}(S_2)]^T \quad \text{et} \quad \begin{cases} S_1 = x_1 - \hat{x}_1 \\ S_2 = x_2 - \hat{x}_2 \end{cases} \quad (\text{V.14})$$

Tels que S_1 et S_2 représentent les surfaces de glissement. Les gains : q_1 ; λ_1^T , λ_2^T , λ_3^T , λ_4^T et λ_5^T sont calculés de manière à assurer la convergence asymptotique des erreurs d'observation.

Ils sont donnés par:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \lambda_1^T \\ \lambda_2^T \end{bmatrix} &= Q^{-1} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{(a^2 + (Kpx_5)^2)} \begin{bmatrix} a & -Kpx_5 \\ Kpx_5 & a \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \lambda_3^T \\ \lambda_4^T \end{bmatrix} &= \left[\begin{pmatrix} -c & -px_5 \\ px_5 & -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_3 & 0 \\ 0 & q_4 \end{pmatrix} \right] \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \\ \lambda_5^T &= [\lambda_{51} \quad \lambda_{52}]^T, \quad \begin{bmatrix} \lambda_{51} & \lambda_{52} \\ \delta_1 & \delta_2 \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} x_2 & -x_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{V.15})$$

Tels que :

$$\delta_1 \geq \|e_3\|_{\max}, \quad \delta_2 \geq \|e_4\|_{\max}, \quad q_1 > 0, \quad q_3 > 0, \quad q_4 > 0 \quad (\text{V.16})$$

Le générateur de résidus est donc donné par les équations (V.17):

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz - N^2T\hat{X} - NTA(\hat{X}, U) \\ \hat{r} = z + NT\hat{X} \end{cases} \quad (V.17)$$

Afin de tester les performances de la méthode proposée, nous avons effectué des simulations sur MATLAB dont les résultats sont représentés sur les figures (V.6)-(V.17). Les défauts considérés sont des biais de 50% des valeurs nominales des résistances.

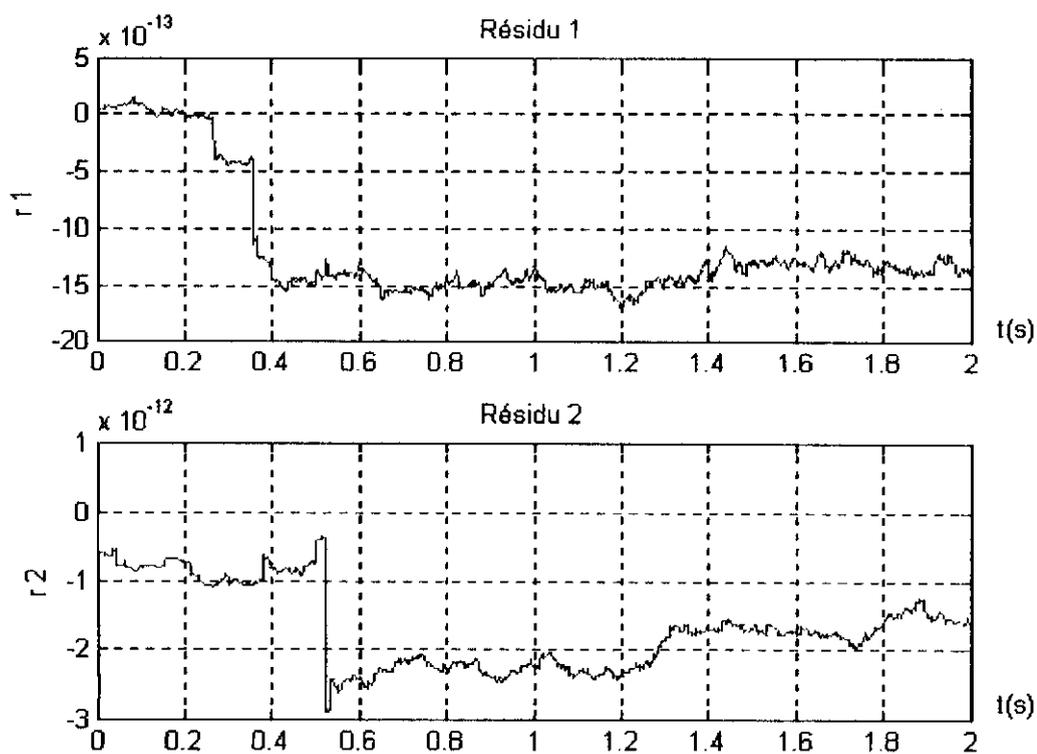


Figure V.6: 1^{er} et 2^{ème} résidus: Absence de défauts et de perturbations.

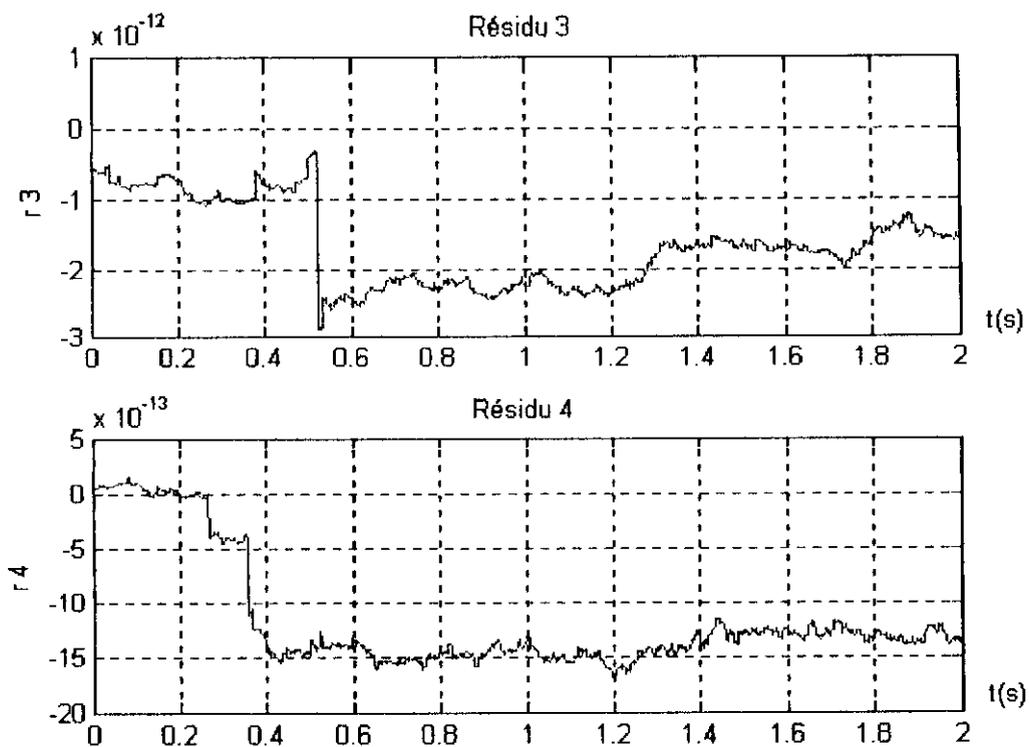


Figure V.7: 3^{ème} et 4^{ème} résidus: Absence de défauts et de perturbations.

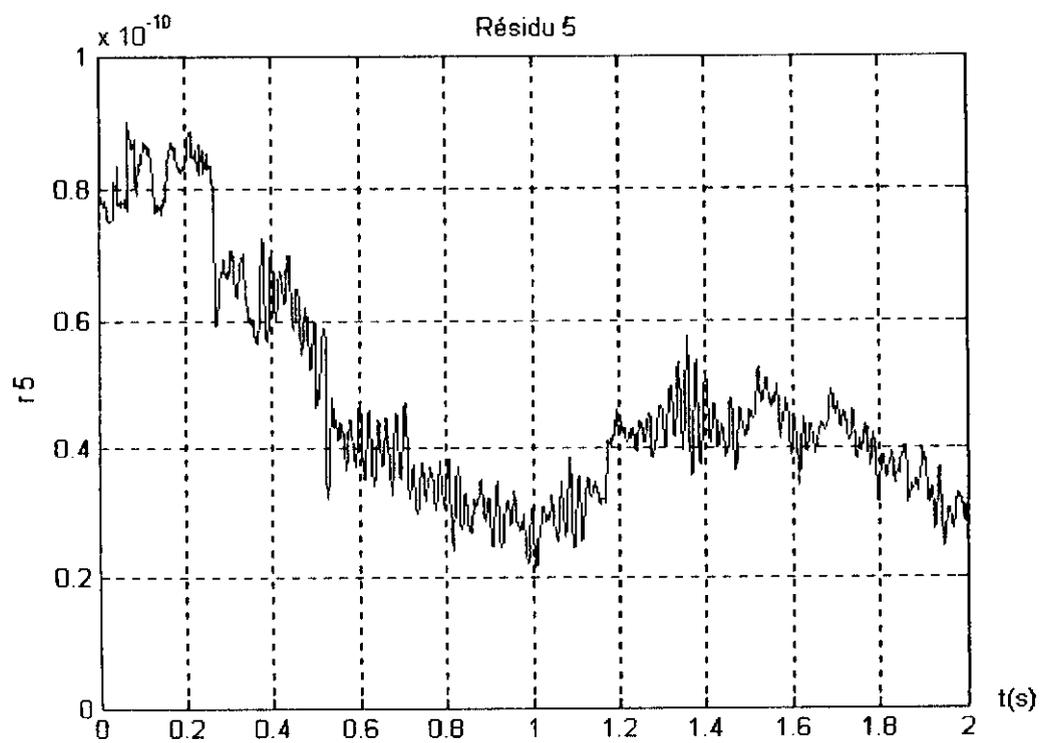


Figure V.8: 5^{ème} résidu: Absence de défauts et de perturbations.

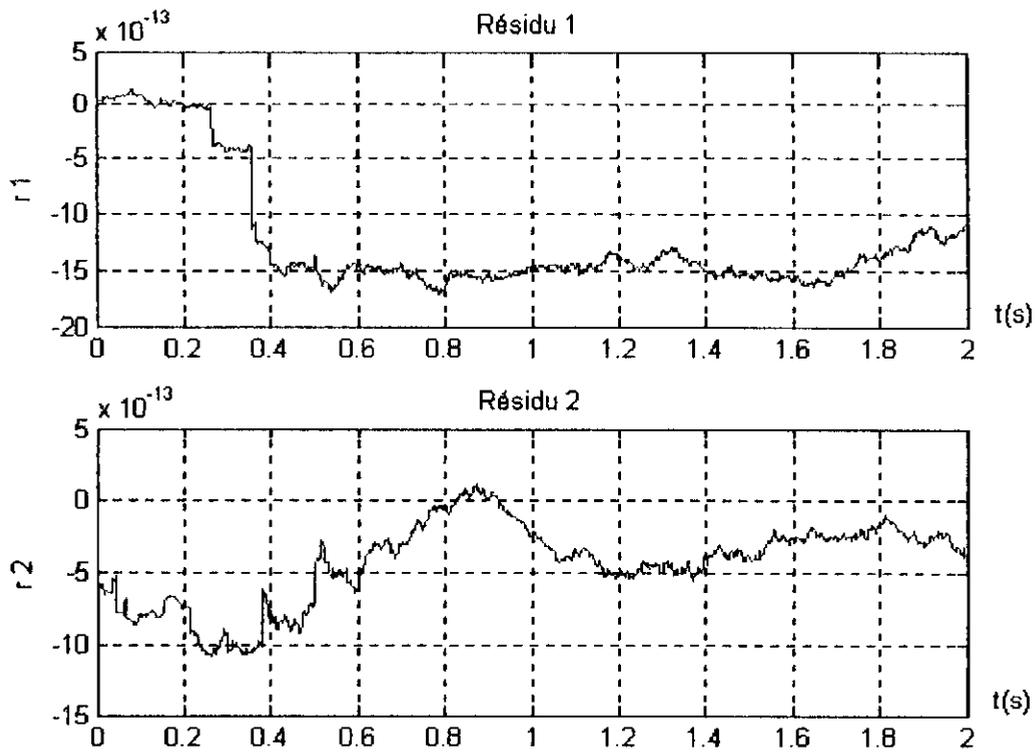


Figure V.9: 1^{er} et 2^{ème} résidus: Apparition d'une perturbation à $t=0.5$ sec.

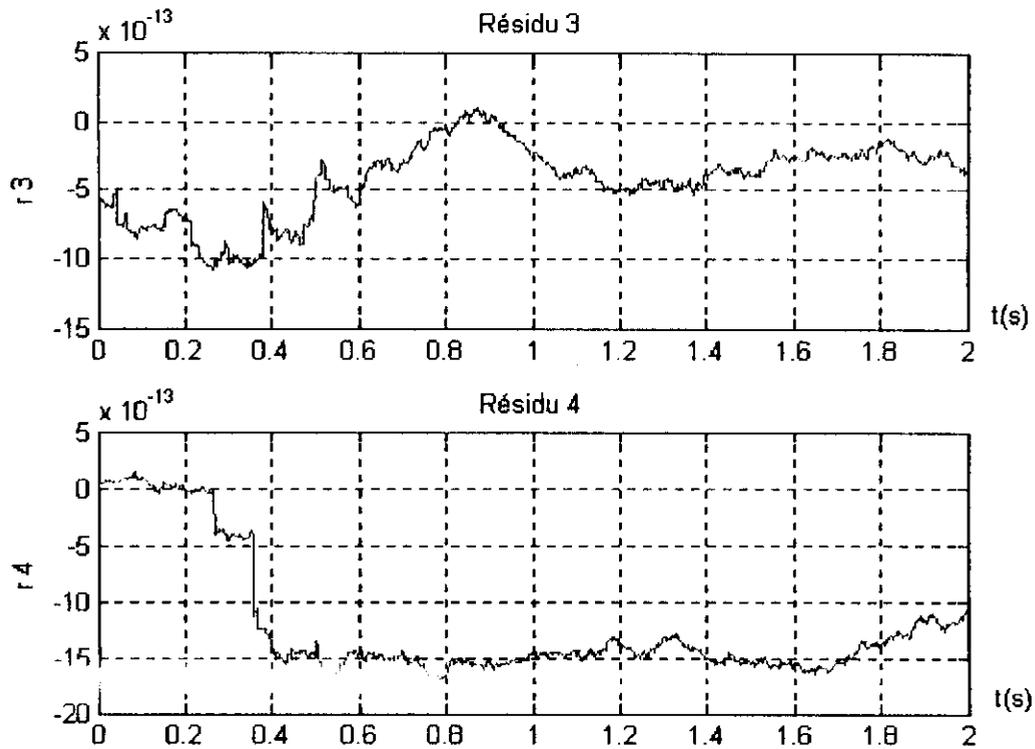


Figure V.10: 3^{ème} et 4^{ème} résidus: Apparition d'une perturbation à $t=0.5$ sec.

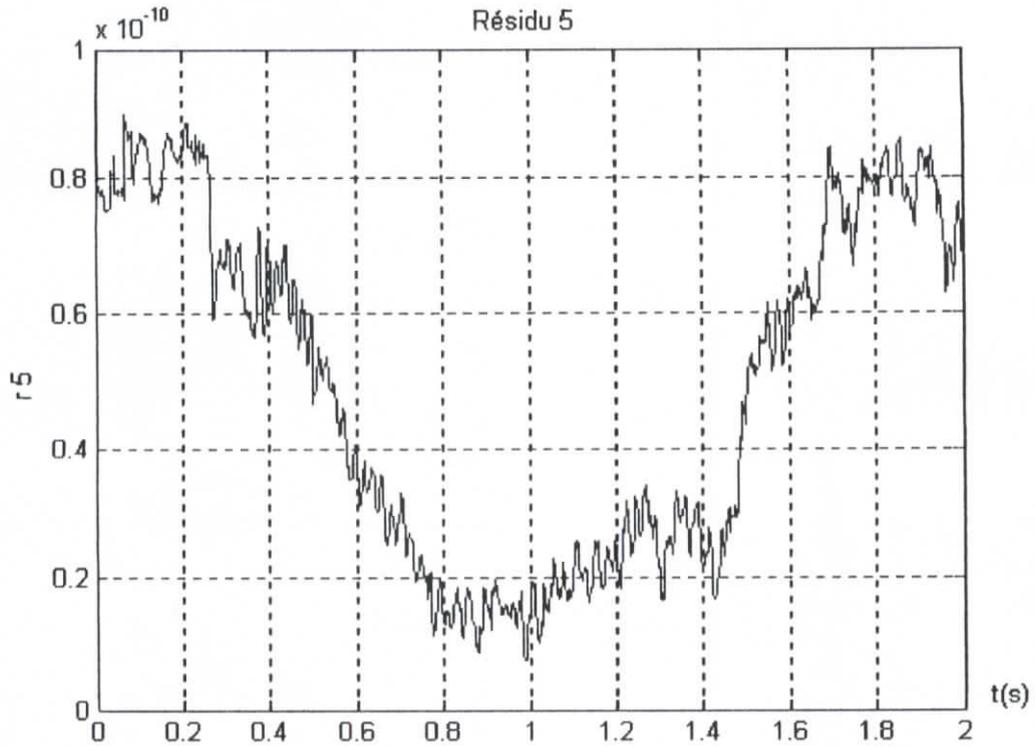


Figure V.11: 5^{ème} résidu: Apparition d'une perturbation à $t = 0.5$ sec.

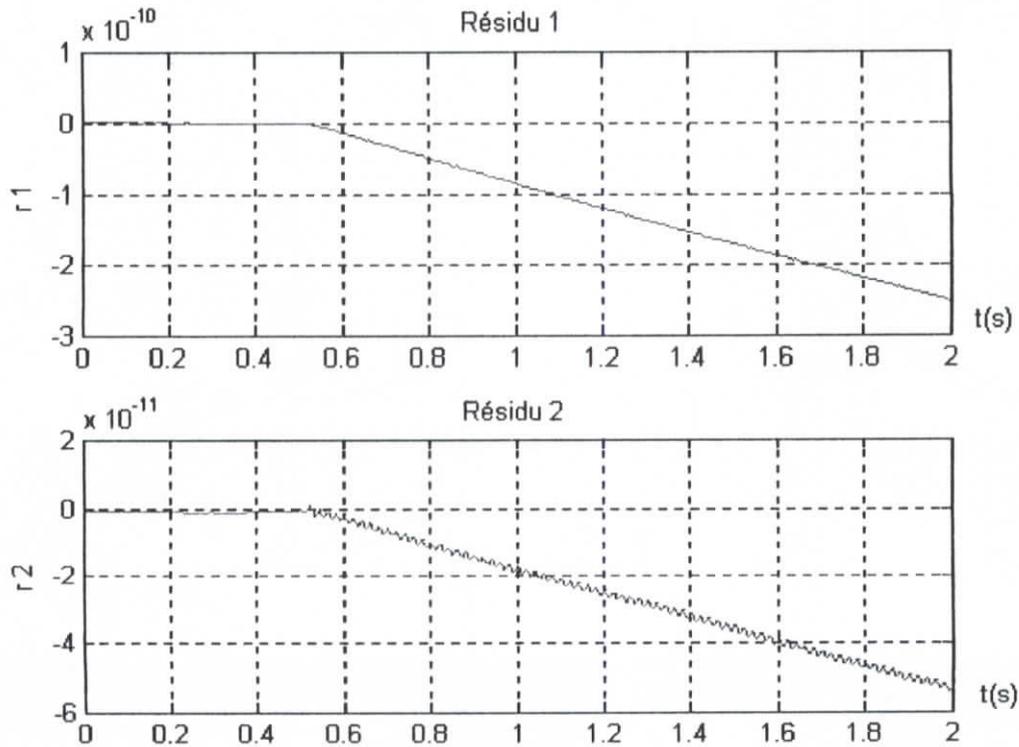


Figure V.12: 1^{er} et 2^{ème} résidus: Apparition d'un défaut statorique à $t = 0.5$ sec.

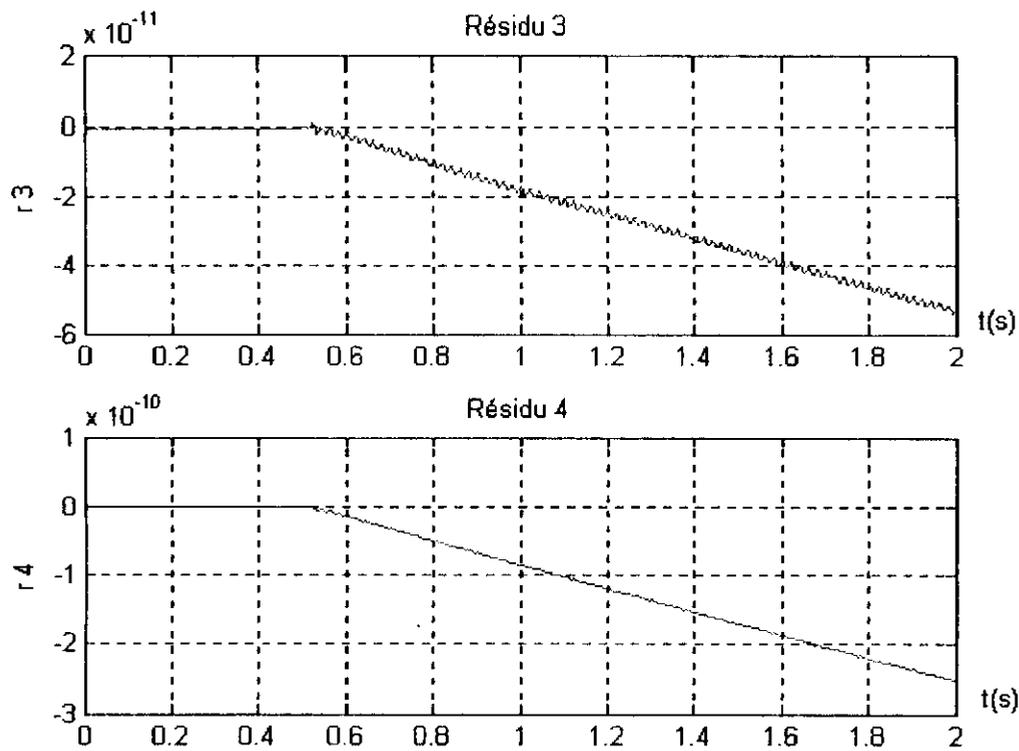


Figure V.13: 3^{ème} et 4^{ème} résidus: Apparition d'un défaut statorique à $t = 0.5$ sec.

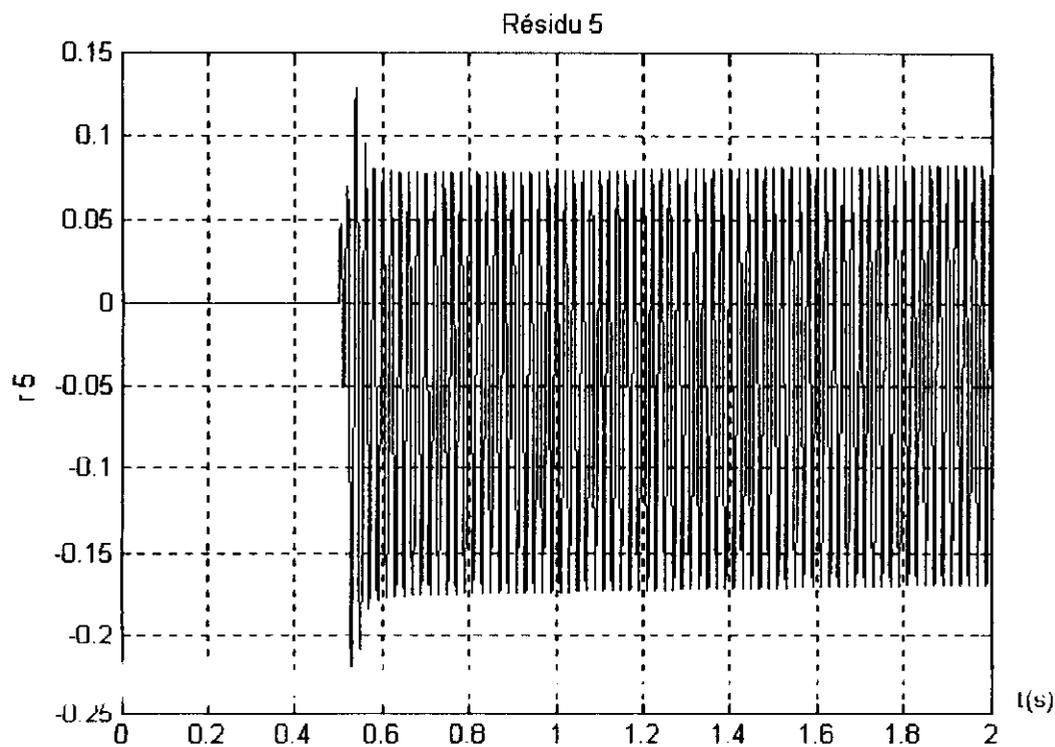


Figure V.14: 5^{ème} résidu: Apparition d'un défaut statorique à $t = 0.5$ sec.

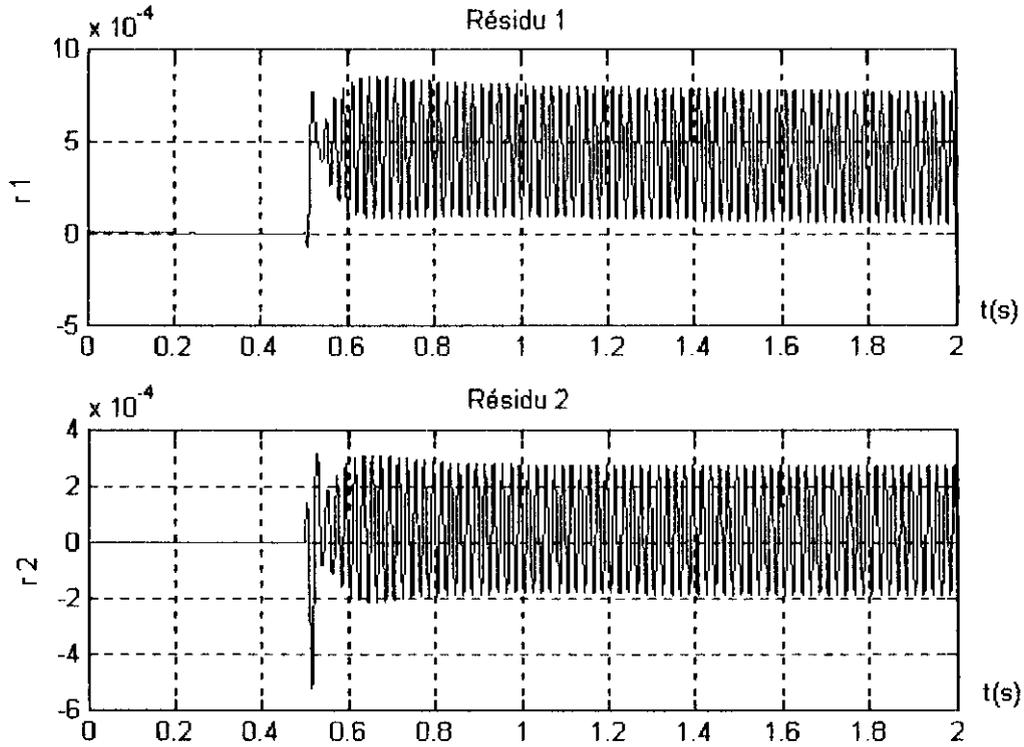


Figure V.15: 1^{er} et 2^{eme} résidus: Apparition d'un défaut rotorique à $t = 0.5$ sec.

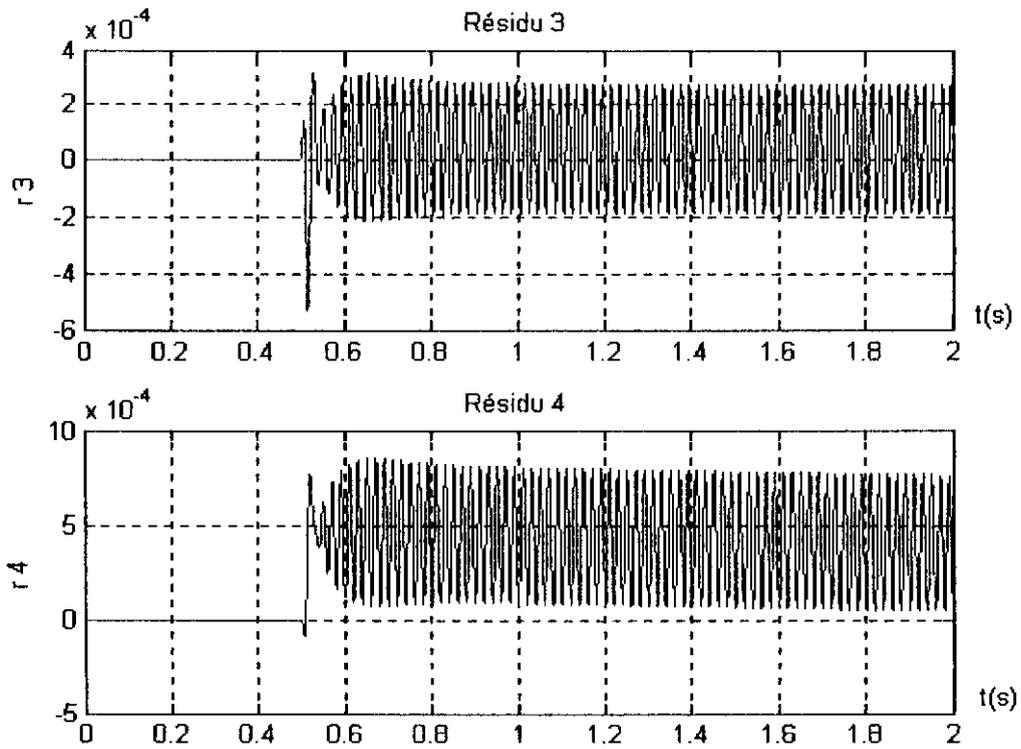


Figure V.16: 3^{eme} et 4^{eme} résidus: Apparition d'un défaut rotorique à $t = 0.5$ sec.

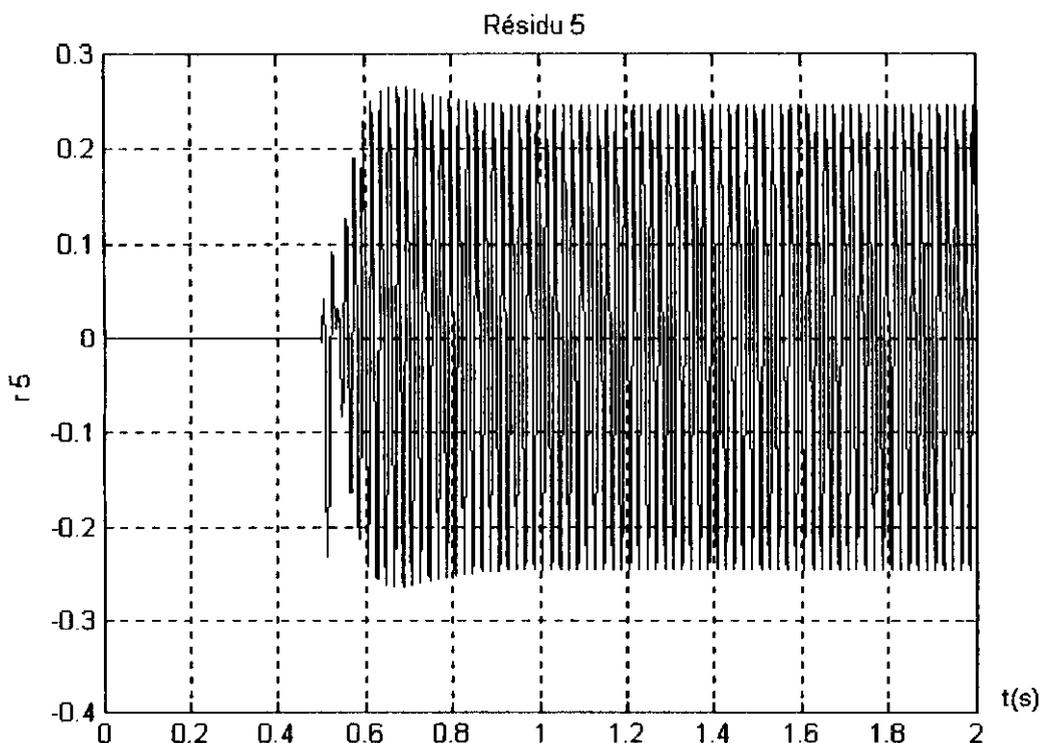


Figure V.17: 5^{ème} résidu: Apparition d'un défaut rotorique à t = 0.5 sec.

- ❖ A travers les figures (V.6), (V.7) et (V.8), nous constatons que les résidus sont nuls en absence de défauts et de perturbations. Alors que les figures (V.9), (V.10) et (V.11) illustrent la propriété de robustesse de ces derniers. En effet, nous remarquons que l'application d'une perturbation n'affecte pas les résidus, qui demeurent nuls tant qu'une variation statorique ou rotorique n'apparaît pas.
- ❖ Les figures (V.12), (V.13) et (V.14) représentent le comportement des résidus lorsqu'un défaut engendrant des variations des grandeurs statoriques apparaît à t=0.5 sec. Nous constatons que seul le cinquième résidu est sensible à celui-ci. Les quatre premiers demeurent, en effet, sensiblement nuls.
- ❖ Les figures (V.15), (V.16) et (V.17), quant à elles, illustrent le comportement des résidus suite à l'apparition d'un défaut engendrant des variations des grandeurs rotoriques à l'instant t=0.5 sec. Nous remarquons que tous les résidus s'écartent notablement de zéro.
- ❖ Ainsi, nous concluons que le choix de la matrice de découplage T , permet non seulement la génération de résidus robustes vis-à-vis des perturbations mais aussi la distinction entre les défauts statoriques et rotoriques. Ceci apparaît clairement dans la table de signatures suivante :

Défauts Residus	Variations des grandeurs statoriques	Variations des grandeurs rotoriques	Perturbations d
r_1	0	1	0
r_2	0	1	0
r_3	0	1	0
r_4	0	1	0
r_5	1	1	0

1 désigne la sensibilité et 0 l'insensibilité du résidu vis-à-vis de la variation considérée.

Tableau V.1 : Table de signatures correspondant au problème FDI de la MAS, utilisant l'observateur de défauts, associé à l'observateur par modes glissants.

- ❖ Il est important de noter que la méthode proposée, bien qu'elle s'avère intéressante pour la détection et la localisation des défauts statoriques et rotoriques de la MAS, indépendamment des variations des autres paramètres, présente un inconvénient majeur résidant dans la non prise en compte des variations normales des résistances statorique et rotorique. En effet, les résistances subissent des variations dites normales, ce qui engendre des variations au niveau des résidus menant ainsi à des détections erronées et de fausses alarmes. La distinction entre les variations des résistances dues à un défaut et les variations normales de celles-ci, nécessite une étude plus approfondie des résidus générés, dans le domaine fréquentiel ou même dans le domaine temporel.

V.5.3 Comparaison entre les deux approches

Les deux approches proposées, dans ce chapitre, pour la détection et la localisation des défauts de la MAS, reposent sur un même principe. Il s'agit d'estimer les états à l'aide d'un observateur par modes glissants, robuste vis-à-vis des défauts et des perturbations et de sorte que le régime de glissement soit maintenu en leur présence. Cependant la première méthode propose le découplage des états de l'effet des perturbations et utilise la surface de glissement équivalente pendant le régime de glissement, pour générer les résidus et reconstruire les défauts. Alors que la seconde utilise un observateur de défauts pour la génération de résidus robustes.

Nous avons constaté, à travers les différentes simulations effectuées, que les deux approches ont donné de bons résultats. La première nous a permis de détecter et de reconstruire l'allure des variations des résistances statorique et rotorique et en plus la stratégie utilisée, a même permis de distinguer entre les deux. Néanmoins cette approche nécessite une linéarisation du modèle de la MAS autour d'un point de fonctionnement. Il faut signaler également que la reconstruction des défauts dépend fortement de la surface de glissement choisie.

La seconde approche, quant à elle, s'avère plus efficace pour la génération des résidus, car elle s'applique directement sur le modèle non linéaire de la MAS. Ainsi, du fait de la structure de la distribution reliant les entrées inconnues aux états, la matrice de découplage a non seulement permis de découpler les résidus des entrées inconnues mais aussi de distinguer entre les deux variations. Les objectifs de découplage et d'isolation sont ainsi réalisés.

V.6 CONCLUSION

Ce chapitre a eu pour objectif d'appliquer les méthodes de détection et de localisation des défauts à base d'observateurs à la MAS. Après avoir positionné le problème et étudié les différents défauts et méthodes de diagnostic de celle-ci, nous avons modélisé la MAS de manière à mettre en évidence les défauts et les perturbations. Dans notre étude, nous avons considéré des défauts engendrant des variations des grandeurs statoriques et rotoriques. Et comme perturbations les variations du couple résistant, de l'inertie et du coefficient de frottement. Les travaux effectués ont concerné principalement les méthodes de génération de résidus. Ainsi l'application des observateurs d'Edwards et de l'observateur de défauts, associé à un observateur par modes glissants, que nous avons proposé, s'est avérée efficace pour la résolution du problème de détection et d'isolation des défauts. Néanmoins, un travail important reste à faire quant à l'exploitation de ces résidus d'un point de vue fréquentiel et/ou temporel. A travers une comparaison entre les performances des deux approches, nous avons constaté que la seconde s'avère plus efficace pour la génération de résidus robustes.

CHAPITRE VI

*DETECTION DES DEFAUTS
ET RECONFIGURATION DES LOIS
DE COMMANDE
POUR LES ROBOTS MANIPULATEURS*

VI.1 INTRODUCTION

La détection et la localisation des défauts en robotique constituent un problème d'une grande importance. En effet, de par leur puissance, rapidité et résistance en milieux hostiles, les robots ont intégré de nombreux domaines, y compris le domaine industriel. Ainsi, l'apparition d'un défaut peut engendrer des dégâts irréparables si ce dernier n'est pas détecté le plus rapidement et le plus efficacement possible. Cependant, la détection du défaut à elle seule ne suffit pas toujours. Il est parfois nécessaire d'élaborer, dans la mesure du possible, des lois de commande permettant de tenir compte des anomalies: c'est l'objectif de la commande tolérante aux défauts.

Vu l'intérêt, de nombreux travaux de recherche ont été dédiés à la détection et la localisation des défauts ainsi qu'à la commande tolérante aux défauts en robotique. Ainsi, diverses méthodes ont été proposées, telles que les méthodes à base de modèle [FAN03], [KME02] et les méthodes à base de réseaux de neurones artificiels. Ces derniers ont été utilisés pour la génération du modèle du robot et du générateur de résidus [TIN01], [TIN02].

Les anomalies de comportement ou de fonctionnement des robots manipulateurs peuvent provenir de leur environnement externe qui change d'une manière permanente (température, humidité...etc.). Mais aussi, de leur environnement interne qui subit des changements importants et indésirables dus par exemple aux frottements, aux bruits et aux vibrations [FAN03], [KME02], [PAR96], [TIN01], [TIN02], [VIS91].

L'étude qui suit concerne la détection des défauts et la reconfiguration des lois de commande pour les robots manipulateurs. L'intérêt portera, particulièrement, sur le robot SCARA, en raison de son utilisation intensive en industrie.

Dans un premier temps, il sera question d'explicitier les défauts des robots manipulateurs en général. Nous donnerons les différentes classifications rencontrées dans la littérature puis nous spécifierons les défauts pris en compte dans cette étude. Après modélisation du robot SCARA à quatre degrés de liberté en vue de son diagnostic, nous reprendrons la méthode proposée par Kmelnitsky [KME02], sur la détection des défauts et l'accommodation à ces derniers. Les résultats des simulations seront alors présentés et interprétés. Il sera aussi question d'appliquer la méthode de commande tolérante aux défauts, proposée dans le paragraphe (IV.6). Nous terminerons par une comparaison entre les performances des deux approches et une conclusion sur le chapitre.

VI.2 CLASSIFICATION DES DÉFAUTS DES ROBOTS MANIPULATEURS

Différentes classifications de défauts peuvent être proposées pour les robots manipulateurs, selon le contexte, les objectifs, le milieu dans lequel fonctionne le robot et bien d'autres critères. Cependant, en général, la détection et la localisation des défauts dans ce

domaine, concerne les boucles de commande et non pas les variations paramétriques. Une première classification des défauts peut être formulée sous la forme suivante :

- Défauts au niveau des capteurs de position ou de vitesse.
- Défauts dans la structure mécanique, par exemple une articulation bloquée.
- Défauts d'actionneurs qui peuvent apparaître soit au niveau de la commande, soit au niveau du moteur.

Une autre classification, déduite du chapitre (IV), peut être donnée dans le cas où l'on s'intéresse au problème de reconfiguration. Il s'agit de distinguer entre les défauts catastrophiques et les défauts non catastrophiques. Le premier type engendre un dysfonctionnement du système qu'il est impossible de corriger ou de contrer son effet. Un exemple de défauts catastrophiques est un court circuit au niveau du moteur. Le seul moyen de corriger ce type d'anomalies est l'intervention de l'opérateur humain par le remplacement du composant défectueux. Le second type de défauts est généralement pris en compte lors de l'étude du problème d'accommodation. Ils peuvent être corrigés en modifiant la loi de commande lors de leur apparition. Parmi ces défauts, ceux dus aux frottements, aux variations de l'environnement externe ou encore des défauts au niveau des actionneurs...etc. Les défauts non catastrophiques peuvent engendrer des dégâts importants tels que des pertes en productivité, une diminution de la durée de vie du système, mais aussi, ils favorisent un environnement dangereux pour l'opérateur humain.

Une troisième classification des défauts affectant les robots peut être considérée. En effet, il est possible de distinguer entre les défauts dépendant des états et des entrées du système et ceux qui n'en dépendent pas. Les défauts entrant dans la deuxième catégorie dépendent seulement du temps, ils peuvent être modélisés par des termes additifs. Des méthodes très efficaces de détection et de localisation des défauts ont été proposées pour ce type d'anomalies. Quant aux commandes tolérantes, des commandes robustes et adaptatives suffisent pour contrer leur effet. Par contre, les défauts appartenant à la première catégorie ont une dynamique non linéaire et sont plus difficiles à corriger. L'étude en cours s'intéresse aux défauts caractérisés par une certaine dynamique.

VI.3 MODELISATION DU ROBOT SCARA A QUATRE DEGRES DE LIBERTE EN VUE DE SON DIAGNOSTIC

VI.3.1 Modèle du robot sain

L'étude en cours concerne le robot SCARA à quatre degrés de liberté, dont le modèle dynamique, détaillé en annexe (D.1), est donné par :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \tau \quad (\text{VI.1})$$

Où : $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ x_4]^T$ et $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ F_4]^T$ représentent respectivement le vecteur position articulaire et le vecteur des Couples/Forces d'entrée. $G(\theta) \in R^4$ est le vecteur gravitationnel. $V(\theta, \dot{\theta}) \in R^n$ représente les forces centrifuges et de coriolis. $M(\theta)$ représente la matrice d'inertie. $\eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)$ englobe toutes les dynamiques négligées et les incertitudes de modélisation, supposées bornées. Les expressions de $M(\theta)$, $V(\theta, \dot{\theta})$ et $G(\theta)$ peuvent être retrouvées en annexe (D.1) ainsi que les hypothèses de fonctionnement du robot.

En pratique, il est très difficile, voire même impossible, d'aboutir à un modèle exact, reflétant parfaitement la dynamique du système réel. C'est pour cette raison, qu'il est nécessaire de considérer les incertitudes et les dynamiques négligées, en particulier lors de l'étude des problèmes de reconfiguration et de correction de lois de commande.

VI.3.2 Modélisation des défauts

Les défauts considérés dans ce qui suit sont des défauts non catastrophiques, dépendant des états et des entrées du système. Ces derniers peuvent être représentés par le modèle dynamique général:

$$F(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \beta(P - p)f(\theta, \dot{\theta}, \tau) \quad (VI.2)$$

Où $f(\theta, \dot{\theta}, \tau) \in R^n$ représente la dynamique du défaut. Et $\beta(P - p) \in R^{n \times n}$ traduit l'apparition ou pas du défaut considéré. Tel que $\beta(P - p) = \text{diag}(\beta_1(P_1 - p_1), \dots, \beta_n(P_n - p_n))$. Le symbole *diag* correspond à la matrice diagonale dont les éléments sont :

$$\beta_i(P_i - p_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } p_i \in P_i \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (VI.3)$$

p_i représente un paramètre caractéristique du système (temps, vitesse...etc). Et P_i est la région, correspondant à ce paramètre, dans laquelle le défaut est déclaré présent.

Supposons que N types de défauts, dont la dynamique est connue, agissent sur le système :

$$A = \{f_1(\theta, \dot{\theta}, \tau) \dots f_N(\theta, \dot{\theta}, \tau)\} \quad (VI.4)$$

Alors, il existe $2^N - 1$ combinaisons différentes pour l'apparition de ces défauts (le cas où aucun défaut n'apparaît étant exclu). L'ensemble des combinaisons des défauts précédents peut être écrit comme suit :

$$P(A) = \{f_1(\theta, \dot{\theta}, \tau), \dots, f_{2^N-1}(\theta, \dot{\theta}, \tau)\}. \quad (VI.5)$$

Chaque élément de $P(A)$ peut être modélisé sous la forme :

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, t) = \sum_{i=1}^s \text{diag}(C_{mi}) W_{mi}(\theta, \dot{\theta}, \tau), \text{ pour } m = 1, 2, \dots, 2^N - 1 \quad (\text{VI.6})$$

Où $C_{mi} \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur de pondération et $W_{mi} : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^n$ est un vecteur représentant la dynamique des défauts. Les dynamiques pour $m = N + 1, \dots, 2^N - 1$, sont représentées par des combinaisons des dynamiques de $v \in [1, N]$ des défauts considérés initialement. s est un nombre constant (qui représentera, dans cette étude le nombre de neurones du RBFN).

Dans cette étude, les défauts considérés sont des combinaisons de différentes anomalies et non pas des anomalies spécifiques. Cependant, la distinction entre les défauts qui dépendent de l'état (défauts composants) et ceux qui dépendent du couple d'entrée (défauts actionneurs), sera prise en compte :

$$f_m(\theta, \dot{\theta}, \tau) = f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m\tau}(\tau) \quad (\text{VI.7})$$

Où $f_{m\theta}$ et $f_{m\tau}$ représentent respectivement les défauts composants et actionneurs.

Ainsi, le modèle du robot, tenant compte des défauts précédents, se met sous la forme :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \eta(\theta, \dot{\theta}, t) + \beta_m(P - p) [f_{m\theta}(\theta, \dot{\theta}) + f_{m\tau}(\tau)] = \tau \quad (\text{VI.8})$$

Des exemples de modèles de défauts composants sont représentés sur le tableau (VI.1) [DEW97], [KME02].

Défaut	Modèle
Frottements secs (Coulomb)	$f(\dot{\theta}) = \alpha \text{sign}(\dot{\theta})$
Asymétrie	$f(\dot{\theta}) = \alpha, \text{sign}(\dot{\theta}) + \beta, \dot{\theta}$
Défauts dépendant de la position	$f(\theta) = K_j \sin(\omega_0 \theta + \varphi)$
Défauts dépendant de la vitesse	$f(\dot{\theta}) = \left[\alpha_0 + \alpha_1 e^{-\beta \dot{\theta} } \right] \text{sign}(\dot{\theta})$
Frottements visqueux	$f(\dot{\theta}) = \alpha \dot{\theta}$

Tableau VI.1 : Exemples de modèles de défauts composants.

Généralement, les actionneurs sont des moteurs électriques. Les défauts les plus courants, dans ce cas, sont les défauts électriques, les vibrations, les frottements...etc. Nous avons

considéré, dans les simulations effectuées par la suite, des défauts électriques, engendrant un affaiblissement du couple, dont le modèle mathématique peut être donné par [KME02]:

$$f(\tau) = \alpha\tau \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (\text{VI.9})$$

VI.4 DETECTION ET ACCOMMODATION : PREMIERE APPROCHE

Dans cette étude, la commande du robot SCARA, précédemment introduit, s'effectue à l'aide d'un régulateur Proportionnel-Dérivé, dont les paramètres sont calculés de manière à assurer la convergence asymptotique de l'erreur de poursuite vers zéro.

VI.4.1 Détection et estimation des défauts

Le bloc de détection et d'estimation a un double rôle. Lorsque le système est sain, cette unité sert à détecter l'apparition d'un défaut. Une fois le défaut détecté, son rôle consiste à l'estimer afin de reconfigurer la loi de commande. La conception de cette unité s'effectue de manière à assurer sa robustesse vis-à-vis des incertitudes et des dynamiques négligées. Dans un premier temps, nous considérerons le cas général d'un robot à n degrés de liberté. Nous supposons que les estimés des défauts sont donnés par :

- Défauts qui dépendent du couple

$$\hat{f}_\tau(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_1(t)\tau_1 \\ h_2(t)\tau_2 \\ \vdots \\ h_n(t)\tau_n \end{bmatrix} \quad \text{D'où } \hat{f}_\tau = \begin{bmatrix} h_1(t) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_2(t) & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_n(t) \end{bmatrix} = \text{diag}[H(t)]\tau \quad (\text{VI.10})$$

- Défauts qui dépendent de la vitesse et de la position

$$\hat{f}_\theta(\theta, \dot{\theta}, t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k l_{1i}(t)q_{1i}(\theta_1) \\ \sum_{i=1}^k l_{2i}(t)q_{2i}(\theta_2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k l_{ni}(t)q_{ni}(\theta_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k S_{1i}(t)Z_{1i}(\dot{\theta}_1) \\ \sum_{i=1}^k S_{2i}(t)Z_{2i}(\dot{\theta}_2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k S_{ni}(t)Z_{ni}(\dot{\theta}_n) \end{bmatrix} \quad (\text{VI.11})$$

Ces derniers peuvent être réécrits sous la forme :

$$\hat{f}_\theta = \sum_{i=1}^k \text{diag}[L_i(t)]Q_i(\theta) + \sum_{i=1}^k \text{diag}[S_i(t)]Z_i(\dot{\theta}) \quad (\text{VI.12})$$

Où $H(t) \in \mathbb{R}^n$, $L_i(t) \in \mathbb{R}^n$ et $S_i(t) \in \mathbb{R}^n$ sont des vecteurs de pondération des défauts.

Les dynamiques des défauts qui dépendent de la position et de la vitesse sont estimées en utilisant des réseaux de neurones à base radiale RBFN, dont les fonctions d'activation sont données par :

$$q_{ij}(\theta_j) = \exp\left[-\frac{(\theta_j - a_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right] \quad \text{et} \quad z_{ij}(\dot{\theta}_j) = \exp\left[-\frac{(\dot{\theta}_j - b_{ij})^2}{\omega_{ij}^2}\right] \quad \text{pour} \quad \begin{cases} i=1,2,\dots,k \\ j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (\text{VI.13})$$

a_{ij} , b_{ij} , σ_{ij} et ω_{ij} sont les paramètres de ces réseaux. k est le nombre de neurones par état.

Ainsi, la dynamique du système peut être réécrite sous la forme:

$$\ddot{\theta} = -M^{-1}(V + G + \eta) + M^{-1}(I - \text{diag}[H^*])\tau - M^{-1} \sum_{i=1}^k (\text{diag}[L_i^*]Q_i + \text{diag}[S_i^*]Z_i) \quad (\text{VI.14})$$

Où le symbole X^* désigne la valeur réelle de X , supposée constante.

Nous définissons alors l'observateur suivant :

$$\ddot{\hat{\theta}} = -M^{-1}(V + G) + M^{-1}(I - \text{diag}[H])\tau - M^{-1} \sum_{i=1}^k (\text{diag}[L_i]Q_i + \text{diag}[S_i]Z_i) - \gamma(\dot{\hat{\theta}} - \dot{\theta}) \quad (\text{VI.15})$$

Où $\gamma = [\gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \dots \quad \gamma_n]$ est une matrice définie positive représentant la matrice de gain de l'observateur.

La conception du bloc de détection et d'estimation passe par deux étapes. Dans la première, des résidus permettant la détection de la présence d'un défaut sont générés. Dans la seconde, les pondérations des différents défauts sont estimées.

VI.4.1.1 Phase de détection

L'erreur d'estimation $e = \hat{\theta} - \dot{\theta}$ joue le rôle du vecteur résidu permettant la détection de la présence d'un défaut. Dans un premier temps, les dynamiques non modélisées sont négligées, le système est donc défini par :

$$\ddot{\theta} = -M^{-1}(V + G + F_r + F_\theta) + M^{-1}\tau \quad (\text{VI.16})$$

En absence de défauts, toutes les pondérations à estimer sont initialisées à zéro. L'observateur sera donc donné par:

$$\ddot{\hat{\theta}} = -M^{-1}(V + G) + M^{-1}\tau - \gamma(\dot{\hat{\theta}} - \dot{\theta}) \quad (\text{VI.17})$$

La dynamique de l'erreur d'estimation, dans ce cas, sera égale à :

$$\dot{e} = -\gamma e \quad (\text{VI.18})$$

Etant donné que γ est définie positive alors e tend asymptotiquement vers zéro. Si un défaut apparaît, elle s'écarte notablement de zéro, ce qui permet donc de détecter la présence de ce dernier.

Cependant, en réalité, il est important de tenir compte des incertitudes pour éviter les fausses alarmes et les détections erronées. C'est dans ce but, qu'un seuil de détection peut être introduit. Ainsi, en tenant compte des incertitudes, la dynamique de l'erreur est donnée par :

$$\dot{e} = -\gamma e + M^{-1}\eta \quad (\text{VI.19})$$

D'où :

$$e(t) = \exp(-\gamma t)e(0) + \int_0^t \exp(-\gamma(t-T))M^{-1}(T)\eta(T)dT \quad (\text{VI.20})$$

Les incertitudes étant bornées et la borne supérieure connue, telle que : $\eta \leq \sup|\eta_j| = \eta_0$ et sachant aussi que $e(0) = 0$ alors :

$$e(t) \leq \int_0^t \exp(-\gamma(t-T))(M^{-1}(T)\eta_0)dt \quad (\text{VI.21})$$

Le seuil de détection est alors défini par : $D(\theta, \dot{\theta}, t) = [d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_n]^T$, tel que:

$$D(\theta, \dot{\theta}, t) = \int_0^t \exp(-\gamma(t-T))(M^{-1}(T)\eta_0)dt \quad (\text{VI.22})$$

Par conséquent, un défaut est déclaré présent si :

$$|e_j| > d_j(t) ; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{VI.23})$$

La valeur de η_0 peut être retrouvée en annexe (D.2). Néanmoins, il faut noter que celle-ci est généralement déterminée expérimentalement. Par conséquent, nous nous sommes référés à des études déjà effectuées [KME02].

Des simulations ont été effectuées sur MATLAB afin de tester les performances de ce bloc de détection des défauts. Différents cas de figures ont été considérés. Dans un premier temps, les incertitudes de modélisation ont été négligées. Les figures (VI.1), (VI.2), et (VI.3), illustrent le comportement des différents résidus ainsi que les performances du système de commande en absence de défauts. Quant aux figures (VI.4)-(VI.9), elles représentent les variations des résidus ainsi que les positions et vitesses articulaires lorsqu'un défaut actionneur ou composant apparaît. (Les détails concernant les paramètres de simulation et les défauts considérés peuvent être consultés en annexe (D.2))

D'autre part, nous avons voulu montrer l'effet des incertitudes de modélisations sur les performances du système de détection, en absence de défauts. Ceci est représenté sur les figures (VI.10), (VI.11) et (VI.12).

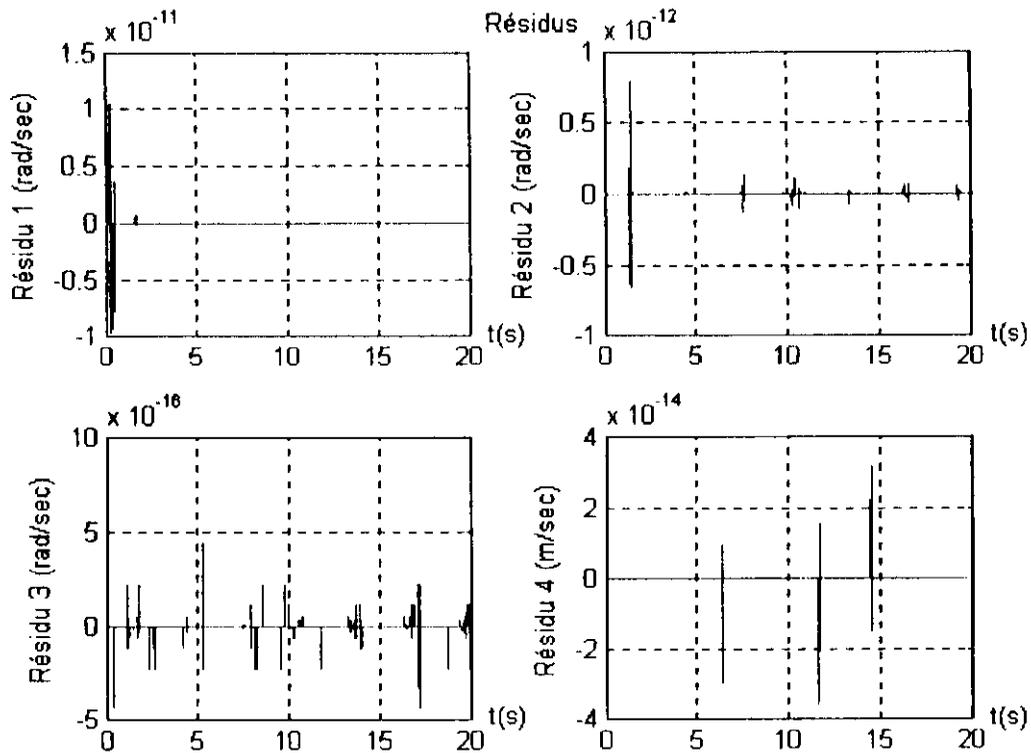


Figure VI.1: Représentation des résidus: Absence de défauts et d'incertitudes.

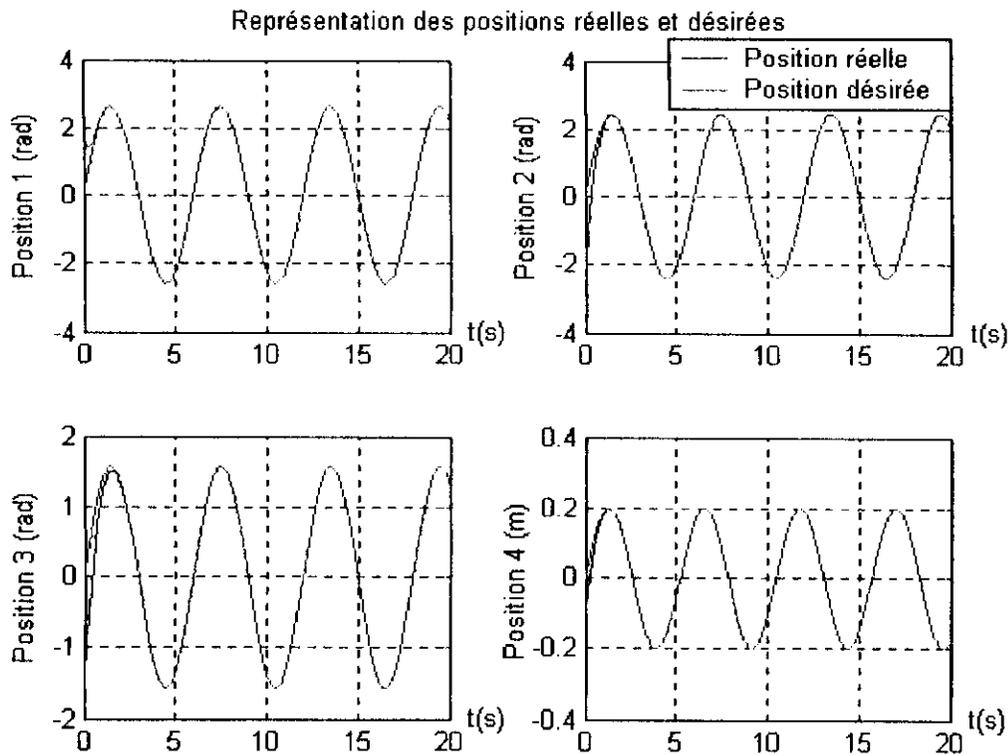


Figure VI.2: Représentation des positions: Absence de défauts et d'incertitudes.

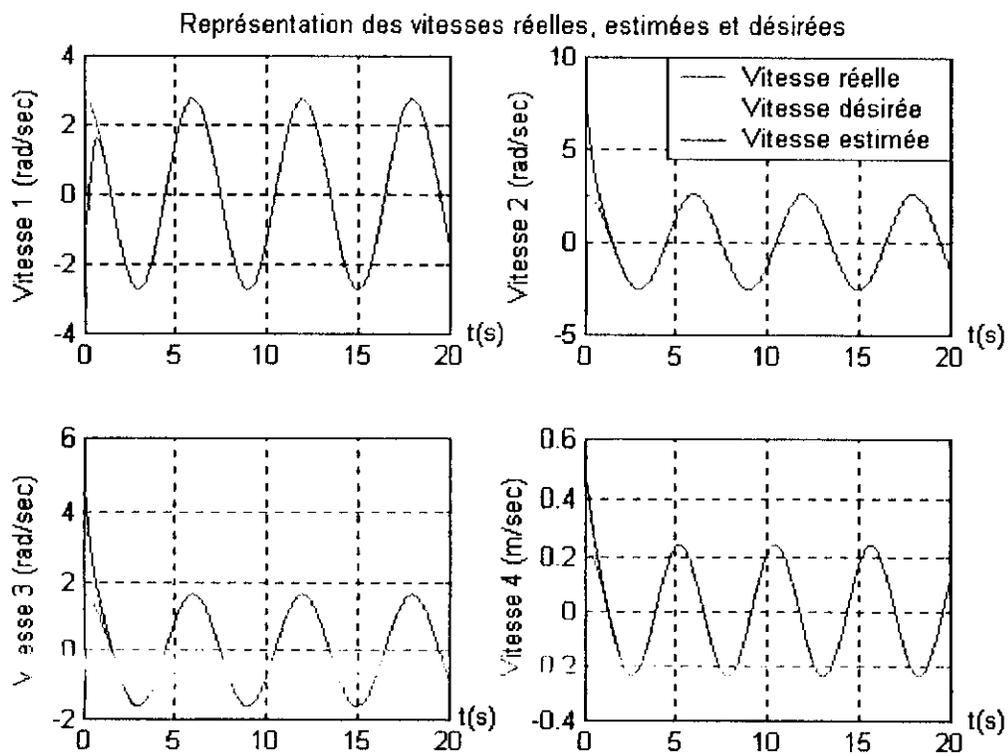


Figure VI.3: Représentation des vitesses : Absence de défauts et d'incertitudes.

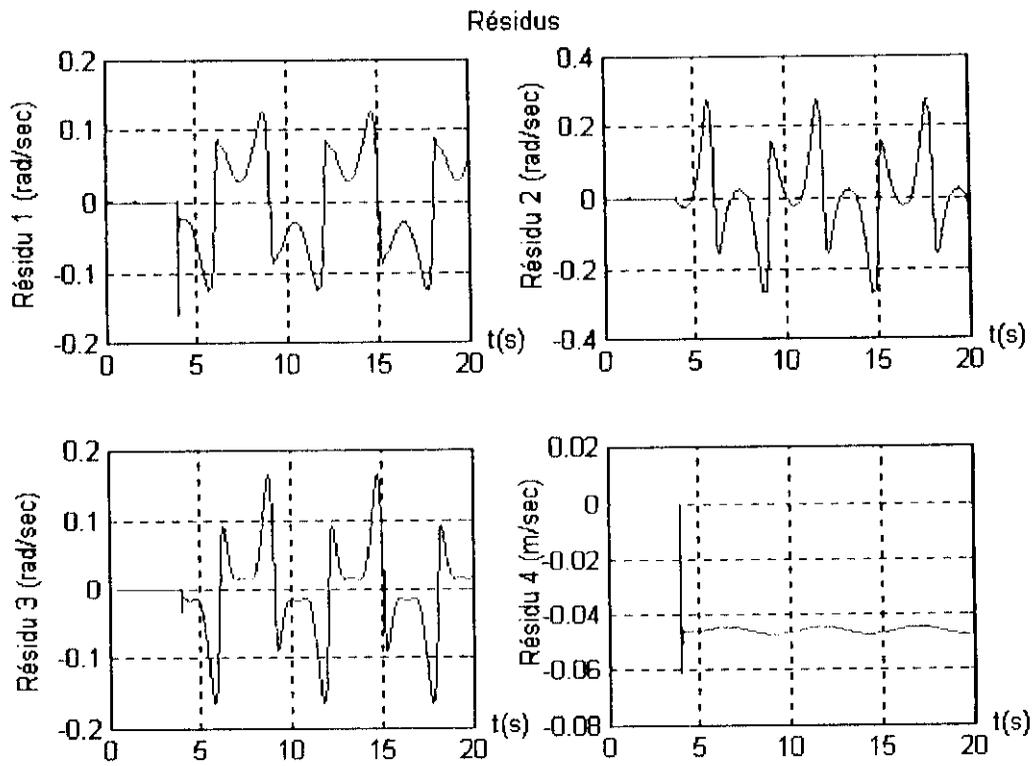


Figure VI.4 : Représentation des résidus : Apparition de défauts actionneurs à $t = 4$ sec.

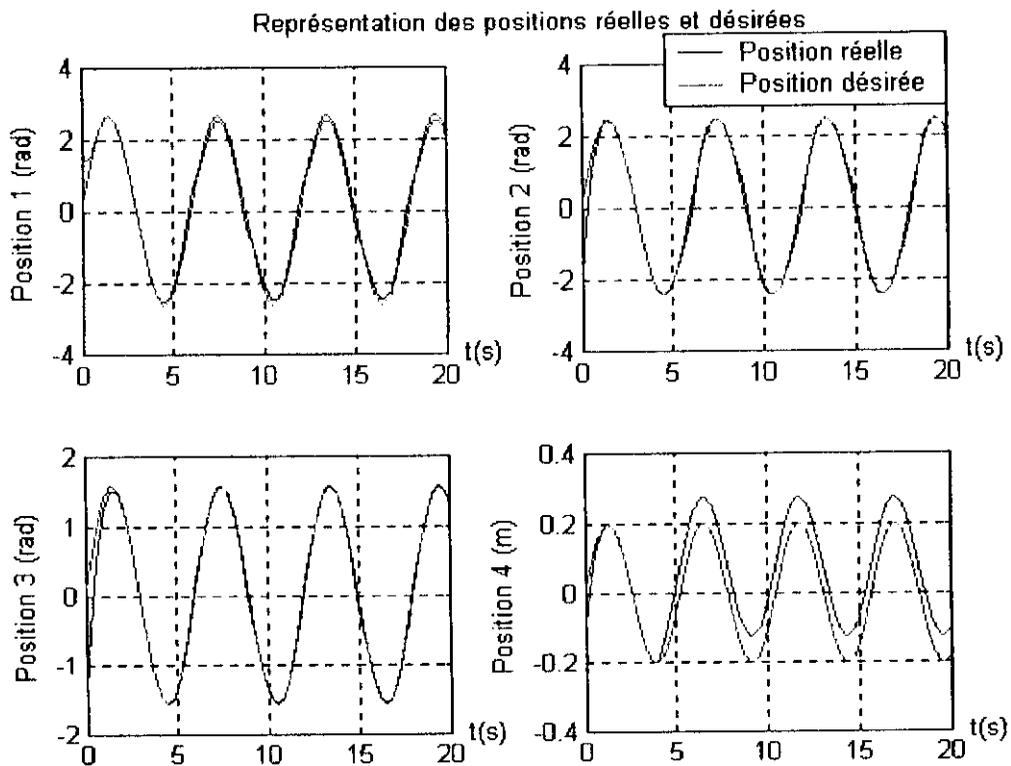


Figure VI.5: Représentation des positions : Apparition de défauts actionneurs à $t = 4$ sec.

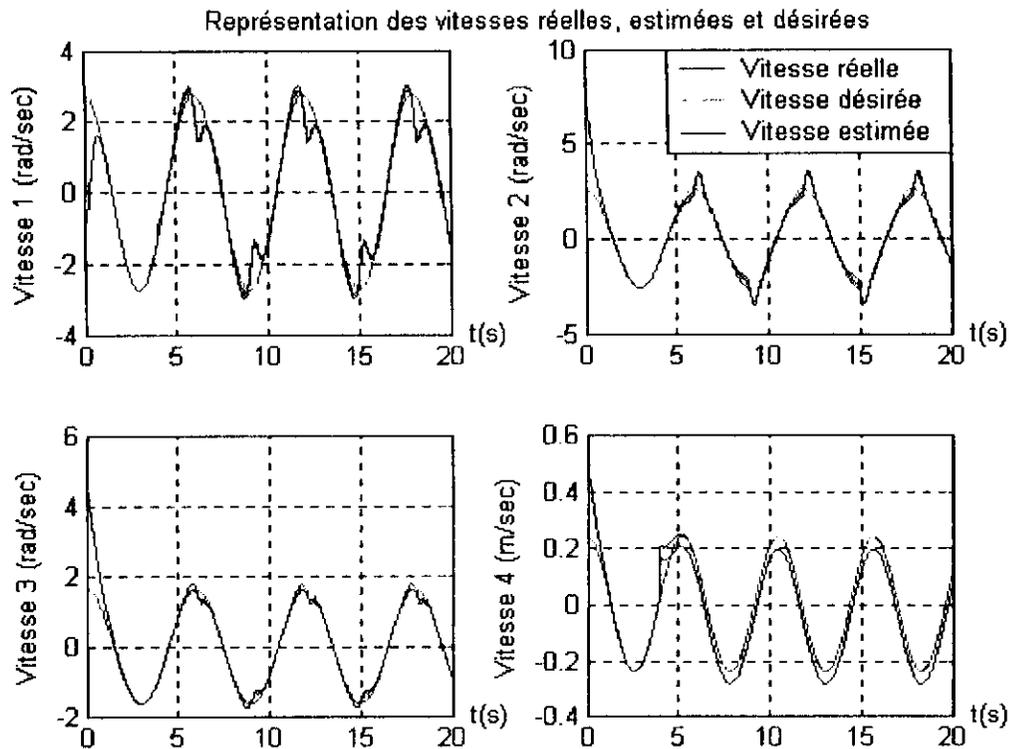


Figure VI.6: Représentation des vitesses : Apparition de défauts actionneurs à $t = 4$ sec.

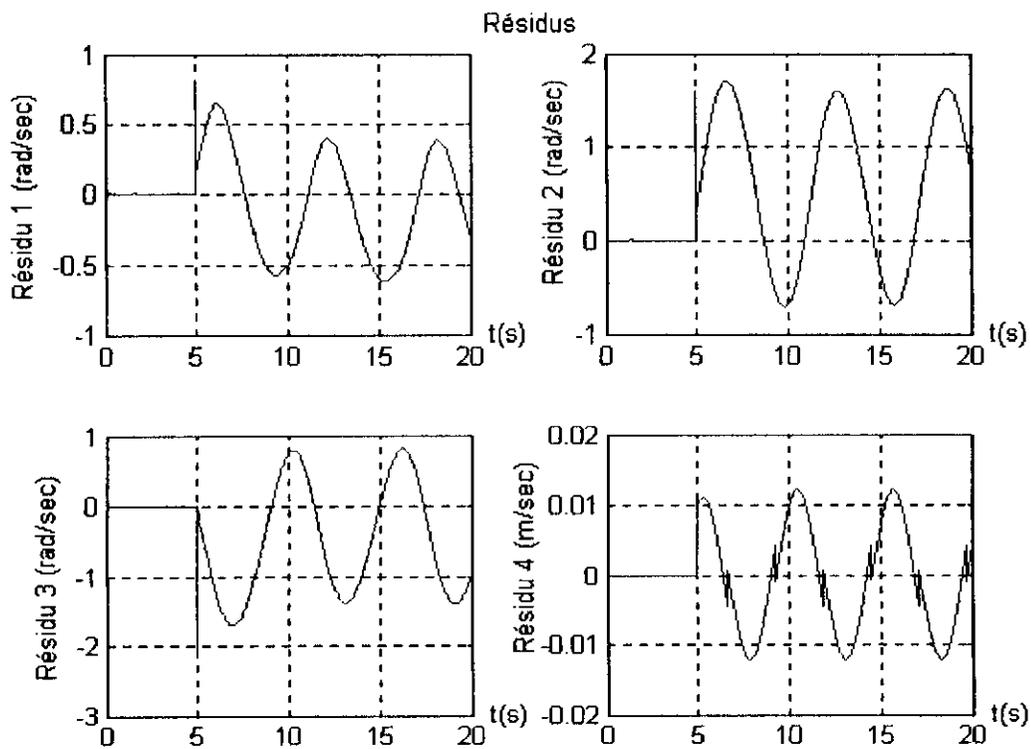


Figure VI.7: Représentation des résidus : Apparition de défauts composants à $t = 5$ sec.

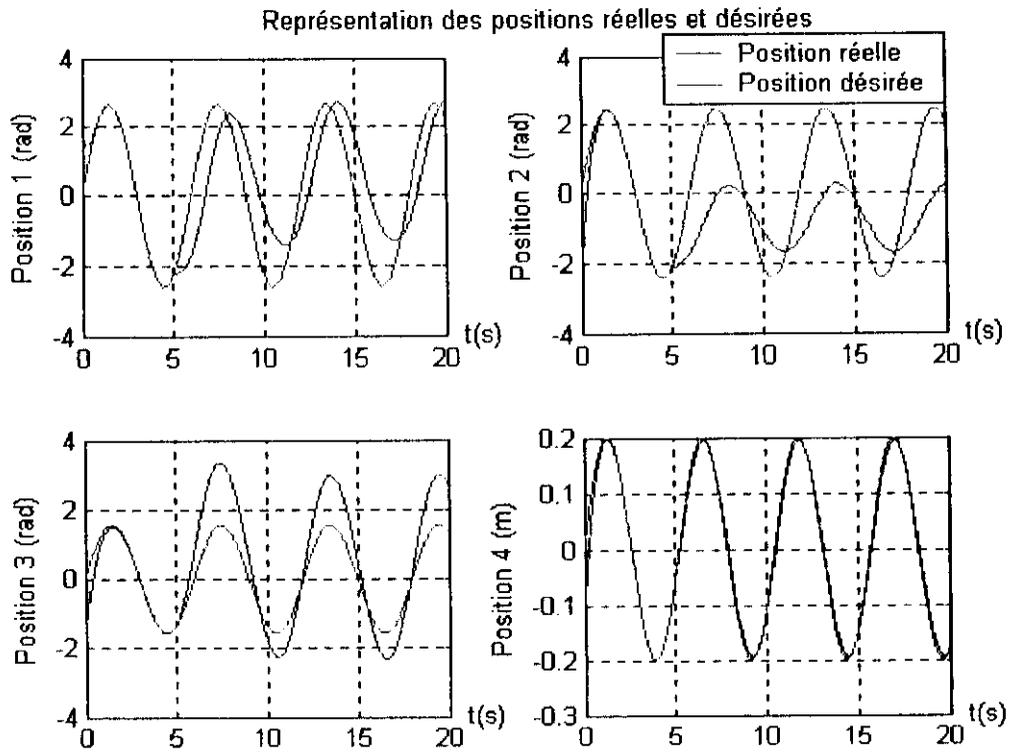


Figure VI.8: Représentation des positions: Apparition de défauts composants à $t = 5$ sec.

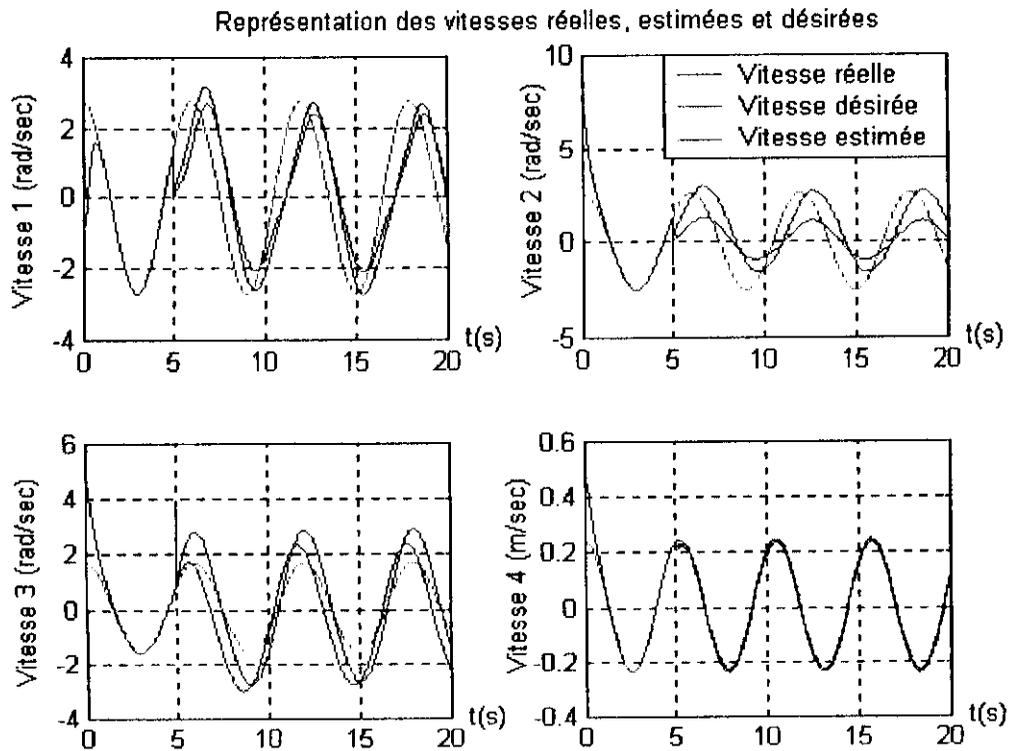


Figure VI.9: Représentation des vitesses: Apparition de défauts composants à $t = 5$ sec.

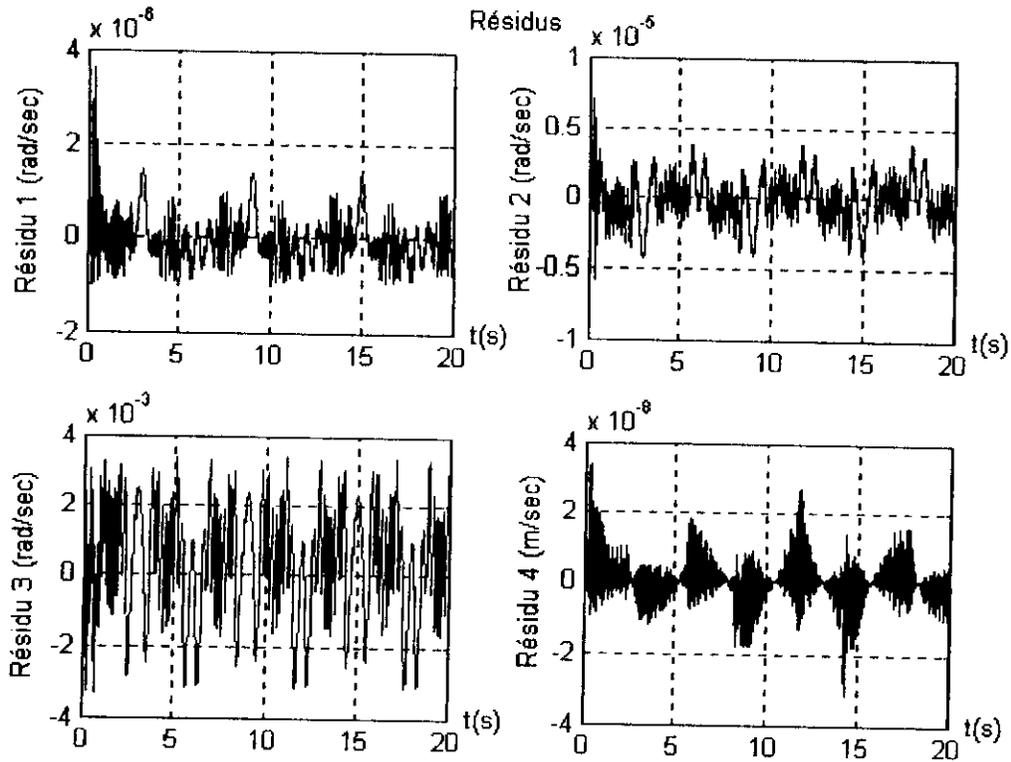


Figure VI.10: Représentation des résidus : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

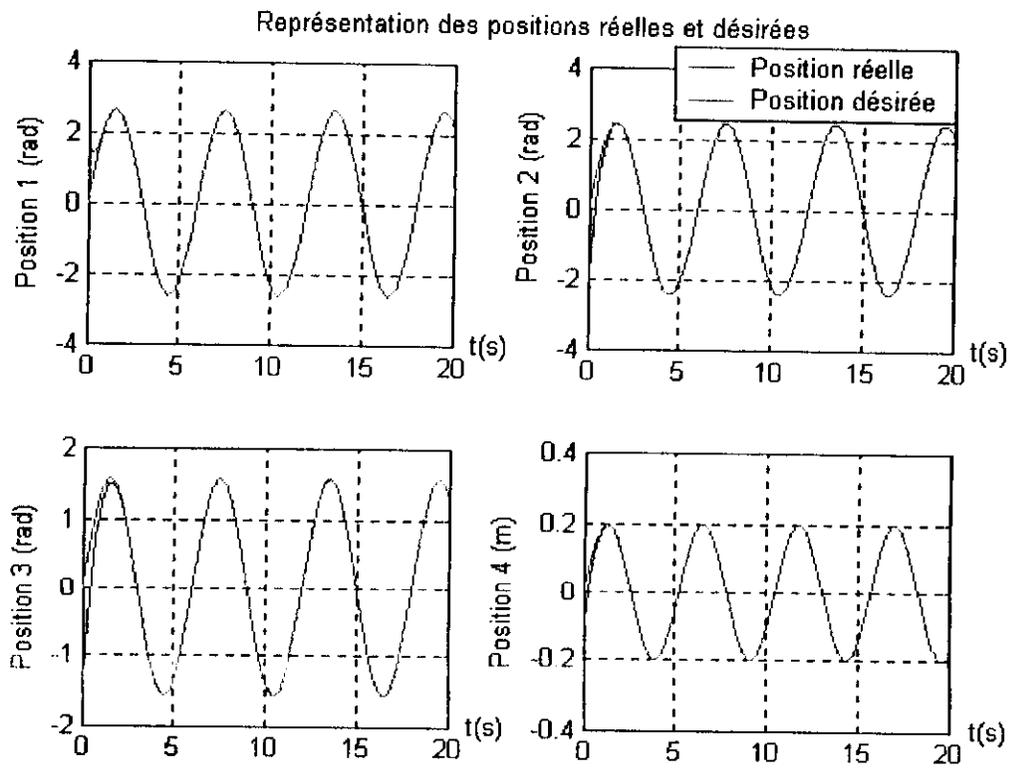


Figure VI.11: Représentation des positions: Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

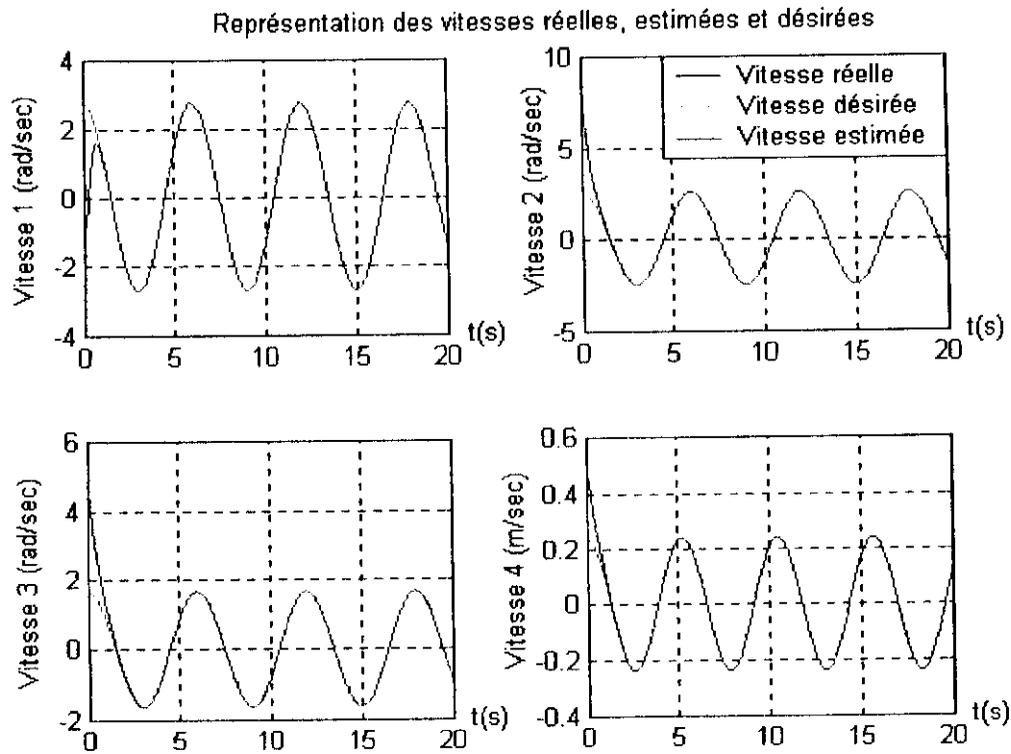


Figure VI.12: Représentation des vitesses: Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

➤ Interprétations et commentaires

- ❖ Les figures (VI.1), (VI.2) et (VI.3) représentent le cas idéal se traduisant par l'absence des défauts et des incertitudes. Nous constatons que dans ce cas, les résidus sont nuls et que les positions et les vitesses suivent parfaitement les trajectoires sinusoïdales désirées. Les objectifs de commande sont donc réalisés.
- ❖ A travers les figures (VI.4), (VI.5) et (VI.6), qui illustrent les variations des résidus et des états du système, dans le cas de l'apparition de défauts actionneurs à $t=4$ sec mais toujours en supposant que les incertitudes sont nulles, nous remarquons que les résidus s'écartent notablement de zéro à partir de cet instant, indiquant ainsi l'apparition des défauts. Quant aux performances du système de commande, elles se dégradent remarquablement.
- ❖ Les figures (VI.7), (VI.8) et (VI.9) représentent le cas où des défauts composants apparaissent à l'instant $t=5$ sec, toujours en négligeant les incertitudes de modélisation. Des résultats similaires au cas précédent sont obtenus, à savoir, les résidus s'éloignent de zéro et les performances de la boucle de commande se détériorent.

- ❖ Quant aux figures (VI.10), (VI.11) et (VI.12), elles illustrent les résultats des simulations effectuées dans le cas d'un système sain, mais soumis à des incertitudes de modélisation. Nous constatons que les performances du système de régulation sont maintenues du moment que lors du calcul de la loi de commande, nous avons tenu compte de la borne supérieure de celles-ci, supposée connue. Par conséquent les objectifs de poursuite sont maintenus. Néanmoins, il faut noter que les résidus varient et s'éloignent de zéro. Ces derniers sont donc sensibles aux incertitudes de modélisation. Ce qui engendre de fausses alarmes et des détections erronées.

Nous allons, à présent, introduire le seuil de détection défini par l'équation (VI.22) afin de montrer comment il est possible d'améliorer la procédure de détection des défauts et de réduire ainsi les fausses alarmes. Nous ne représenterons que les résidus, les variations des états étant identiques aux figures précédentes. Les résultats des simulations sont représentés sur les figures (VI.13), (VI.14) et (VI.15).

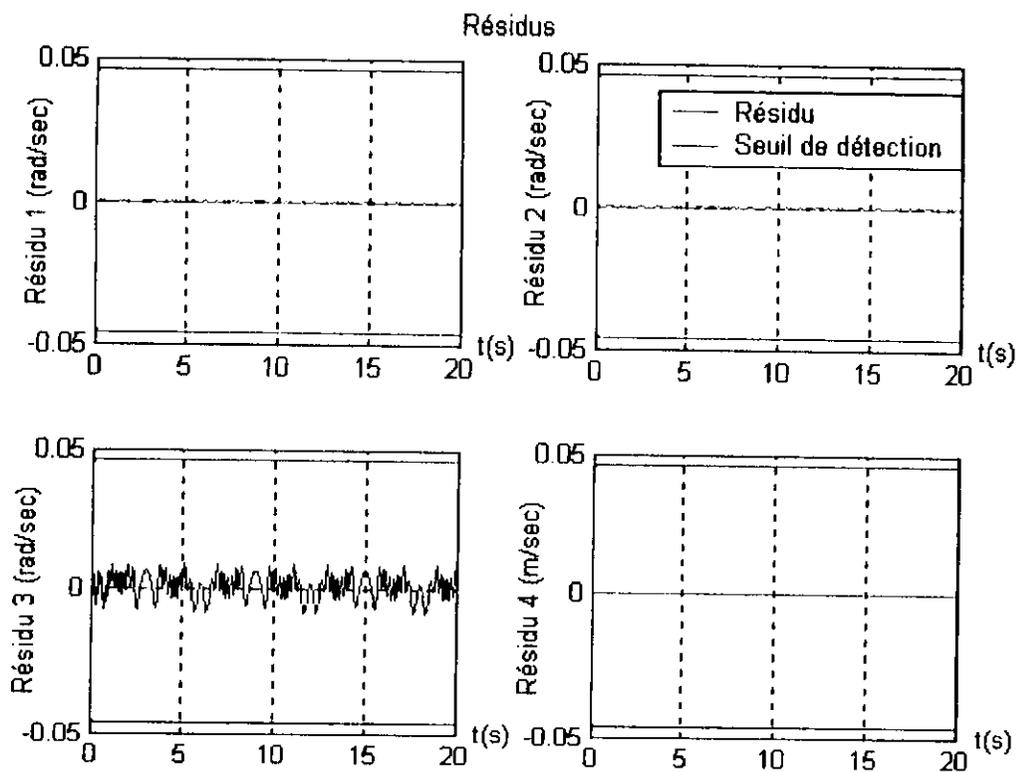


Figure VI.13: Résidus avec un seuil de détection : Absence de défauts mais présence d'incertitudes.

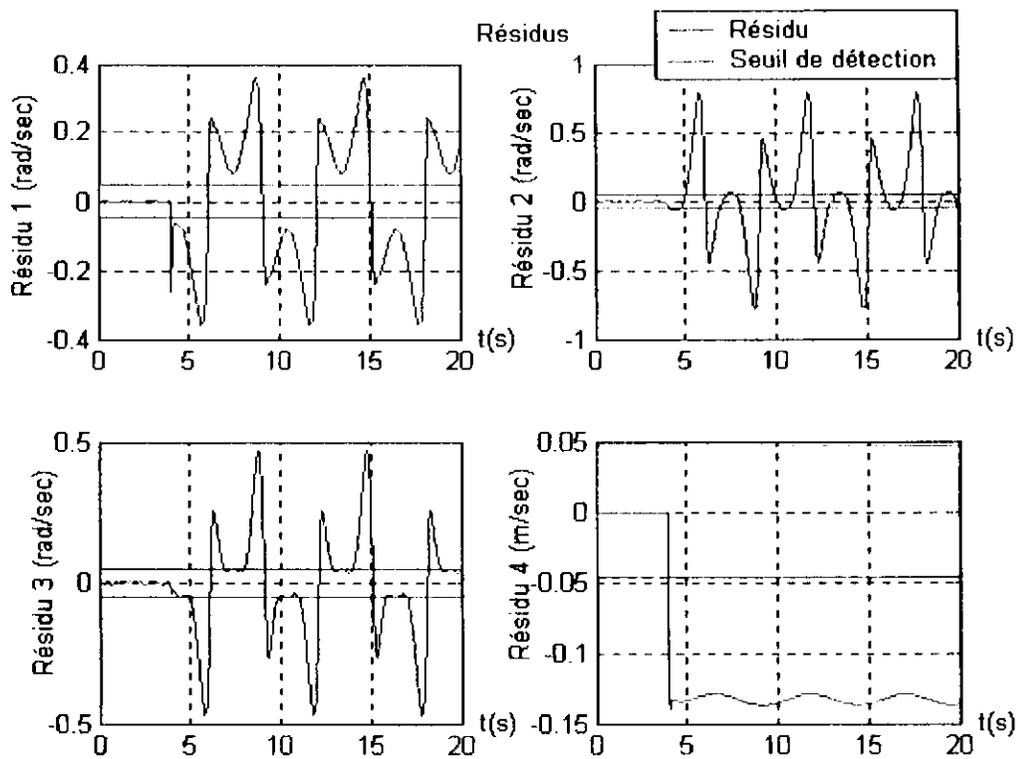


Figure VI.14: Résidus avec un seuil de détection: Défauts actionneurs à $t=4$ sec.

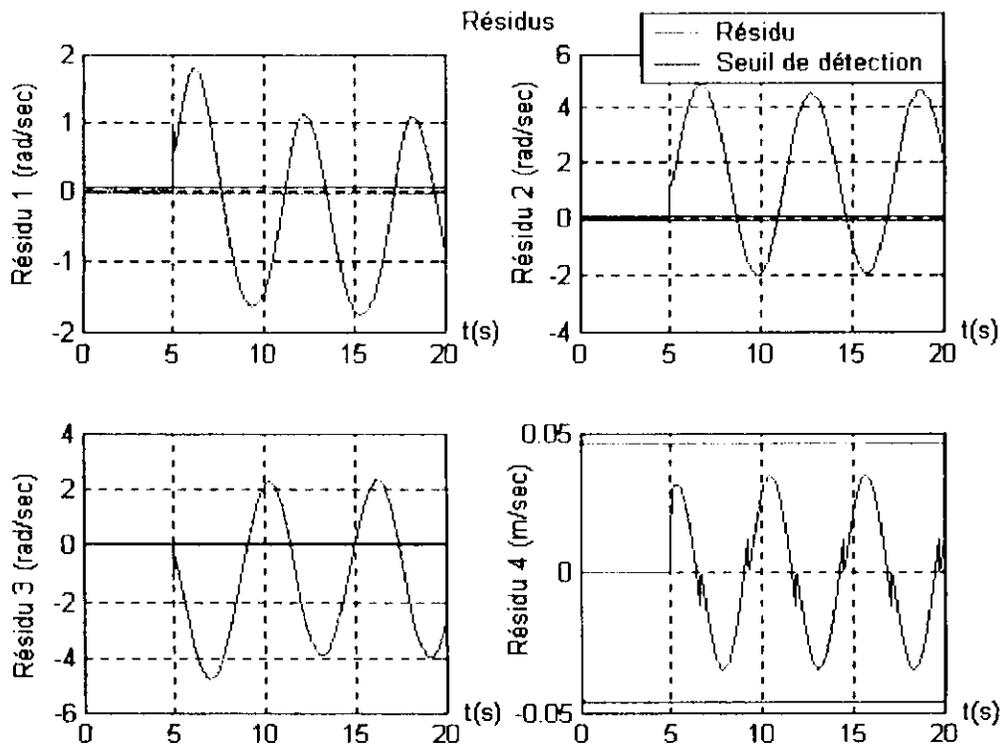


Figure VI.15: Résidus avec un seuil de détection: Défauts composants à $t=5$ sec.

➤ **Interprétations et commentaires**

- ❖ La figure (VI.13) illustre le comportement des résidus en absence de défauts mais en présence d'incertitudes. Nous constatons que malgré le fait que les résidus soient non nuls, il n'y a pas de détection de défauts car ils ne dépassent pas le seuil de détection. Par conséquent, les fausses alarmes sont évitées et le système de détection est plus performant.
- ❖ A travers la figure (VI.14), nous constatons que lorsque des défauts actionneurs apparaissent à $t=4$ sec, les résidus franchissent le seuil de détection signalant ainsi leur présence.
- ❖ La figure (VI.15), quant à elle, indique des résultats similaires au cas précédent mais lors de l'apparition de défauts composants à $t= 5$ sec.

Ainsi, l'introduction du seuil de détection améliore les performances du système de détection des défauts et par conséquent évite les fausses alarmes.

VI.4.1.2 Phase d'estimation des défauts

Une fois le défaut détecté et en posant :

$$\begin{cases} \tilde{H} = H - H^* \\ \tilde{L}_i = L_i - L_i^* \\ \tilde{S}_i = S_i - S_i^* \end{cases} \quad (VI.24)$$

Alors, la dynamique de l'erreur d'estimation sera donnée par :

$$\dot{e} = -\gamma e - M^{-1} \left[\text{diag}[\tilde{H}] \Gamma + \sum_{i=1}^k (\text{diag}[\tilde{L}_i] Q_i + \text{diag}[\tilde{S}_i] Z_i) - \eta \right] \quad (VI.25)$$

Soit la fonction de Lyapunov définie positive suivante :

$$V = \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} \tilde{H}^T \Gamma^{-1} \tilde{H} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \tilde{L}_i^T \Psi^{-1} \tilde{L}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \tilde{S}_i^T Y^{-1} \tilde{S}_i \quad (VI.26)$$

$\Gamma, \Psi, Y \in \mathbb{R}^{n \times n}$ étant des gains matriciels. Nous avons alors:

$$\dot{V} = e^T \dot{e} + \tilde{H}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{H}} + \sum_{i=1}^k \tilde{L}_i^T \Psi^{-1} \dot{\tilde{L}}_i + \sum_{i=1}^k \tilde{S}_i^T Y^{-1} \dot{\tilde{S}}_i \quad (VI.27)$$

En posant :

$$\begin{cases} \dot{H}^T \Gamma^{-1} = e^T M^{-1} \text{diag}(\tau) \\ \dot{L}_i^T \Psi^{-1} = e^T M^{-1} \text{diag}(Q_i) \\ \dot{S}_i^T Y^{-1} = e^T M^{-1} \text{diag}(Z_i) \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{H} = \Gamma \text{diag}(\tau) M^{-1} e \\ \dot{L}_i = \Psi \text{diag}(Q_i) M^{-1} e, \text{ Pour } i = 1, 2, \dots, k \\ \dot{S}_i = Y \text{diag}(Z_i) M^{-1} e \end{cases} \quad (\text{VI.28})$$

Alors :

$$\dot{V} = -e^T \gamma e + e^T M^{-1} \eta \quad (\text{VI.29})$$

- Si $\eta = 0$, alors $\dot{V} = -e^T \gamma e$. Puisque γ est semi définie positive, \dot{V} est semi définie négative. Par conséquent, l'erreur d'estimation converge asymptotiquement vers zéro.
- Si $\eta \neq 0$ alors, $\dot{V} = -e^T \gamma e + e^T M^{-1} \eta$. Dans ce cas, γ est choisie de sorte à avoir \dot{V} semi définie négative en tenant compte de la borne supérieure des incertitudes.

En résumé, le bloc de détection et d'estimation est défini par le système d'équations (VI.30):

$$\dot{\hat{\theta}} = -M^{-1}(V + G) + M^{-1}(I - \text{diag}[H])\tau - M^{-1} \sum_{i=1}^k (\text{diag}[L_i, Q_i] + \text{diag}[S_i, Z_i]) - \gamma e \quad (\text{VI.30})$$

Où :

$$\dot{H} = \Gamma \text{diag}(\tau) M^{-1} e$$

Et

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \vdots \\ \dot{L}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi \text{diag}[Q_1] M^{-1} e \\ \Psi \text{diag}[Q_2] M^{-1} e \\ \vdots \\ \Psi \text{diag}[Q_k] M^{-1} e \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} Q_1(\theta) \\ Q_2(\theta) \\ \vdots \\ Q_k(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [q_{11}(\theta) & q_{21}(\theta) & \dots & q_{n1}(\theta)]^T \\ [q_{12}(\theta) & q_{22}(\theta) & \dots & q_{n2}(\theta)]^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [q_{1k}(\theta) & q_{2k}(\theta) & \dots & q_{nk}(\theta)]^T \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \\ \vdots \\ \dot{S}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \text{diag}[Z_1] M^{-1} e \\ Y \text{diag}[Z_2] M^{-1} e \\ \vdots \\ Y \text{diag}[Z_k] M^{-1} e \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} Z_1(\dot{\theta}) \\ Z_2(\dot{\theta}) \\ \vdots \\ Z_k(\dot{\theta}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}(\dot{\theta}) & Z_{21}(\dot{\theta}) & \dots & Z_{n1}(\dot{\theta})]^T \\ [Z_{12}(\dot{\theta}) & Z_{22}(\dot{\theta}) & \dots & Z_{n2}(\dot{\theta})]^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [Z_{1k}(\dot{\theta}) & Z_{2k}(\dot{\theta}) & \dots & Z_{nk}(\dot{\theta})]^T \end{bmatrix}$$

Dans cette étude nous ne nous sommes pas intéressés à la phase d'isolation des défauts. Cependant, ceci peut être effectué en se basant sur les techniques introduites dans le chapitre (II). Il est possible par exemple d'utiliser un banc d'observateurs où chaque observateur est synthétisé pour un défaut particulier. Pour plus de détails concernant cette phase consulter [KME02].

VI.4.2 Accommodation aux défauts

Comme il a été mentionné, un régulateur du type Proportionnel-Dérivé a été utilisé pour la commande du robot considéré. La valeur du couple d'entrée nominale est égale à :

$$\tau_0 = M(\theta)[K_p(\theta - \theta_d) + K_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d) + \ddot{\theta}_d] + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (\text{VI.31})$$

θ_d , $\dot{\theta}_d$ et $\ddot{\theta}_d$ représentent respectivement les vecteurs position, vitesse et accélération articulaires désirés. $K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ et $K_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sont des matrices définies négatives, calculées de manière à assurer la convergence asymptotique de l'erreur de poursuite.

Lorsqu'un défaut apparaît, le bloc d'estimation est enclenché afin de permettre l'estimation des pondérations. A cet instant aussi débute le processus d'accommodation aux défauts, dans le but d'introduire le changement détecté au niveau de la commande et de réduire ainsi les dégradations du système. La structure de la commande est alors donnée par :

$$\tau = \begin{cases} (I - \text{diag}[H(t)])^{-1}(\tau_0 + \hat{f}_o(\theta, \dot{\theta}, t)) & \text{si un défaut est détecté} \\ \tau_0 & \text{si aucun défaut n'est détecté} \end{cases} \quad (\text{VI.32})$$

Cette structure de commande rentre dans le cadre de l'approche active des commandes tolérantes aux défauts. Il est important de signaler qu'une fois la commande corrigée, dans la plupart des cas, le défaut peut disparaître. Ainsi la phase d'accommodation ne sera plus nécessaire. Il est possible d'insérer alors un bloc de surveillance afin de prévenir d'une éventuelle disparition du défaut, dans le but d'arrêter le processus d'accommodation et de préparer le bloc de détection et d'estimation pour une nouvelle procédure de détection.

En supposant que des défauts composants et actionneurs apparaissent respectivement aux instants $t=2$ sec et $t=4$ sec. Des simulations effectuées sur MATLAB ont permis la vérification de la performance du système de commande tolérant aux défauts, présenté précédemment.

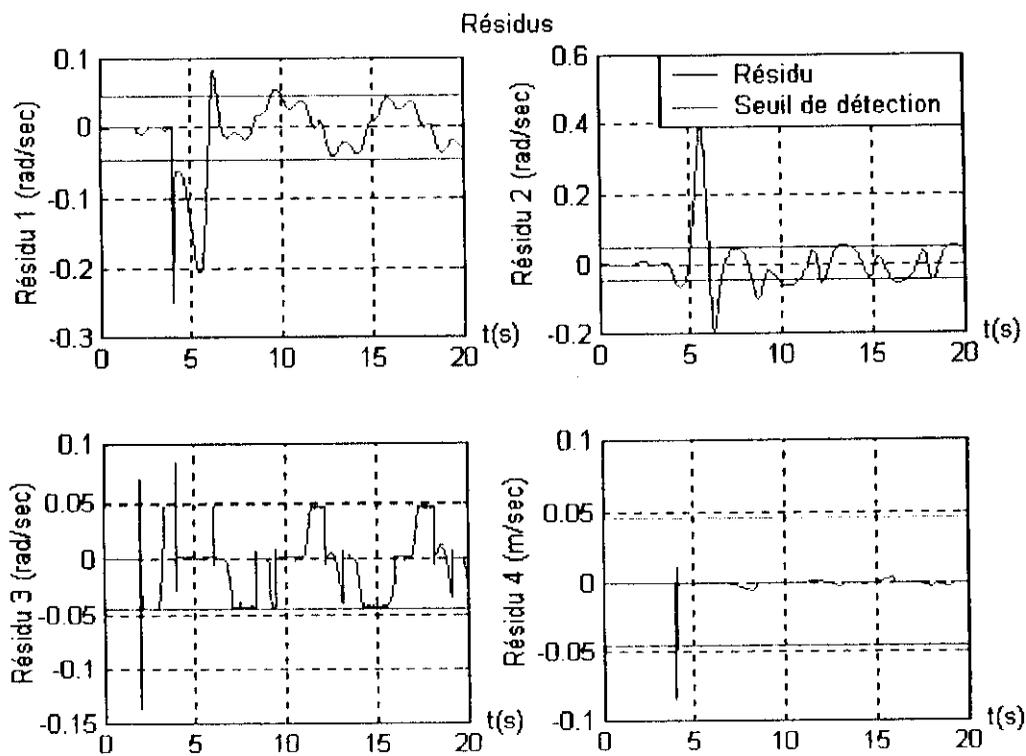


Figure VI.16 : Représentation des résidus.

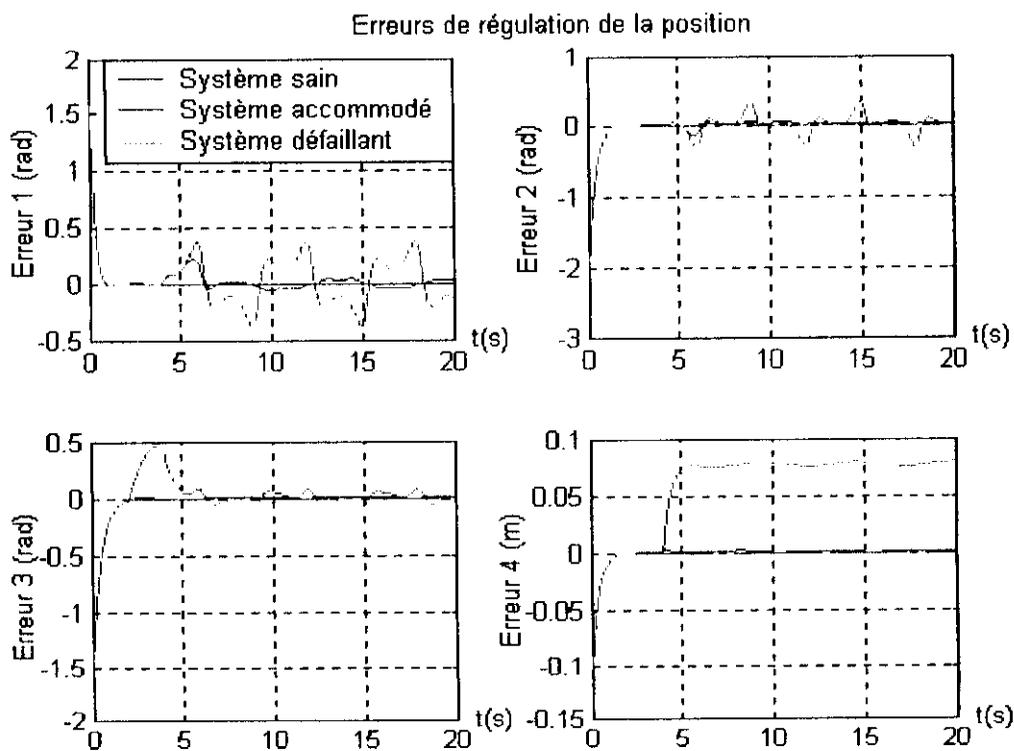


Figure VI.17 : Représentation des erreurs de poursuite de la position.

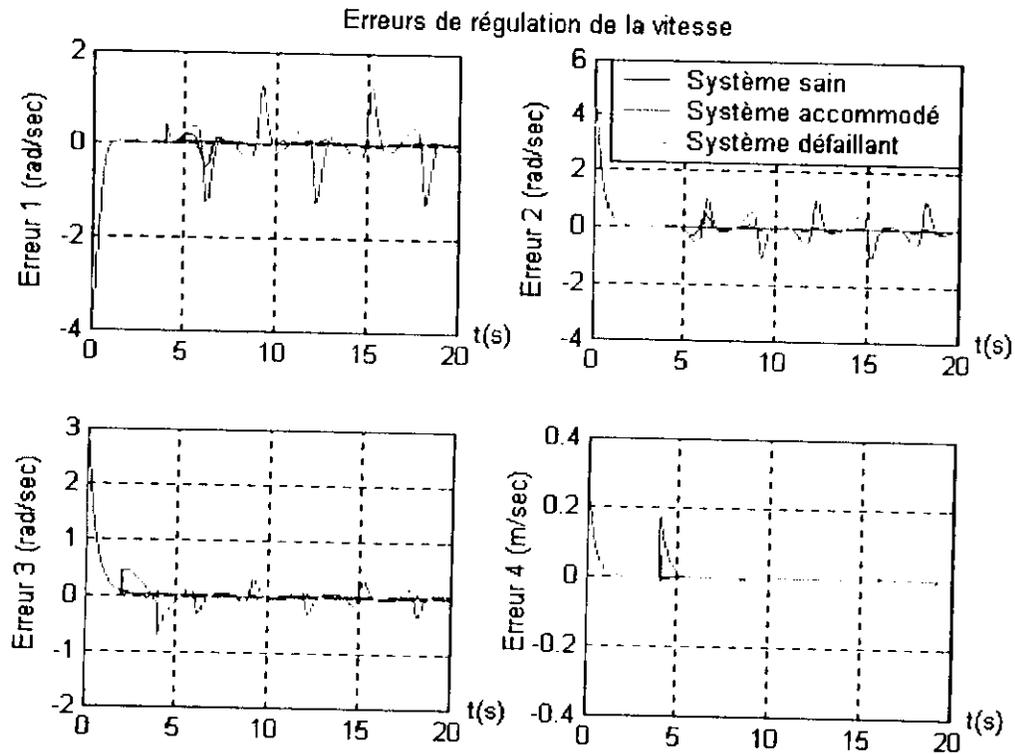


Figure VI.18 : Représentation des erreurs de poursuite de la vitesse.

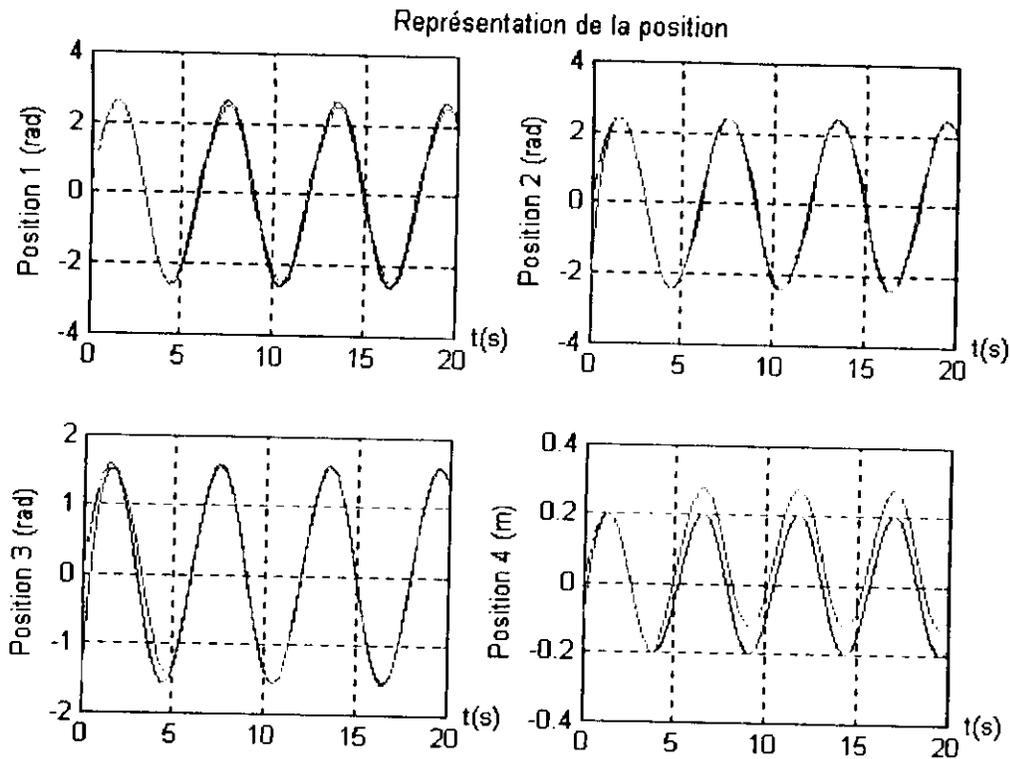


Figure VI.19 : Représentation des positions.

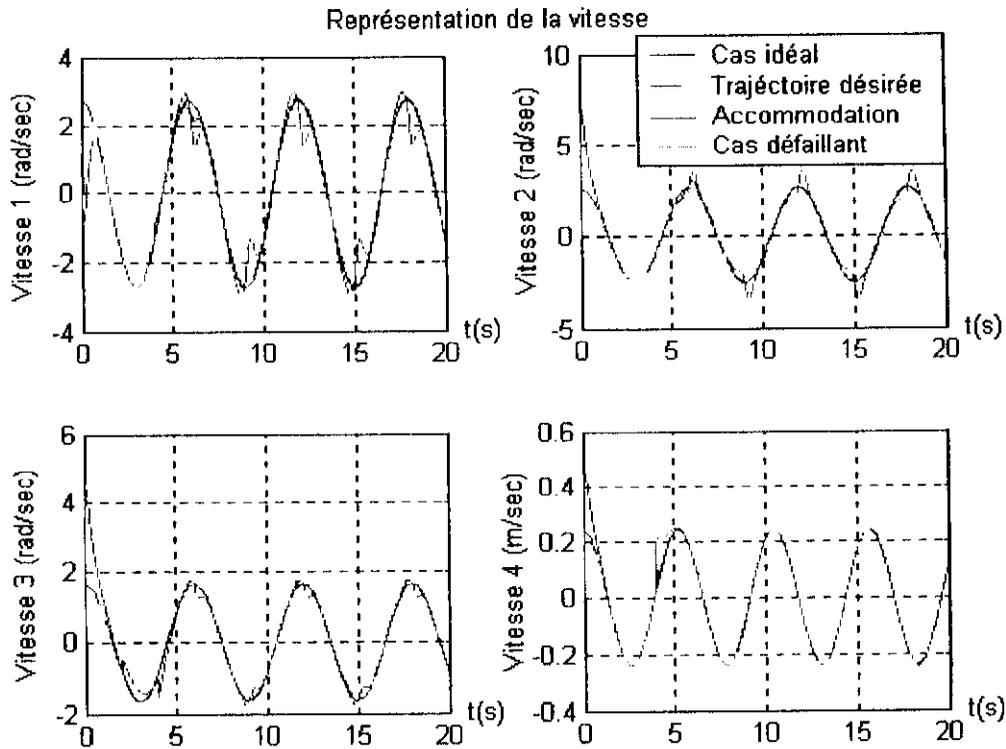


Figure VI.20 : Représentation des vitesses.

➤ **Interprétations et commentaires**

- ❖ Nous constatons, à travers les figures (VI.16)-(VI.20), que la méthode proposée donne des résultats satisfaisants. En effet, les défauts sont détectés, estimés et corrigés en un temps assez faible.
- ❖ Les performances du système de commande tolérant peuvent être appréciées au niveau des représentations des erreurs de poursuite des positions et vitesses articulaires pour les cas des systèmes sain, défaillant et accommodé. nous constatons qu'alors que les performances du système défaillant se dégradent remarquablement, celles du système accommodé sont maintenues très proches de celles du système sain. Néanmoins, pour certains états, la reconfiguration n'est pas parfaite.

VI.5 ACCOMMODATION AUX DEFAUTS PAR LA METHODE PROPOSEE DANS LE PARAGRAPHE (IV.6)

Soit le modèle du robot décrit précédemment, donné par l'équation dynamique suivante :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\theta, \tau) + \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \tau \quad (VI.33)$$

Où $\begin{cases} \theta = [\theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & x_4]^T \\ \tau = [\tau_1 & \tau_2 & \tau_3 & \tau_4]^T \end{cases}$ et $F(\theta, \tau)$ englobe les défauts actionneurs et composants.

En posant: $X_1 = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad x_4]^T$ et $X_2 = [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3 \quad \dot{x}_4]^T$, alors le système (VI.33) devient:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = M^{-1}(\theta)(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) - \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) - F(\theta, \tau)) \end{cases} \quad (\text{VI.34})$$

Il est possible de réécrire le système (VI.34) sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = M^{-1}(\theta)(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) - \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)) - F_a(\theta, \tau) \end{cases} \quad (\text{VI.35})$$

Où $F_a(\theta, \tau) = M^{-1}(\theta)F(\theta, \tau)$

Nous allons donc appliquer la méthode proposée dans le paragraphe (IV.6) pour l'accommodation aux défauts. Le système de commande tolérant aux défauts est composé, de deux blocs: un bloc de détection et d'isolation des défauts et un bloc d'estimation et de compensation de ces derniers. La procédure est telle décrite dans ce paragraphe. Elle passe par deux étapes : la première est consacrée au calcul de la loi de commande nominale et la seconde à l'estimation et la compensation des défauts. Le bloc FDI utilisé est celui proposé dans le paragraphe (III.2.3.5). L'estimation des défauts s'effectue à l'aide de l'observateur de défauts défini par:

$$\begin{cases} \dot{z} = -Nz + N^2 X_2 + NM^{-1}(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)) \\ \hat{F}_a = z - NX_2 \end{cases} \quad (\text{VI.36})$$

N étant une matrice définie positive, elle est choisie de manière à assurer une convergence très rapide de la valeur estimée du défaut vers sa vraie valeur.

La procédure de compensation consiste à ajouter à la commande nominale un terme additif, donné par l'équation (IV.25), dès l'apparition du défaut.

Des simulations ont été effectuées sur MATLAB afin de valider l'approche, les résultats sont illustrés sur les figures (VI.21)-(VI.23). En négligeant les incertitudes, nous avons introduit des défauts actionneurs à l'instant $t=5$ sec. Par la suite, nous avons étudié le système de commande tolérant aux défauts en présence d'incertitudes de modélisation mais en absence de défauts. Il faut noter que des résultats similaires sont obtenus en introduisant des défauts composants.

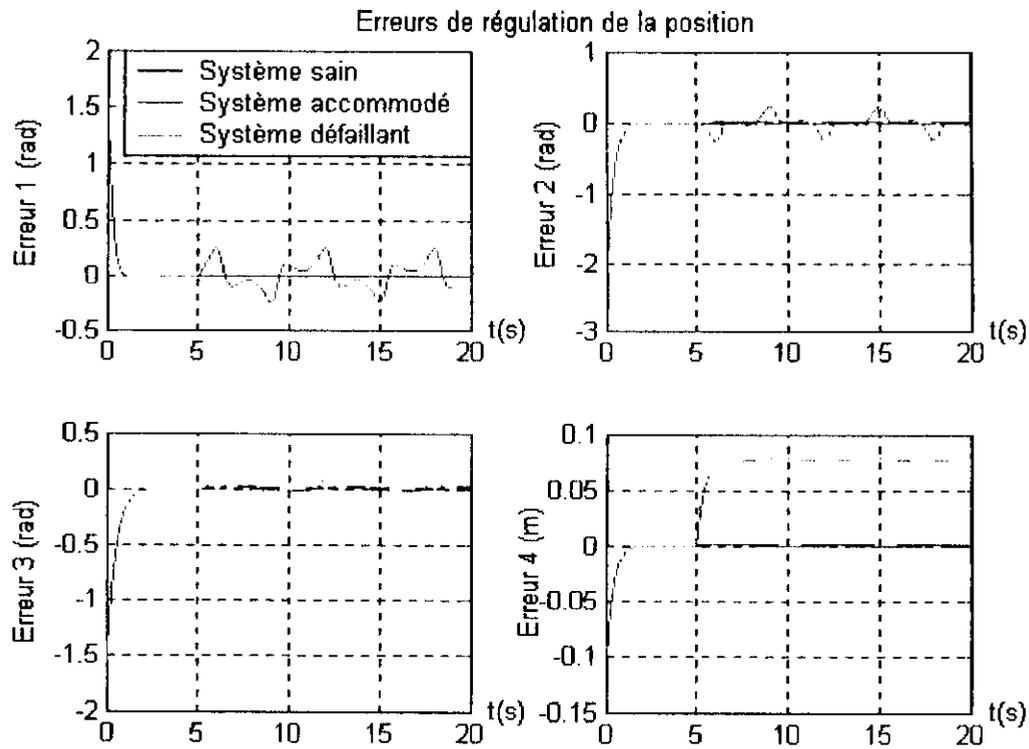


Figure VI.21 : Erreurs de régulation des positions : Défauts actionneurs à t=5 sec.

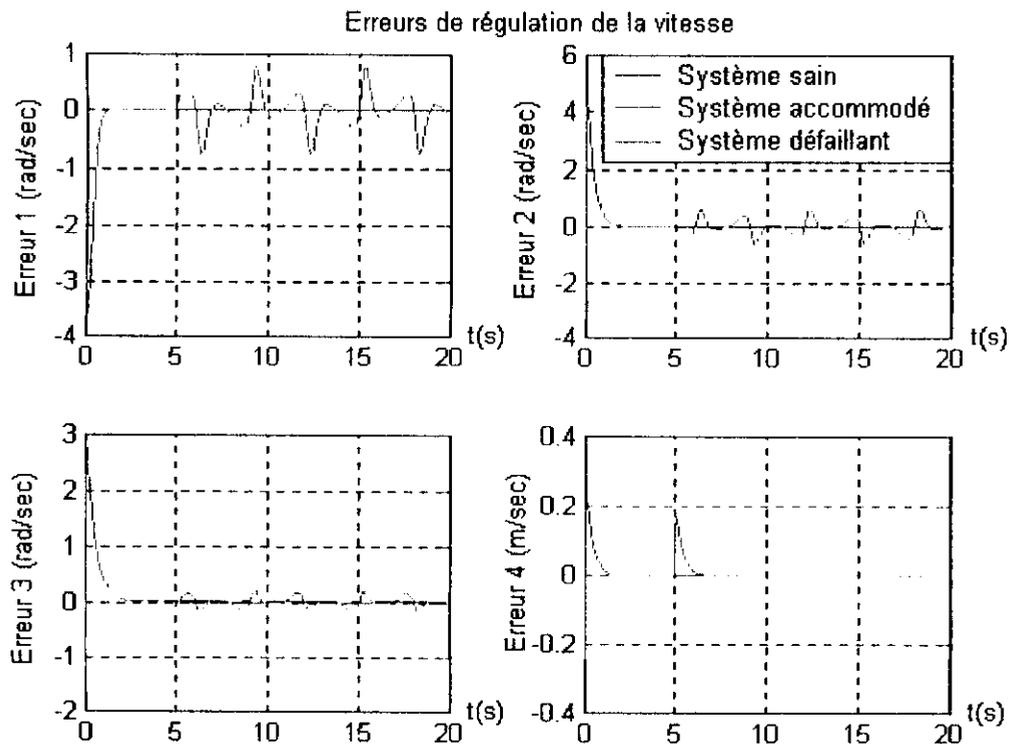


Figure VI.22 : Erreurs de régulation des vitesses: Défauts actionneurs à t=5 sec.

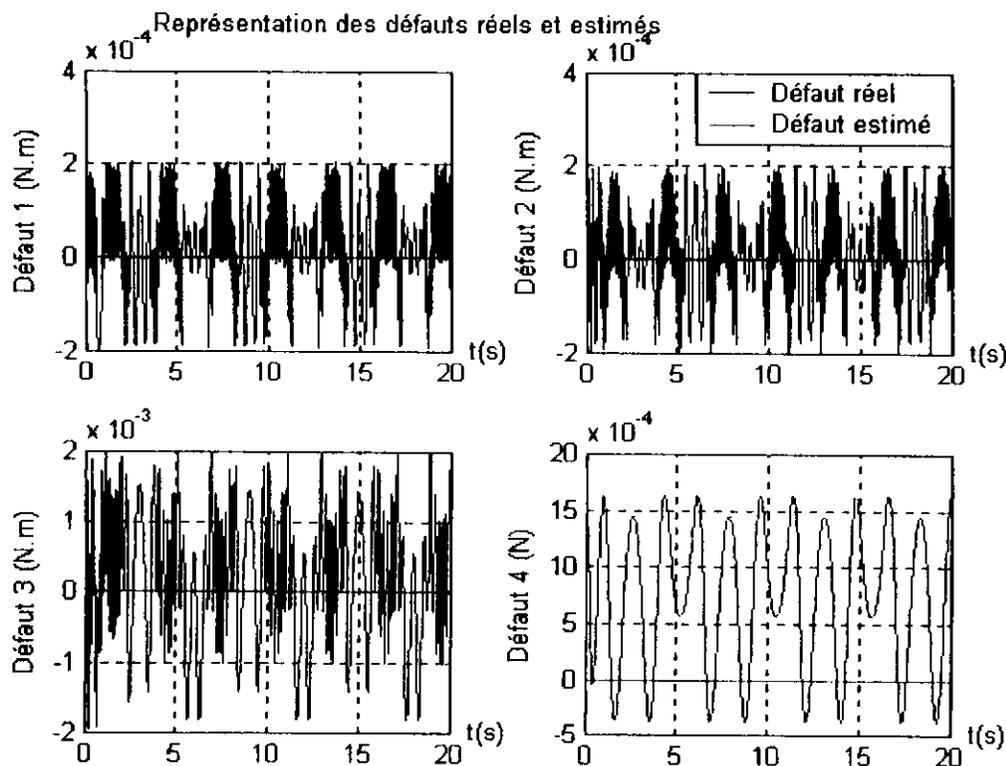


Figure VI.23 : Représentation des défauts: Absence de défauts et présence d'incertitudes.

➤ Interprétations et commentaires

- ❖ A travers les résultats des simulations effectuées, nous constatons qu'en absence de défauts et en négligeant les incertitudes de modélisation, les résidus sont parfaitement nuls. Par contre, dès l'apparition de défauts à $t=5$ sec, ils varient. Ainsi commence la procédure d'estimation des défauts et de reconfiguration de la loi de commande. Nous remarquons alors que les performances du système de commande sont maintenues (figures (VI.21), (VI.22)).
- ❖ La figure (VI.23), quant à elle, illustre les estimés des défauts en présence d'incertitudes de modélisation. Nous constatons que l'estimation est mauvaise, ce qui engendre des détections erronées et par conséquent des performances médiocres pour le système de commande tolérant aux défauts.

Il convient maintenant de proposer une amélioration au système de commande tolérant aux défauts précédent afin de minimiser l'influence des incertitudes de modélisation. Dans ce contexte, nous introduisons un seuil de détection dont la valeur est fonction de la borne supérieure des incertitudes, supposée connue. Les résultats des simulations sont alors représentés sur les figures ((VI.24)-(VI.26)) :

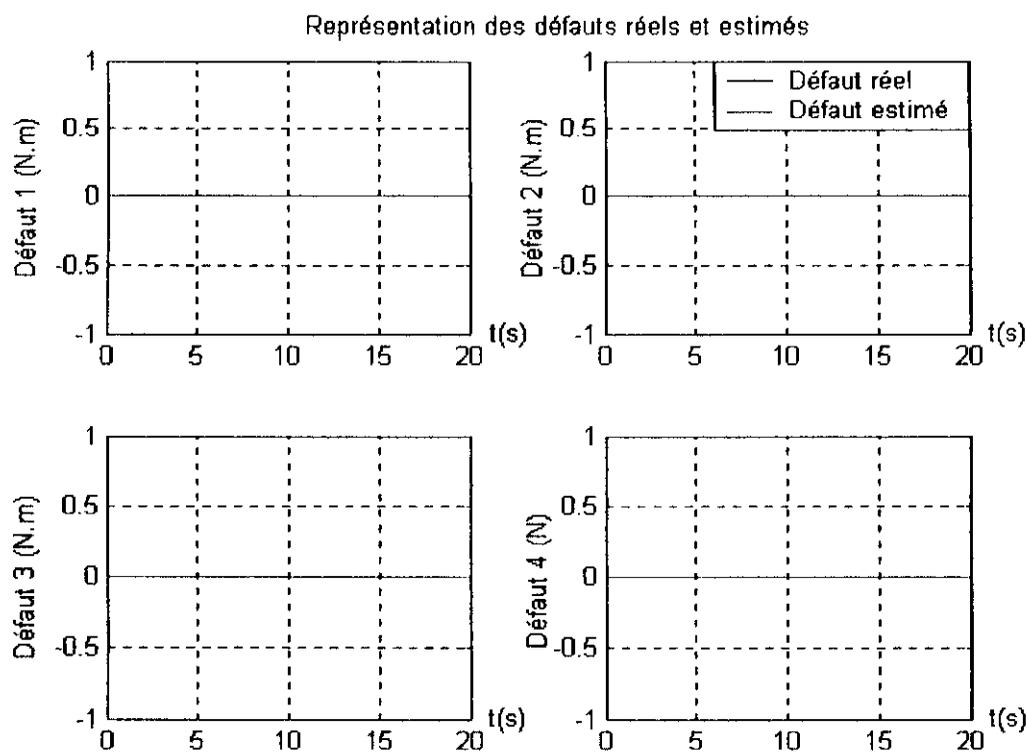


Figure VI.24 : Représentation des défauts : Absence de défauts et présence d'incertitudes.

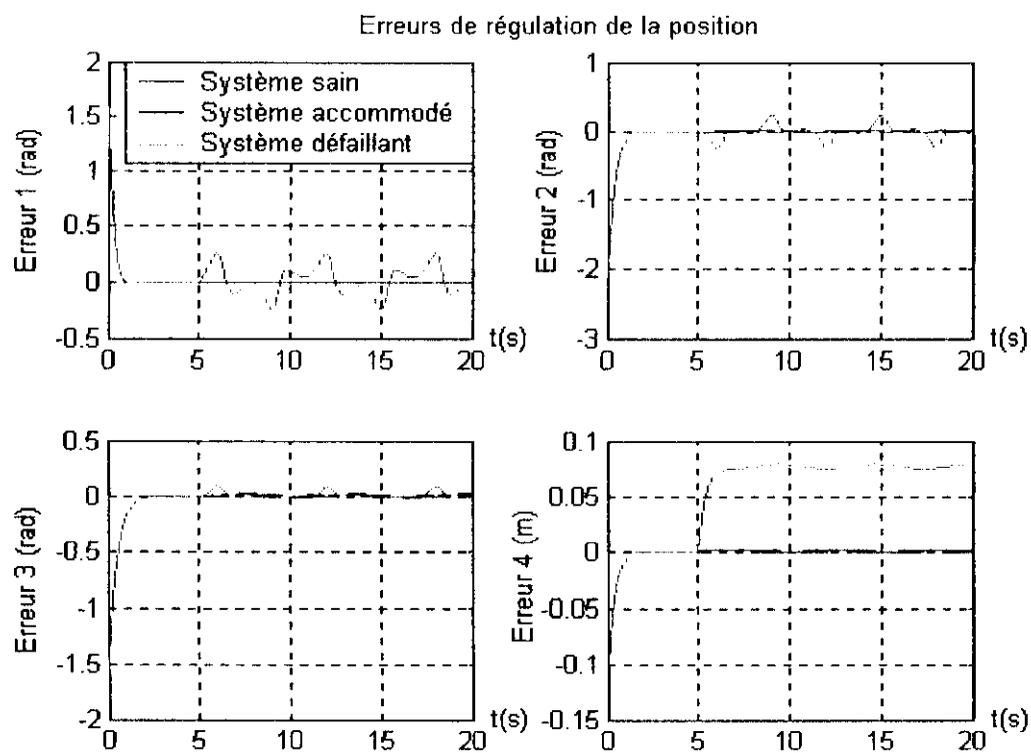


Figure VI.25 : Erreurs de régulation des positions: Présence de défauts et d'incertitudes.

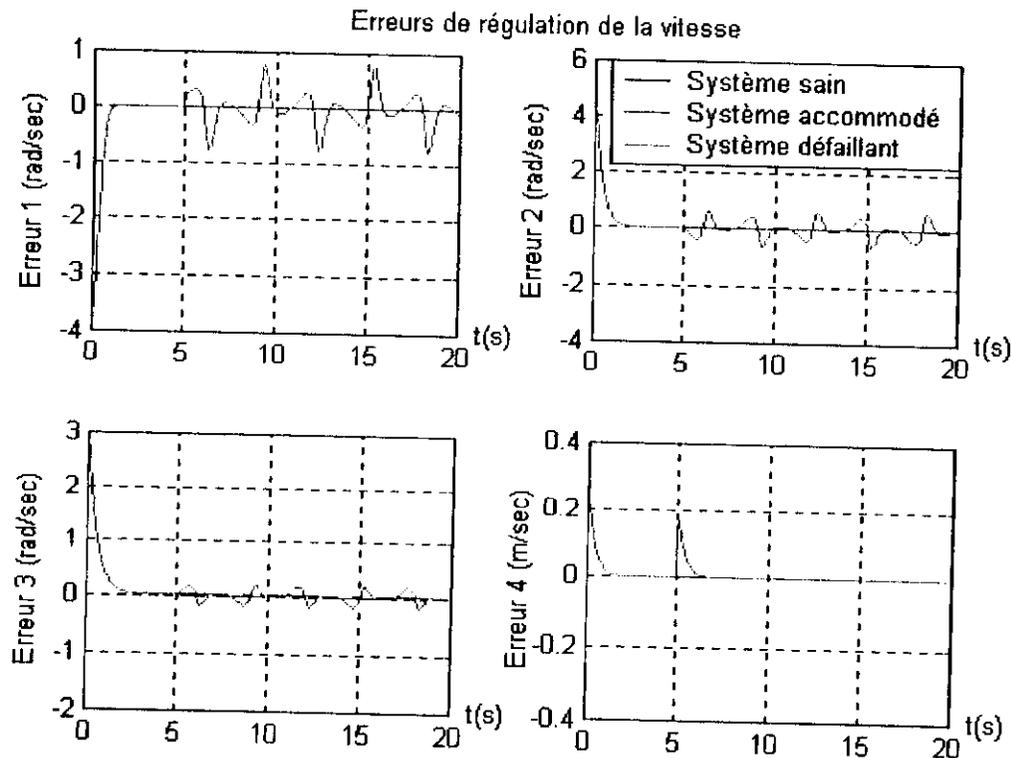


Figure VI.26 : Erreurs de régulation des vitesses:Présence de défauts et d'incertitudes.

➤ Interprétations et commentaires

- ❖ Nous constatons à travers les figures (VI.24) et (VI.26) que malgré la présence d'incertitudes de modélisation, l'estimation des défauts est satisfaisante. Les performances du système de commande sont maintenues.
- ❖ Il est à remarquer également que le système de commande tolérant aux défauts est très performant, la correction de la loi de commande s'effectue en un temps très faible.

En associant le système de commande tolérant aux défauts précédent à un observateur par modes glissants (Annexe (D.2)). Ce dernier est déterminé de manière à garantir la robustesse des états vis-à-vis des incertitudes et des défauts, supposés bornés et dont la borne supérieure est connue. Les résultats des simulations indiquent des performances similaires aux cas précédents. Ainsi, les figures (VI.27) et (VI.28) illustrent les erreurs de régulation des positions et des vitesses pour le cas des systèmes sain, défaillant et accommodé lors de l'apparition de défauts actionneurs à $t=5$ sec et en présence d'incertitudes de modélisation. Nous constatons que la prise en compte des défauts s'effectue d'une manière rapide et efficace.

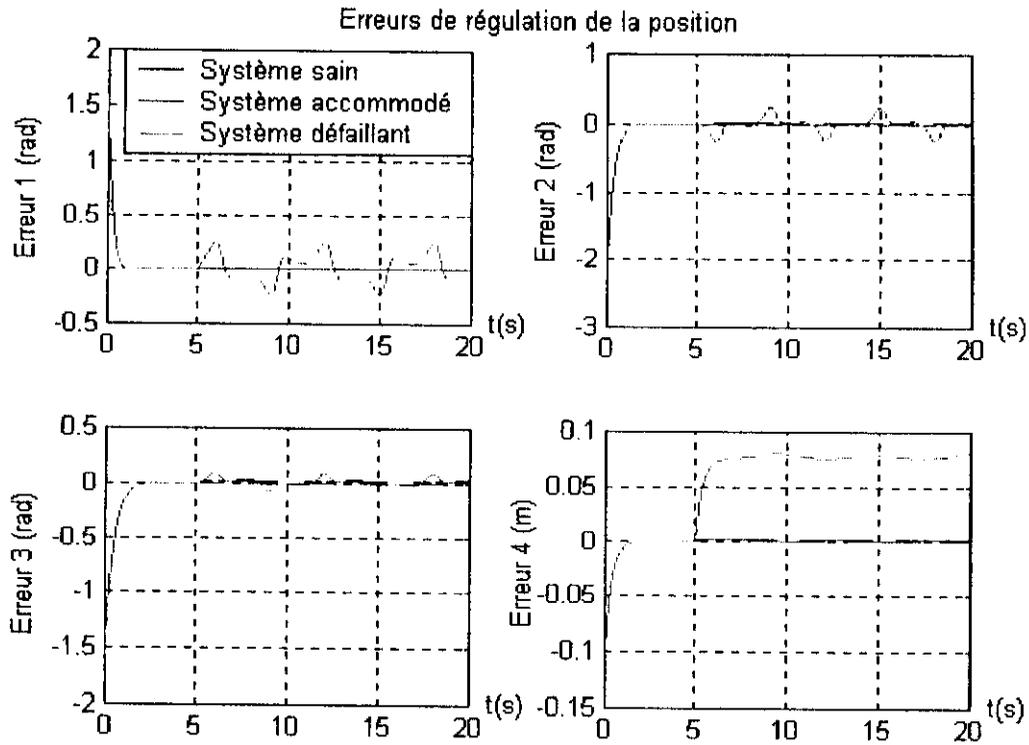


Figure VI.27 : Erreurs de régulation des positions:Présence de défauts et d'incertitudes.

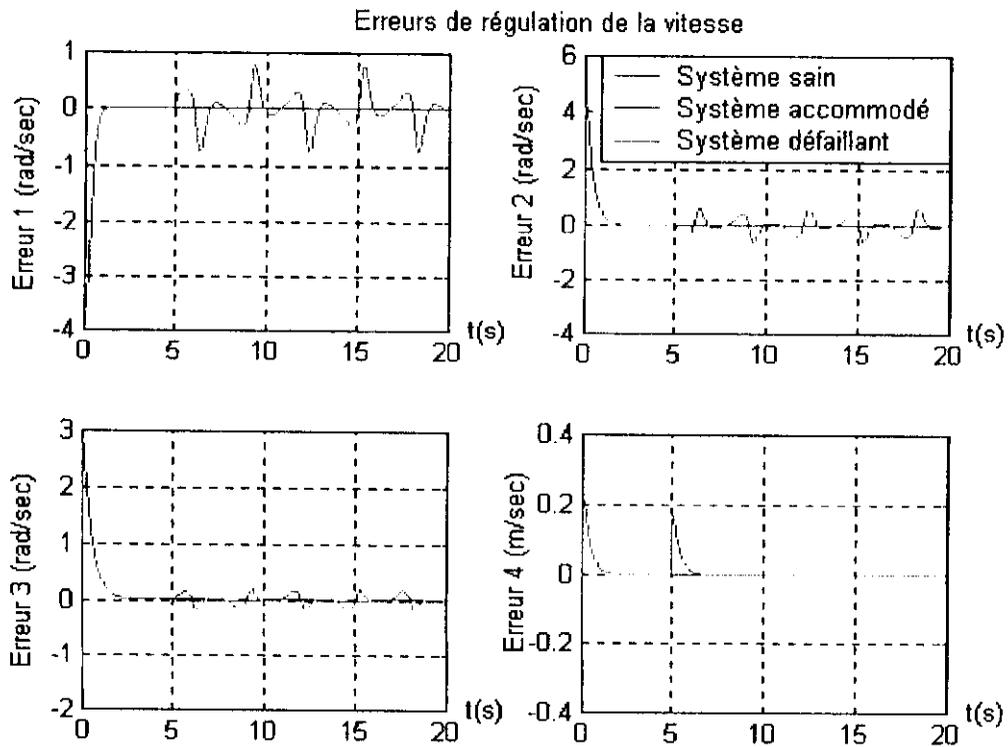


Figure VI.28 : Erreurs de régulation des vitesses : Présence de défauts et d'incertitudes.

VI.6 COMPARAISON ENTRE LES DEUX APPROCHES

Les deux méthodes introduites dans ce chapitre, pour la détection des défauts et la reconfiguration de la loi de commande d'un robot SCARA à quatre degrés de liberté, utilisent un même mécanisme de reconfiguration. Il s'agit d'une commande tolérante du type active, dont le principe consiste à compenser l'effet des défauts par un terme additif à la commande nominale. Cependant, elles diffèrent dans la procédure d'estimation des défauts. En effet, la première utilise des réseaux de neurones à base radiale. Alors que la seconde estime les défauts à l'aide d'un simple observateur de défauts dont la dynamique dépend de la matrice N , définie positive.

A travers les différentes simulations, nous avons constaté que les deux approches présentent des résultats satisfaisants. Elles permettent effectivement une bonne surveillance du système, du moment que l'apparition d'un défaut est détectée rapidement et efficacement. Les incertitudes de modélisation sont prises en compte grâce à l'introduction d'un seuil de détection, fonction de la borne supérieure de celles-ci. Nous avons constaté également, que la stabilité et les performances du système de commande sont maintenues en présence de défauts, la commande étant reconfigurée à temps.

Néanmoins, il est important de noter que la seconde approche présente de meilleures performances. En effet, le temps de reconfiguration est plus faible, ce qui constitue un point très important pour la commande tolérante active. Mais aussi, la compensation des défauts est meilleure.

L'association de l'observateur de défauts à un observateur par modes glissants, qui a donné des résultats satisfaisants, présente l'avantage de minimiser le nombre de capteurs à utiliser pour le processus de détection et de reconfiguration. Ce dernier point constitue aussi un critère de performance du système de commande tolérant aux défauts.

VI.7 CONCLUSION

Ce chapitre s'est intéressé à l'utilisation des techniques de détection des défauts au profit de la commande tolérante aux défauts, pour les robots manipulateurs. Nous nous sommes intéressés, plus particulièrement, au robot SCARA à quatre degrés de liberté. Dans un premier temps, nous avons présenté le modèle du robot ainsi que les différents défauts agissant sur les robots manipulateurs. Notre intérêt a porté essentiellement sur les défauts actionneurs et composants, dont la dynamique dépend respectivement de la commande et des états du système. Nous avons alors appliqué deux approches permettant la détection des défauts et la reconfiguration de la loi de commande. Bien que les simulations effectuées dans les deux cas aient donné des résultats satisfaisants, la seconde approche s'est avérée plus performante.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la détection et l'isolation des défauts par les méthodes à base d'observateurs ainsi que sur la commande tolérante aux défauts.

Nous avons, dans un premier temps, présenté la procédure de détection et d'isolation des défauts à base de modèle mathématique qui revient à un problème de génération de résidus (FPRG). Notre intérêt a porté essentiellement sur les méthodes à base d'observateurs. Nous avons mis en évidence, dans le deuxième chapitre, le principe de ces dernières et nous avons introduit une technique récente et qui s'avère intéressante. Celle-ci est basée sur des concepts géométriques.

Bien qu'à l'heure actuelle, les méthodes de détection et d'isolation des défauts des systèmes linéaires aient connu un développement important, l'extension au cas non linéaire demeure difficile. Les méthodes de linéarisation ont constitué une première alternative à ce problème mais elles donnent lieu à de fausses alarmes dues aux erreurs engendrées par la linéarisation. Une seconde alternative consiste à utiliser des observateurs tenant compte du caractère non linéaire des systèmes. Nous avons alors présenté dans le troisième chapitre quelques observateurs dédiés au diagnostic des systèmes non linéaires. Nous nous sommes intéressés, en particulier, aux observateurs par modes glissants, en raison de leurs propriétés remarquables. Dans ce contexte, nous avons proposé une méthode de génération de résidus à l'aide d'un observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants. Celle-ci s'est avérée très intéressante car elle répond aux exigences d'un problème FPRG, aussi bien pour les systèmes linéaires que pour les systèmes non linéaires.

En parallèle au problème de détection et de localisation des défauts, la commande tolérante aux défauts, qui a fait l'objet du chapitre (IV), constitue aujourd'hui un domaine d'intérêt des chercheurs. Elle a pour but de maintenir la stabilité et les performances des systèmes en présence de défauts. A cet effet, diverses méthodes ont été proposées. Nous avons distingué trois approches : l'approche passive, l'approche adaptative et l'approche active. C'est cette dernière qui fait l'objet des études actuelles dans le domaine. Elle est basée sur le principe de reconfiguration et de correction de la loi de commande dès l'occurrence du défaut. C'est dans ce contexte que nous avons vu comment il est possible, à l'aide de l'observateur de défauts proposé dans le chapitre (III), de compenser l'effet des défauts.

Les deux derniers chapitres de ce projet ont eu pour but de sensibiliser sur la problématique du diagnostic des défauts. Ce dernier est en effet un domaine très vaste et touche à différentes applications. Ainsi, nous nous sommes intéressés dans le cinquième chapitre, au diagnostic de la machine asynchrone. Suite aux avantages considérables qu'elle offre, celle-ci a intégré de nombreuses applications industrielles. La nécessité d'effectuer un bon diagnostic des défauts de la MAS se voit prendre de l'ampleur. Nous avons proposé d'appliquer les méthodes à base d'observateurs, plus particulièrement l'observateur d'Edwards, Spurgeon et Patton ainsi que l'observateur de défauts associé à un observateur par modes glissants. Nous avons constaté que ces méthodes sont efficaces pour la génération de résidus robustes, permettant une détection et une localisation des défauts engendrant des variations des grandeurs statoriques et rotoriques. Néanmoins, elles présentent des limitations dues au fait qu'il n'est pas possible de distinguer entre les variations normales des résistances et celles engendrées par l'apparition d'un défaut. Une analyse des résidus dans le domaine fréquentiel ou temporel s'avère donc nécessaire. Cependant, cette application nous a permis de valider les approches citées précédemment et en particulier l'observateur de défauts proposé.

Dans le chapitre (VI.), nous avons abordé le problème de détection des défauts et de reconfiguration des lois de commande pour les robots manipulateurs. A travers les simulations effectuées sur le modèle du robot industriel SCARA à quatre degrés de liberté, nous avons constaté que les approches proposées donnent des résultats satisfaisants.

Comme perspectives, nous suggérons, tout d'abord, une amélioration des méthodes proposées, dans le sens de les rendre plus générales. Nous souhaitons qu'elles puissent être appliquées à d'autres systèmes, en particulier dans le domaine industriel.

D'autre part, en raison des propriétés intéressantes qu'offre l'approche géométrique, nous espérons que des recherches soient orientées dans ce sens.

Nous proposons également de tester les différentes approches, appliquées à la MAS et au robot SCARA, sur des données réelles et d'analyser les résidus générés dans le cas de la machine asynchrone d'un point de vu temporel ou fréquentiel.

BIBLIOGRAPHIE

- [ADJ94] K. Adjallah, D. Maquin et J. Ragot, "Non-Linear Observer-based Fault Detection", *3rd IEEE Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, August, 24-26, 1994.
- [ALE99] A. Alessandri, T. Hawkinson, A.J. Healey et G. Veruggio, "Robust Model-Based Fault Diagnosis for Unmanned Underwater Vehicles using Sliding Mode Observers", *11th International Symposium on Unmanned Under watered Submersible Technology*, 1999.
- [BAR03] L. Barazane, "Application des Systèmes Emergents à la commande d'un Moteur Asynchrone", *Thèse de Doctorat, Option Automatique, Ecole Nationale Polytechnique*, Alger, Novembre 2003.
- [BLA01] M. Blanke, M. Staroswiecki et N.E. Wu, "Concepts and Methods in Fault-tolerant Control", *Tutorial at American Control Conference*, June 2001.
- [BUC01] G. Buche, "Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone en Environnement Temps Réel Matlab/Simulink", *Mémoire en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur, Spécialité Automatismes Industriels, Centre National Des Arts et Métiers, Centre Régional de Grenoble, C.U.E.F.A, Mars 2001*.
- [CAR99] A.J.M. Cardoso, A.M.S. Mendes et S.M.A. Cruz, "The Park's Vector Approach: New Developments in On-Line Fault Diagnosis of Electrical Machines, Power Electronics and Adjustable Speed Drives", *SDEMPED'99, Gijon, Spain*, pp. 89, 97, September 1999.
- [CHA03] M. Chakir, "Sur le diagnostic des systèmes physiques", *Mini-Projet, 1^{ère} année PG Automatique-Option Robotique, ENP, Alger*, 2003.
- [CHR99] C. Christophe, V. Cocquempot et M. Staroswiecki, "Robust Residual Generation for Induction Motor Using Elimination Theory", *SDEMPED'99, Gijon, Spain*, pp. 551-556, September 1999.
- [CLA75] R. N. Clark et al, "Detection Instrument Malfunctions in Control Systems", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.AES-11, 1975.

- [CLA79] R. N. Clark, "The Dedicated Observer Approach to Instrument Fault Detection", *Proceedings of the 18th IEEE Conference on Decision and Control, Fort Lauderdale, FL, USA, December 1979.*
- [CRU99] S.M.A. Cruz et A.J.M. Cardoso, "Rotor Cage Fault Diagnosis in Voltage Source Inverter-Fed Induction Motors, by the extended Park's Vector Approach", *SDEMPED'99, Gijon, Spain, pp. 105-109, September 1999.*
- [DEP00] C. De Persis et A. Isidori, "On the observability codistributions of a nonlinear system", *Systems & Control Letters*, 40:297-304, 2000.
- [DEW97] C. Canuda De Wit et S. S. Ge, "Adaptive Friction Compensation for Systems with Generalized Velocity/Position Friction Dependency," *IEEE Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control*, pp. 2465-2470, 1997.
- [DEW00a] C. Canuda De Wit, "Modélisation, Control Vectoriel et DTC , Commande des Moteurs Asynchrones 1", *Editions Hermès Science*, 2000.
- [DEW00b] C. C De Wit, "Optimisation, Discrétisation et Observateurs, Commande des Moteurs Asynchrone 2", *Editions Hermès Science*, 2000.
- [EDW00] C. Edwards, S. Spurgeon et R. Patton, "Sliding mode observers for fault detection and isolation", *Automatica*, Vol.36, pp.541-553, 2000.
- [FAN03] C. Fantuzzi, C. Secchi et A. Visioli, "On the Fault Detection and Isolation of Industrial Robot Manipulators", *IFAC Safe Process*, 2003.
- [FLO02] T. Floquet, J. P. Barbot et W. Perruquetti, "Observation en temps fini du flux de la machine asynchrone: modes glissants d'ordre 2 et indices d'observabilité", *Conférence Internationale Francophone d'Automatique*, Nantes, Juillet 2002.
- [FLO04] T. Floquet, J.P. Barbot, W. Perruquetti et M. Djemai, "On the Robust Fault Detection Via a Sliding Mode Perturbation Observer", *A paraître dans E.J.C.*, 2004.
- [FRA90] P.M Frank, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results," *Automatica*, Vol.26, No.3, pp.459-474, 1990.
- [HAM95] Y. Hamed, "Contribution à la surveillance et au diagnostic des machines électriques", *Thèse de Doctorat, Département du Génie Electrique, Ecole Doctorale SPI-EEA de Lyon*, Juillet 1995.
- [HEI92] W.L. Heimerdinger et C.B. Weinstock, "A Conceptual Framework for System Fault Tolerance", *Technical Report CMU/SEI-92-TR-33*, October 1992.

- [HEN99] H. Henry, "Diagnostic et contrôle de cohérence des systèmes multivariés incertains", *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I*, Novembre 1999.
- [HUO01] Y. Huo, P. A. Ioannou et M. Mirmirani, "Fault-Tolerant Control and Reconfiguration for High Performance Aircraft: Review", *CATT Technical Report, Air Force Office of Scientific Research*, 2001.
- [ISE84] R. Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods", *Automatica*, Vol. 20, pp. 387-404, 1984.
- [JAM03] H. Jamouli, "Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et le commande tolérante aux défauts", *Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique, Université Henri Poincaré, Nancy*, Décembre 2003.
- [JOI02] C. Join, "Diagnostic des systèmes non linéaires, Contribution aux méthodes de découplage", *Thèse de Doctorat, Spécialité Automatique, Université Henri Poincaré, Nancy*, Novembre 2002.
- [KAS00] A. Kasmî et D. Laouadi, "Approche discrète de la commande par mode de glissement d'une machine asynchrone alimentée en tension avec orientation du champ", *Projet de Fin d'Etudes, Département du Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger*, Juin 2000.
- [KER99] A. Kerboua, "Commandes et Observateurs par Modes de Glissement : Application sur la Machine Asynchrone", *Thèse de Magister, Département du Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger*, 1999.
- [KME02] V.M. Kmelnsky, "Automated On-Line Diagnosis and Control Configuration In robotic Systems Using Model Based Analytical Redundancy", *Master of Science in Mechanical Engineering, Worcester Polytechnic Institute*, Janvier 2002.
- [LAL03] T.M. Laleg, "Diagnostic des défauts dans les systèmes physiques : Application à la Machine Asynchrone", *Mini-Projet ,4^{ème} Année, Spécialité Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger*, 2003.
- [LAL04] T.M. Laleg, M. Tadjine et M.S. Boucherit, "Diagnostic des défauts dans les systèmes physiques : Application à la Machine Asynchrone", *3^{ème} conférence sur le Génie Electrique CGE'03, Ecole Militaire Polytechnique, Alger*, Février 2004.
- [LEU02] M.L. Leuschen, I.D. Walker et J.R. Cavallaro, "Nonlinear Analytical Redundancy for Fault Detection", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002.

- [LOO01] T. F. Lootsma, "Observer-based Fault Detection and Isolation for Nonlinear systems", *Thèse de Ph.D, Department of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2001.*
- [MAQ00] D. Maquin et J. Ragot, "Diagnostic des systèmes linéaires", *Hermès Science Europe, 2000.*
- [MAS86] M.A. Massoumnia, "A Geometric Approach to Synthesis of failure detection filters", *IEEE Transaction on Automatic Control*, 31(9): 839-846, 1986.
- [MEZ00] A. Mezhoud, "Détection et Localisation des Pannes dans les Systèmes de Commande : Approche à base d'observateurs", *Thèse de Magister, ENP, Alger, 2000.*
- [MOR99] S. Moreau, J.C. Trigeassou, G. Champenois et J.P. Gaubert, "Diagnosis of Induction Machines: a procedure for electrical fault detection and localization", *SDEMPED '99, Gijon, Spain*, pp. 225-229, September 1999.
- [NOU00] H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin et D. Theilliol, "Fault tolerant control in dynamic systems: Application to a winding machine", *IEEE Control system Magazine*, 20(1), 33-49, 2000.
- [OUC04] N. Oucief, "Diagnostic à base d'observateurs, de défauts dans les systèmes de commande : Application au pendule inversé", *Thèse de Magister, EMP, Alger, 2004.*
- [PAR96] C.J.J. Paredis et P.K. Khosla, "Designing Fault Tolerant Manipulators: How Many Degrees-of-Freedom?", *The International Journal of Robotics Research*, 1996.
- [PAT91] R.J. Patton, "Fault Detection and Diagnosis in Aerospace Systems using Analytical Redundancy", *Computing & Control Engineering Journal*, Vol.2, Issue:3, pp.127-136, 1991.
- [PAT92] R.J. Patton et J. Chen, "Robust Fault Detection of Jet Engine Sensor Systems Using Eigenstructure Assignment", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.15, No.6, pp.1491-1497, 1992.
- [PAT97] R.J. Patton, "Fault tolerant control: The 1997 situation (survey)", *IFAC SAFEPROCESS'97, Hull, UK, Aout 26-28, Vol. 2, pp.1033-1055, 1997.*
- [POL97] M.M. Polycarpou, A.T. Vemuri et A.R. Ciric, "Nonlinear Fault Diagnosis in Differential Algebraic Systems", *IFAC SAFEPROCESS'97, 1997.*
- [RAZ03] H. Razik et G. Didier, "Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone", *Université Henry Poincaré, Nancy 1, 7 Janvier 2003.*

- [REI99] A. Reiller, "Analyse et maintenance des automatismes industriels, cours, exercices et sujets d'examens résolus", *Ellipses*, 1999.
- [SAU03] D. Sauter, I. Jamouli et J.Y. Keller, "Actuator fault compensation for a winding machine", *Symposium on automation mineral and metal processing*, Chine, 2003.
- [SCH99] E. Scheffer, "Diagnostic des machines asynchrones: Modèles et Outils paramétriques dédiés à la simulation et la détection de défauts", *Thèse de Doctorat, Université de Nantes*, Décembre 1999.
- [SCH90] R.J. Schilling, "Fundamentals of robotics: Analysis and Control", *Prentice Hall*, 1990.
- [TAN02] C. Tan et C. Edwards, "Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults", *Automatica*, Vol.36, pp.1815-1821, 2002.
- [THO99] W.T. Thomson, "A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques for Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors-Past Present and Future", *SDEMPED'99, Gijon, Spain*, pp. 3,16, September 1999.
- [TIN01] R. Tino et M.H. Terra, "Fault Detection and Isolation in Robotic Manipulators using a Multilayer Perceptron and a RBF Network Trained by the Kohonen's Self-Organizing Map", *SBA Control & Automação*, Vol. 12, no. 01, 2001.
- [TIN02] T. Tino et M.H. Terra, "Free-Swinging and Locked Joint Fault Detection and Isolation in Cooperative Manipulators", *European Symposium on Artificial Neural Networks*, Bruges, pp.513-518, Avril 2002.
- [VIS91] M.L. Visinsky, "Fault Detection and Fault Tolerance Methods for Robotics", *Master of Science, Rice University, Houston, Texas*, December 1991.
- [WIL76] A.S. Willskey, "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems", *Automatica*, Vol.12, pp. 601-611, 1976.
- [ZWI95] G. Zwingelstrein, "Diagnostic des défaillances, Théorie et pratique pour les systèmes industriels", *Edition Hermès*, 1995.
- [ZWI96] G. Zwingelstrein, "La Maintenance Basée sur la Fiabilité, Guide Pratique de la RCM", *Edition Hermès*, 1996.

ANNEXE A. NOTIONS DE GEOMETRIE DIFFERENTIELLE

➤ Dérivée de Lie

On appelle dérivée de Lie de la fonction scalaire $h(x)$, selon le champ de vecteurs f l'entité :

$$\begin{cases} L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) \\ L_g L_f h(x) = \frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} g(x) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Telles que, $f = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]^T$, $\frac{\partial h(x)}{\partial x} = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x_1} \quad \frac{\partial h(x)}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial h(x)}{\partial x_n} \right]$ et g est un champ de vecteurs. Les dérivées de Lie d'ordre k sont données par :

$$\begin{cases} L_f^k h(x) = \frac{\partial (L_f^{k-1} h(x))}{\partial x} f(x) \\ L_f^0 h(x) = h(x) \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

➤ Crochet de Lie

Soient $f(x)$ et $g(x)$ deux champs de vecteurs de \mathbb{R}^n . Le crochet de Lie est le nouveau champ de vecteurs \bar{f} , défini par:

$$\bar{f} = [f, g] = \frac{\partial g}{\partial x} f - \frac{\partial f}{\partial x} g \in \mathbb{R}^n \quad (\text{A.3})$$

Où $\frac{\partial g}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_i}{\partial x_1} & & \frac{\partial g_i}{\partial x_i} & & \frac{\partial g_i}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$ est une matrice jacobienne.

➤ Un difféomorphisme

Soient x et z deux vecteurs de \mathbb{R}^n . $z = \Phi(x)$ est un difféomorphisme global sur \mathbb{R}^n si $\Phi(x)$ est inversible et les fonctions vectorielles $\Phi(x)$ et $\Phi^{-1}(x)$ ont des dérivées partielles continues et de tout ordre (continuellement dérivable). Lorsque $\Phi(x)$ est définie dans un voisinage donné, on parle de difféomorphisme local.

➤ **Une variété différentielle**

Une variété différentielle de dimension p est un ensemble X , tel que :

$$X = \{x \in V / \Phi(x) = 0\} \quad (\text{A.4})$$

Où $\Phi(x)$ est une application différentiable de $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n-p}$.

➤ **Espace tangent**

L'espace tangent à X au point $x \in X$ est l'espace vectoriel:

$$T_x X = \text{Ker}[d\Phi(x)] \quad (\text{A.5})$$

La dimension de $d\Phi(x)$ est $n - p$ et celle de $\text{Ker}(d\Phi(x)) = p \quad \forall x \in V$.

➤ **Champ de vecteurs**

C'est une application qui à tout $x \in X$ fait correspondre $f(x) \in T_x X$.

➤ **Une distribution de champs de vecteurs**

C'est une application qui à tout point $x \in X$ fait correspondre le sous espace vectoriel $\Delta(x)$ de $T_x X$. Autrement dit, une distribution Δ est un ensemble de champs de vecteurs, tel que $\Delta = \text{span}\{f_1, f_2, \dots, f_d\}$.

➤ **Une distribution involutive**

Une distribution est dite involutive si et seulement si pour tout couple de champs de vecteurs f et g de Δ , alors $[f, g] \in \Delta$.

➤ **Une clôture involutive**

La clôture involutive $\bar{\Delta}$ d'une distribution Δ est la plus petite distribution involutive contenant Δ .

➤ **Une distribution non singulière**

Une distribution Δ , définie dans un ensemble X , est non singulière, s'il existe un entier d , tel que : $\dim(\Delta(x)) = d \quad \forall x$.

➤ **Une distribution singulière**

Une distribution est singulière si et seulement si elle n'a pas une dimension constante.

➤ **Une distribution invariante**

Une distribution Δ est dite invariante si $L_{g_i} \Delta \subset \Delta + \text{span}\{dh\}$, pour $i = 0, 1, \dots, m$.

➤ **Une codistribution**

La codistribution de la distribution $\Delta(x)$, notée Ω est définie par :

$$\Omega(x) = \Delta^\perp(x) = \left\{ \omega^*(x) \in (\mathbb{R}^n)^* ; \langle \omega^*(x), v(x) \rangle = 0 \quad \forall v(x) \in \Delta(x) \right\} \quad (\text{A.6})$$

Inversement, il est possible de construire à partir d'une codistribution $\Omega(x)$ une distribution notée $\Omega^\perp(x)$, telle que :

$$\Omega^\perp(x) = \left\{ v(x) \in \mathbb{R}^n ; \langle \omega^*, v \rangle = 0, \quad \forall \omega^* \in \Omega(x) \right\} \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Si } \Omega = \text{span}\{W(x)\}, \text{ alors } \Omega^\perp = \text{Ker}\{W(x)\} \quad (\text{A.8})$$

➤ **Une distribution complètement intégrable**

Soient $\Delta(x) = \text{span}\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_d(x)\}$ une distribution non singulière et $\Omega(x) = \Delta^\perp(x) = \left\{ \omega^*(x) \in (\mathbb{R}^n)^* ; \langle \omega^*(x), f(x) \rangle = 0 \quad \forall f(x) \in \Delta(x) \right\}$ sa codistribution de dimension $n - d$. Supposons $\omega_j = \frac{\partial \lambda_j}{\partial x}$, $j = 1, \dots, n - d$.

Si $\Delta^\perp = \text{span}\{d\lambda_1, d\lambda_2, \dots, d\lambda_{n-d}\}$ est une codistribution de $\Delta(x)$ (non singulière), alors la distribution $\Delta(x)$ est dite complètement intégrable.

➤ **Théorème A.1**

Une distribution non singulière est complètement intégrable.

➤ **Théorème A.2 : Théorème de Frobenius**

Une distribution Δ sur une variété X de dimension p est complètement intégrable \Leftrightarrow elle est involutive.

ANNEXE B. NOTIONS D'OBSERVABILITE POUR LES SYSTEMES LINEAIRES ET NON LINEAIRES

B.1 Systèmes linéaires

Soit le système linéaire, invariant dans le temps, décrit par les équations suivantes :

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

Où $x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état du système, $u \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur des entrées connues, associé à la matrice B et $y \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur des mesures.

➤ Observabilité

Le système (B.1) est dit observable si pour tout $t_0 \geq 0$ et $T > t_0$, il existe une fonctionnelle Φ telle que : $\Phi(T, u[t_0, T], y[t_0, T]) = x(T)$ où $u[t_0, T]$ et $y[t_0, T]$ désignent respectivement l'ensemble des valeurs de u et y sur l'intervalle $[t_0, T]$.

➤ Etats indistinguables

Deux états initiaux $x(t_0) = x_1$ et $x(t_0) = x_2$ sont dits indistinguables si $\forall t \geq t_0$, les sorties correspondantes $y_1(t)$ et $y_2(t)$ sont identiques, quelle que soit l'entrée admissible $u[t_0, t]$ du système. Si le système (B.1) possède deux états indistinguables, il n'est pas observable.

➤ Sous espace d'inobservabilité

On appelle sous espace d'inobservabilité du système (B.1) l'ensemble :

$$N = \bigcap_{k=0}^{n-1} \text{Ker} CA^k \quad (\text{B.2})$$

➤ Théorème B.1

Les conditions suivantes, concernant le système (B.1) sont équivalentes :

- ✓ Le système est observable.
- ✓ Le sous espace d'inobservabilité vérifie : $N = \{0\}$.
- ✓ Il n'existe pas d'états indistinguables.

➤ **Théorème B.2**

Soit la matrice dite d'observabilité suivante :

$$Q_0 = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Le système (B.1) est observable si et seulement si $\text{rang}(Q_0) = n$. On dit alors que la paire (A, C) est observable.

Si $\text{rang}(Q_0) < n$, le système (B.1) n'est pas observable ; on peut cependant effectuer une décomposition structurelle sur l'ensemble des variables d'états, de manière à exhiber des sous systèmes observables.

➤ **Sous espace invariant**

Δ est un sous espace invariant pour le système (B.1) si et seulement si : $A\Delta \subset \Delta$, on parle alors de sous espace vectoriel A -invariant.

➤ **Sous espace d'inobservabilité**

Le sous espace $Q \subset \mathbb{R}^n$ est un sous espace d'inobservabilité de la paire (A, C) , s'il existe deux matrices H et G , telles que Q soit un ensemble d'états inobservables du système :

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + GC)x \\ y = HCx \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

B.2 Système non linéaire

Soit le système non linéaire défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = g(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

Où $u \in \Omega \subset \mathbb{R}^m$ est la commande (Ω est l'ensemble des entrées admissibles), $y \in \mathbb{R}^p$ est la mesure et $x \in M \subset \mathbb{R}^n$ représente l'état interne du système (M est l'ensemble des états possible).

➤ **Notion d'indiscernabilité (indistinguabilité)**

Deux états initiaux $x(t_0) = x_1$ et $x(t_0) = x_2$ sont dits indistinguables si : $\forall t \geq t_0$, les sorties correspondantes $y_1(t)$ et $y_2(t)$ sont identiques, quelle que soit l'entrée admissible $u(t_0, t)$ du système. Notons $I(x_0)$ l'ensemble des états indistinguables de x_0 .

➤ **Observabilité**

L'état x_0 est dit observable si $I(x_0) = \{x_0\}$ et le système (B.5) est observable si $\forall x \in M, I(x) = \{x\}$. Il faut noter que l'observabilité d'un système ne signifie pas forcément que toute entrée distingue tous les points de M , contrairement aux systèmes linéaires.

➤ **Observabilité Locale**

L'état x_0 est dit localement observable si pour tout voisinage U de x_0 , $I_u(x_0) = \{x_0\}$; et le système (B.5) est dit localement observable si pour tout x de M , $I_u(x) = \{x\}$.

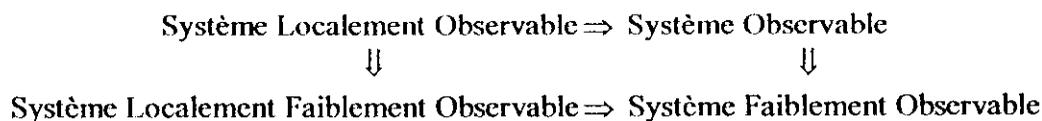
➤ **Observabilité faible**

L'état x_0 est dit faiblement observable s'il existe un voisinage V de x_0 , tel que $I(x_0) \cap V = \{x_0\}$ et le système (B.5) est dit faiblement observable si pour tout $x \in M$, $I(x) \cap V = \{x\}$. Cela signifie qu'un état est faiblement observable s'il est le seul indiscernable dans son voisinage. Ce concept affaiblit donc le concept d'observabilité globale.

➤ **Observabilité faible locale**

L'état x_0 est dit localement faiblement observable s'il existe un voisinage V de x_0 , tel que pour tout voisinage U de x_0 contenu dans V , $I(x_0) \cap U = \{x_0\}$; et le système (B.5) est dit localement faiblement observable si pour tout $x \in M$, $I_u(x) \cap V = \{x\}$.

Les quatre notions d'observabilité définies précédemment engendrent les implications suivantes :



➤ **Entrées universelles**

Une fonction d'entrée admissible $u(t)$ est dite universelle pour le système (B.5) sur l'intervalle $[t_0, t]$, si elle distingue tout couple d'états initiaux distinguables. Une entrée non universelle est dite singulière.

➤ **Sous espace invariant**

Soit le système non linéaire défini par :

$$\sum_{NL} \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + \sum_{i=1}^m g_i(x(t))u_i \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (B.6)$$

Δ est un sous espace invariant pour le système \sum_{NL} si et seulement si: $[g_i, \Delta] \subseteq \Delta \quad \forall i \in \{0, 1, \dots, m\}$. Nous parlerons alors de sous espace vectoriel g_i - invariant.

➤ **Espace observable**

L'espace observable γ_{obs} pour le système \sum_{NL} est l'espace linéaire sur \mathcal{R} des fonctions contenant h_1, h_2, \dots, h_p et toutes les répétitions des dérivées de Lie :

$$L_{X_j} L_{X_i} \dots L_{X_i} h_j \quad j \in \{1, 2, \dots, p\}, \quad k = \{1, 2, \dots\}, \quad \text{Avec } X_j, i \in k \text{ dans l'ensemble } \{f, g_1, \dots, g_m\}$$

ANNEXE C. MACHINE ASYNCHRONE

C.1 Paramètres de la machine

Les simulations ont été effectuées sur une machine définie par les paramètres suivants :

- Puissance nominale : 1.5 KW
- Tension nominale : 220/380 V
- Rendement nominal : 0.78
- Facteur de puissance nominal : 0.8
- Vitesse nominale : 1420 tr/min
- Fréquence nominale : 50Hz
- Résistance rotorique (R_r): 3.805 Ω
- Résistance statorique (R_s) : 4.850 Ω
- Inductance cyclique du stator (L_s): 0.274 H
- Inductance cyclique du rotor (L_r): 0.274 H
- Inductance mutuelle cyclique (L_m): 0.258 H
- Nombre de paires de pôles (p) : 2
- Moment d'inertie (j): 0.031 Kg.m²
- Coefficient de frottement (K_f) : 0.001136 Kg.m²/s

C.2 Modèle de la machine asynchrone

L'étude concerne une machine asynchrone, en cage d'écureuil, sous les hypothèses de fonctionnement suivantes :

- Circuit magnétique non saturé.
- La densité du courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs et on ne considère que le premier harmonique d'espace dans la distribution des forces magnétomotrices.

- A vitesse constante, la température à l'intérieur de la machine évolue très peu.

C.2.1 Dans le repère (d, q)

En choisissant comme variables d'états les courants statoriques selon les axes (d, q) , les flux rotoriques selon les axes (d, q) et la vitesse de rotation du rotor à savoir : $x = [I_{ds} \ I_{qs} \ \Phi_{dr} \ \Phi_{qr} \ \Omega]^T$. Et comme vecteur de commande la tension statorique selon les axes (d, q) : $u = [V_{ds} \ V_{qs}]^T$ et les variables de sorties, égales aux courants statoriques $y = [I_{ds} \ I_{qs}]^T$, alors le modèle d'état de la MAS sera donné par :

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

Où :

$$A(x) = \begin{bmatrix} -\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{L_f L_r} i_{sd} + p\Omega i_{sq} + \frac{L_m R_r}{L_f L_r} \Phi_{rd} + \frac{pL_m}{L_f} \Omega \Phi_{rq} \\ -p\Omega i_{sd} - \frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{L_f L_r} i_{sq} - \frac{pL_m}{L_f} \Omega \Phi_{rd} + \frac{L_m R_r}{L_f L_r} \Phi_{rq} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_{rd} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{sq} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_{rq} \\ \frac{pL_m}{jL_r} \Phi_{rd} i_{sq} - \frac{pL_m}{jL_r} \Phi_{rq} i_{sd} - \frac{K_f}{j} \Omega - \frac{C_r}{j} \end{bmatrix} \quad (C.2)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, L_f = L_r L_s - L_m^2 \quad \text{et} \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (C.3)$$

C.2.2 Dans le repère (α, β) , lié au stator.

Le modèle de la machine se met sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = A(X, U) \\ Y = CX \end{cases} \quad (C.4)$$

Où $X = [i_{\alpha} \ i_{\beta} \ \Phi_{\alpha r} \ \Phi_{\beta r} \ \Omega]^T$, $U = [V_{\alpha} \ V_{\beta}]^T = [V_1 \ V_2]^T$ et $Y = [i_{\alpha} \ i_{\beta} \ \Omega]^T$ représentent les vecteurs d'état de commande et de sortie de la machine.

$$A(X,U) = \begin{bmatrix} -\gamma x_1 + ax_3 + Kpx_4x_5 + eV_1 \\ -\gamma x_2 + ax_4 - Kpx_3x_5 + eV_2 \\ bx_1 - cx_3 - px_4x_5 \\ bx_2 - cx_4 + px_3x_5 \\ d(x_3x_2 - x_1x_4) - \frac{C_r}{j} - \frac{K_f}{j}x_5 \end{bmatrix} \text{ et } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (C.5)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad \gamma = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2}, \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad K = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}, \quad a = \frac{K}{T_r}, \quad b = \frac{L_m}{T_r}, \quad e = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad c = \frac{1}{T_r},$$

$$d = \frac{pL_m}{jL_r}$$

C.3 Modélisation de l'effet des défauts

En définissant les vecteurs défauts et perturbations respectivement par:

$$f = \begin{bmatrix} \Delta R_s \\ \Delta L_s \\ \Delta R_r \\ \Delta L_r \end{bmatrix} \text{ Tel que : } \begin{cases} \Delta R_s = R_s - R_{s0} \\ \Delta L_s = L_s - L_{s0} \\ \Delta R_r = R_r - R_{r0} \\ \Delta L_r = L_r - L_{r0} \end{cases} \quad (C.6)$$

Et

$$d = \begin{bmatrix} \Delta C_r \\ \Delta K_f \\ \Delta j \end{bmatrix}, \text{ tel que } \begin{cases} \Delta C_r = C_r - C_{r0} \\ \Delta K_f = K_f - K_{f0} \\ \Delta j = j - j_0 \end{cases} \quad (C.7)$$

Les distributions $E_d(X)$ et $E_j(X)$ sont déterminées en effectuant un développement de Taylor autour des valeurs nominales. On obtient alors :

$$E_d(X) = \left. \frac{\partial A(x,u)}{\partial d} \right|_{d=0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{j_0} & -\frac{x_5}{j_0} & -\frac{pL_m}{j_0^2 L_r} (x_2x_3 - x_1x_4) + \frac{C_{r0}}{j_0^2} + \frac{K_{f0}}{j_0^2} x_5 \end{bmatrix} \quad (C.8)$$

$$E_{f1}(X) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial R_s} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} x_1 \\ -\frac{1}{\sigma L_s} x_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.9})$$

$$E_{f2}(X) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial L_s} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\gamma_1 x_1 + a_1 x_3 + pK_1 x_3 x_5 + e_1 V_1 \\ -\gamma_1 x_2 + a_1 x_4 - pK_1 x_3 x_5 + e_1 V_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

$$E_{f3}(X) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial R_r} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} x_1 + \frac{L_m}{(L_s L_r - L_m^2) L_r} x_3 \\ -\frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} x_2 + \frac{L_m}{(L_s L_r - L_m^2) L_r} x_4 \\ \frac{L_m}{L_r} x_1 - \frac{1}{L_r} x_3 \\ \frac{L_m}{L_r} x_2 - \frac{1}{L_r} x_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.11})$$

$$E_{f4}(X) = \frac{\partial A(X, U)}{\partial L_r} \Big|_{f=0} = \begin{bmatrix} -\gamma_2 x_1 + a_2 x_3 + pK_2 x_3 x_5 + e_2 V_1 \\ -\gamma_2 x_2 + a_2 x_4 - pK_2 x_3 x_5 + e_2 V_2 \\ -\frac{L_m R_r}{L_r^2} x_1 + \frac{R_r}{L_r^2} x_3 \\ -\frac{L_m R_r}{L_r^2} x_2 + \frac{R_r}{L_r^2} x_4 \\ -\frac{pL_m}{jL_r^2} (x_3 x_2 - x_1 x_4) \end{bmatrix} \quad (\text{C.12})$$

Où :

$$\gamma_1 = -\frac{R_s L_r^2}{(L_s L_r - L_m^2)^2} - \frac{R_r L_m^2}{(L_s L_r - L_m^2) L_r}, \quad \gamma_2 = \frac{R_s (L_s L_r - L_m^2) - R_s L_s L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2} - \frac{R_r L_m^2 (2L_s L_r - L_m^2)}{(L_s L_r - L_m^2)^2 L_r^2}$$

$$\gamma_3 = \frac{2L_m R_s L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2} + \frac{2L_m R_r}{L_r (L_s L_r - L_m^2)} + \frac{2L_m^3 L_r R_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, \quad K_1 = -\frac{L_m L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, \quad K_2 = K_1$$

$$K_3 = \frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)} + \frac{2L_m^2}{(L_s L_r - L_m^2)^2}, \quad a_1 = \frac{L_m R_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}; \quad a_2 = -\frac{R_r L_m}{L_r^2 (L_s L_r - L_m^2)} - \frac{L_m R_r L_s}{L_r (L_s L_r - L_m^2)^2}$$

$$a_3 = \frac{R_r}{L_r(L_s L_r - L_m^2)} + \frac{2L_m^2 R_r}{L_r(L_s L_r - L_m^2)^2}; \quad e_1 = -\frac{L_r^2}{(L_s L_r - L_m^2)^2} \quad e_2 = \frac{1}{(L_s L_r - L_m^2)} \frac{L_r L_s}{(L_s L_r - L_m^2)^2};$$

$$e_3 = \frac{2L_m L_r}{(L_s L_r - L_m^2)^2}$$

C.4 Linéarisation du modèle de la MAS autour d'un point de fonctionnement

Soit le modèle de la MAS défini par le système d'équations (C.1), qu'il est possible de réécrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = g(X, U, d, f) \\ Y = CX \end{cases} \quad (C.13)$$

La linéarisation de ce dernier s'effectue par un développement de TAYLOR autour d'un point de fonctionnement donné par :

$$p = [X^*, U^*, d^*, f^*] \quad (C.14)$$

Par conséquent, le système se met sous la forme :

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U + E_d \Delta d + E_f \Delta f \quad (C.15)$$

Où:

$$\begin{cases} \Delta X = [\Delta i_{sd} \quad \Delta i_{sq} \quad \Delta \Phi_{rd} \quad \Delta \Phi_{rq} \quad \Delta \Omega]^T \\ \Delta U = [\Delta v_{sd} \quad \Delta v_{sq} \quad \Delta w_r]^T \end{cases} \quad (C.16)$$

$$A = \left. \frac{\delta g(X, U, d, f)}{\delta X} \right|_p \quad B = \left. \frac{\delta g(X, U, d, f)}{\delta U} \right|_p \quad (C.17)$$

$$E_d = \left. \frac{\delta g(X, U, d, f)}{\delta d} \right|_p \quad E_f = \left. \frac{\delta g(X, U, d, f)}{\delta f} \right|_p$$

Il s'en suit que :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_r}{L_f} & 0 & \dot{i}_{sq}^* \\ 0 & \frac{L_r}{L_f} & -\dot{i}_{sd}^* \\ 0 & 0 & \Phi_{rq}^* \\ 0 & 0 & -\Phi_{rd}^* \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (C.18)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{L_f L_r} & p\Omega^* + \omega_r^* & \frac{L_m R_r}{L_f L_r} & \frac{pL_m \Omega^*}{L_f} & p\dot{i}_{sq} + p \frac{L_m}{L_f} \Phi_{rq}^* \\ -p\Omega^* - \omega_r^* & \frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{L_f L_r} & -\frac{pL_m \Omega^*}{L_f} & \frac{L_m R_r}{L_f L_r} & -p\dot{i}_{sq} - p \frac{L_m}{L_f} \Phi_{rq}^* \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & \omega_r^* & 0 \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & -\omega_r^* & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ -\frac{pL_m}{jL_r} \Phi_{rq}^* & \frac{pL_m}{jL_r} \Phi_{rd}^* & \frac{pL_m}{jL_r} \dot{i}_{sq} & -\frac{pL_m}{jL_r} \dot{i}_{sd} & -\frac{K_f}{j} \end{bmatrix} \quad (C.19)$$

$$E_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{j_0} & -\frac{\Omega^*}{j_0} & -\frac{1}{j_0^2} \left(\frac{pL_m}{L_r} \dot{i}_{sq} \Phi_{rd}^* - \frac{pL_m}{L_r} \dot{i}_{sd} \Phi_{rq}^* - K_{f0} \Omega^* - C_{r0} \right) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (C.20)$$

Et

$$E_{f_{1 \rightarrow 3}} = \begin{bmatrix} -\frac{L_r}{L_f} \dot{i}_{sd} & \frac{L_m^2}{L_f L_r} \dot{i}_{sd} + \frac{L_m}{L_f L_r} \Phi_{rd}^* & \frac{da}{dL_s} \dot{i}_{sd} + \frac{db}{dL_s} \Phi_{rd}^* + \frac{dc}{dL_s} \Omega^* \Phi_{rq}^* - \frac{L_r^2}{L_f^2} V_{sd}^* \\ -\frac{L_r}{L_f} \dot{i}_{sq} & \frac{L_m^2}{L_f L_r} \dot{i}_{sq} + \frac{L_m}{L_f L_r} \Phi_{rq}^* & \frac{da}{dL_s} \dot{i}_{sq} + \frac{db}{dL_s} \Phi_{rq}^* - \frac{dc}{dL_s} \Omega^* \Phi_{rd}^* - \frac{L_r^2}{L_f^2} V_{sq}^* \\ 0 & \frac{L_m}{L_r} \dot{i}_{sd} - \frac{1}{L_r} \Phi_{rd}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{L_r} \dot{i}_{sq} - \frac{1}{L_r} \Phi_{rq}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$E_{f_4} = \begin{bmatrix} \frac{da}{dL_r} \dot{i}_{sd} + \frac{db}{dL_r} \Phi_{rd}^* + \frac{dc}{dL_r} \Omega^* \Phi_{rq}^* + \frac{L_f - L_r L_s}{L_f^2} V_{sd}^* \\ \frac{da}{dL_r} \dot{i}_{sq} + \frac{db}{dL_r} \Phi_{rq}^* - \frac{dc}{dL_r} \Omega^* \Phi_{rd}^* + \frac{L_f - L_r L_s}{L_f^2} V_{sq}^* \\ -\frac{R_r}{L_r^2} L_m \dot{i}_{sd} + \frac{R_r}{L_r^2} \Phi_{rd}^* \\ -\frac{R_r}{L_r^2} L_m \dot{i}_{sq} + \frac{R_r}{L_r^2} \Phi_{rq}^* \\ -\frac{pL_m}{jL_r^2} \Phi_{rd}^* \dot{i}_{sq} + \frac{pL_m}{jL_r^2} \Phi_{rq}^* \dot{i}_{sd} \end{bmatrix} \quad (C.21)$$

C.5 Synthèse d'un observateur par modes glissants avec capteur de vitesse pour la Machine asynchrone

Les mesures dont nous disposons sont la vitesse et les courants statoriques. Comme, la vitesse est considérée comme étant une variable lente par rapport aux grandeurs électriques, elle ne sera pas utilisée pour la correction de l'observation sur les autres variables. Ainsi, il est possible de supprimer l'observation de la variable mécanique.

Soit l'observateur par modes glissants de la machine asynchrone, défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = -\gamma x_1 + a\hat{x}_1 + Kp\hat{x}_4 x_5 + eV_1 + \lambda_1^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\gamma x_2 + a\hat{x}_2 - Kp\hat{x}_3 x_5 + eV_2 + \lambda_2^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_3 = bx_1 - c\hat{x}_3 - p\hat{x}_4 x_5 + \lambda_3^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_4 = bx_2 - c\hat{x}_4 + p\hat{x}_3 x_5 + \lambda_4^T I_s \\ \dot{\hat{x}}_5 = d(\hat{x}_3 x_2 - x_1 \hat{x}_4) - \frac{C_r}{j} - \frac{K_f}{j} x_5 + q_1(x_5 - \hat{x}_5) + \lambda_5^T I_s \end{cases} \quad (C.22)$$

$$\text{Où} \quad I_s = [\text{sign}(S_1) \quad \text{sign}(S_2)]^T \quad \text{et} \quad \begin{cases} S_1 = x_1 - \hat{x}_1 \\ S_2 = x_2 - \hat{x}_2 \end{cases} \quad (C.23)$$

S_1 et S_2 sont les surfaces de glissement choisies.

Les gains : q_1 ; λ_1^T , λ_2^T , λ_3^T , λ_4^T et λ_5^T représentent les gains de l'observateur, à déterminer, tels que $\lambda_1^T = [\lambda_{11} \quad \lambda_{12}]^T$, $\lambda_2^T = [\lambda_{21} \quad \lambda_{22}]^T$, $\lambda_3^T = [\lambda_{31} \quad \lambda_{32}]^T$, $\lambda_4^T = [\lambda_{41} \quad \lambda_{42}]^T$ et $\lambda_5^T = [\lambda_{51} \quad \lambda_{52}]^T$ sont des vecteurs lignes appartenant à R^2 .

La dynamique de l'erreur d'observation est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = ae_3 + Kpx_5 e_4 - \lambda_1^T I_s \\ \dot{e}_2 = ae_4 - Kpx_5 e_3 - \lambda_2^T I_s \\ \dot{e}_3 = -ce_3 - px_5 e_4 - \lambda_3^T I_s \\ \dot{e}_4 = -ce_4 + px_5 e_3 - \lambda_4^T I_s \\ \dot{e}_5 = d(x_2 e_3 - x_1 e_4) - q_1 e_5 - \lambda_5^T I_s \end{cases} \quad (C.24)$$

Afin de déterminer les gains de l'observateur, nous proposons la fonction de Lyapounov définie positive:

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad \text{Où} \quad S = Q(e_1, e_2)^T \quad (C.25)$$

Q est une matrice régulière telle que $S = 0 \Rightarrow e_1 = e_2 = 0$.

La condition d'attractivité de la surface $S = 0$ est donnée par :

$$\dot{V} = S^T \frac{\partial S}{\partial t} < 0 \quad \forall S \neq 0 \quad (\text{C.26})$$

En posant :

$$\begin{bmatrix} \lambda_1' \\ \lambda_2' \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.27})$$

Alors :

$$\dot{V} = S^T Q \begin{bmatrix} ae_3 + Kpx_5 e_4 \\ ae_4 - Kpx_5 e_3 \end{bmatrix} - S_1 \delta_1 \text{sign}(S_1) - S_2 \delta_2 \text{sign}(S_2) + S^T \dot{Q} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.28})$$

Si Q s'écrit en fonction de la vitesse, il est possible de négliger le terme \dot{Q} . Soit alors :

$$Q = \frac{1}{(a^2 + (Kpx_5)^2)} \begin{bmatrix} a & -Kpx_5 \\ Kpx_5 & a \end{bmatrix} \quad (\text{C.29})$$

Ainsi :

$$\dot{V} = S_1 (e_3 - \delta_1 \text{sign}(S_1)) + S_2 (e_4 - \delta_2 \text{sign}(S_2)) \quad (\text{C.30})$$

Les gains δ_1 et δ_2 sont déterminés de manière à assurer la convergence de l'erreur d'estimation vers zéro. Par conséquent, ils doivent vérifier les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \delta_1 > |e_3|_{\max} \\ \delta_2 > |e_4|_{\max} \end{cases} \quad (\text{C.31})$$

Sur la surface de glissement, $S = 0$ et $\dot{S} = 0$ d'où $\begin{cases} \dot{e}_1 = 0 \\ \dot{e}_2 = 0 \end{cases}$ Ainsi on trouve :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = Q^{-1} \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} I_s \quad (\text{C.32})$$

Le vecteur équivalent, sur la surface de glissement, est donné par :

$$\tilde{I}_s = \begin{bmatrix} e_3 \\ \delta_1 \\ e_4 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.33})$$

La dynamique réduite sur la surface est alors donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_3 = \left[\left(-c - \frac{\lambda_{31}}{\delta_1} \right) & \left(-px_5 - \frac{\lambda_{32}}{\delta_2} \right) \right] \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \\ \dot{e}_4 = \left[\left(px_5 - \frac{\lambda_{41}}{\delta_1} \right) & \left(-c - \frac{\lambda_{42}}{\delta_2} \right) \right] \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \\ \dot{e}_5 = \left[\left(dx_2 - \frac{\lambda_{51}}{\delta_1} \right) & \left(-dx_1 - \frac{\lambda_{52}}{\delta_2} \right) \right] \begin{bmatrix} e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} - q_1 e_5 \end{cases} \quad (\text{C.34})$$

Ainsi, en posant:

$$\begin{bmatrix} \frac{\lambda_{51}}{\delta_1} & \frac{\lambda_{52}}{\delta_2} \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} x_2 & -x_1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.35})$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{31} & \lambda_{32} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c & -px_5 \\ px_5 & -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_3 & 0 \\ 0 & q_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 & 0 \\ 0 & \delta_2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.36})$$

Alors :

$$\begin{cases} \dot{e}_3 = -q_3 e_3 \\ \dot{e}_4 = -q_4 e_4 \\ \dot{e}_5 = -q_1 e_5 \end{cases} \quad (\text{C.37})$$

La dynamique de l'erreur d'observation est stable si

$$\begin{cases} q_3 > 0 \\ q_4 > 0 \\ q_1 > 0 \end{cases} \quad (\text{C.38})$$

En résumé, la synthèse de l'observateur, défini par les équations (C.22), repose sur le choix des gains $\delta_1, \delta_2, q_1, q_3$ et q_4 de façon à ce que les conditions suivantes soient satisfaites :

$$\begin{cases} \delta_1 \geq \|e_3\|_{\max} \\ \delta_2 \geq \|e_4\|_{\max} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} q_1 > 0 \\ q_3 > 0 \\ q_4 > 0 \end{cases} \quad (\text{C.39})$$

Afin d'éviter le phénomène de pic, engendré par l'application de la fonction signe, cette dernière est remplacée par la fonction de saturation:

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > \mu \\ -1 & \text{si } S < -\mu \\ \frac{S}{\mu} & \text{si } |S| < \mu \end{cases} \quad (\text{C.40})$$

ANNEXE D. ROBOT SCARA A QUATRE DEGRES DE LIBERTE

D.1 Modélisation du Robot SCARA à quatre degrés de liberté

Le robot étudié est un robot SCARA à quatre degrés de liberté, composé de trois articulations rotoïdes et une articulation prismatique avec certaines hypothèses de fonctionnement.

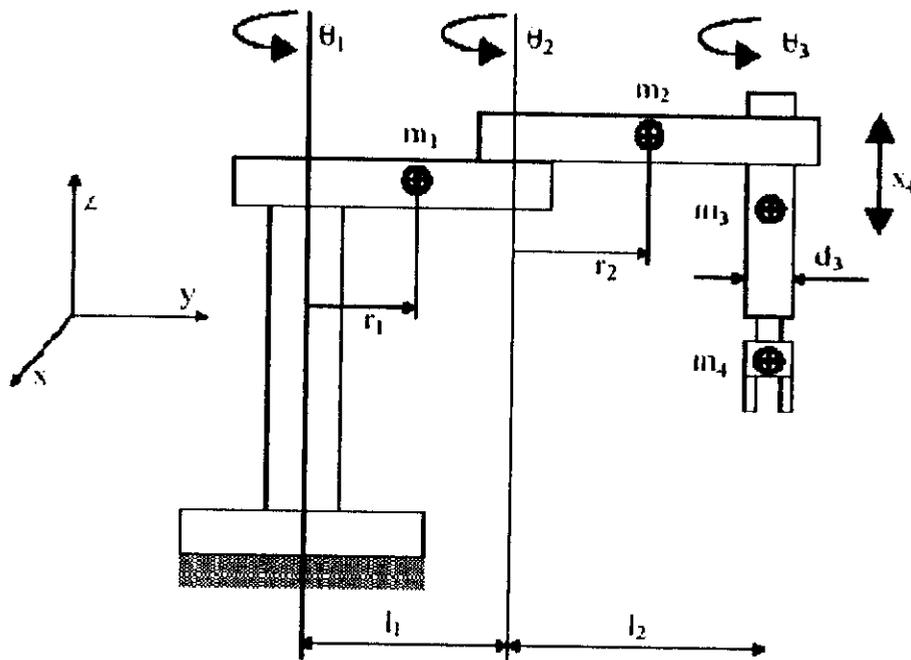


Figure D.1 : Robot SCARA à quatre degrés de liberté.

m_i désigne la masse du corps i , l la longueur, r la distance entre l'articulation et le centre de gravité, I_z , le moment d'inertie dans la direction z , par rapport à une axe passant par le centre de gravité et parallèle à l'axe principal de l'articulation.

Le modèle dynamique du robot est donné par :

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + \eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t) = \tau \quad (\text{D.1})$$

Tels que $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ x_4]^T$ est le vecteur position articulaire.

$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$ est le vecteur vitesse articulaire.

$\ddot{\theta} = \frac{d\dot{\theta}}{dt}$ est le vecteur accélération articulaire.

$\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ F_4]$ est le vecteur représentant le couple/force d'entrées.

$G(\theta) = [0 \ 0 \ 0 \ m_3 g]^T$ est le vecteur gravitation.

$M(\theta)$ représente la matrice d'inertie donnée par l'expression (D.2)

$V(\theta, \dot{\theta})$ est le vecteur, représentant les forces de Coriolis et centrifuges, donné par (D.3).

$\eta(\theta, \dot{\theta}, \tau, t)$ englobe toutes les dynamiques non modélisées, supposées bornées.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \alpha + \beta + 2\gamma \cos(\theta_2) & \beta + \gamma \cos(\theta_2) & \delta & 0 \\ \beta + \gamma \cos(\theta_2) & \beta & \delta & 0 \\ \delta & \delta & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \quad (\text{D.2})$$

$$V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -\gamma \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1) \\ \gamma \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D.3})$$

Où

$$\begin{cases} \alpha = I_{z1} + r_1^2 m_1 + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 + l_1^2 m_4 \\ \beta = I_{z2} + I_{z3} + I_{z4} + l_2^2 m_3 + l_2^2 m_4 + r_2^2 m_2 \\ \gamma = l_1 l_2 m_3 + l_1 l_2 m_4 + l_1 m_2 r_2 \\ \delta = I_{z3} + I_{z4} \end{cases} \quad (\text{D.4})$$

Soient les hypothèses suivantes :

- Aucun défaut ni incertitude.
- Liaisons rigides.
- Structure rigide.
- La troisième articulation peut être assimilée à une tige cylindrique, par conséquent : $I_{z3} = \frac{1}{2} m_3 d_3^2$ (D.5)
- Le diamètre de la troisième liaison (d_3) est très petit devant les longueurs l_1 et l_2 , par conséquent : I_{z3} est négligeable devant l_1^2 , l_2^2 et $l_1 l_2$

- Aucune charge à l'extrémité
- Les centres de gravité des corps 1 et 2 ont des extrémités éloignées : $r_1 = l_1$, $r_2 = l_2$, $I_{z1} = 0$ et $I_{z2} = 0$

$$\text{Ainsi : } \begin{cases} \alpha = l_1^2 (m_1 + m_2 + m_3) \\ \beta = l_2^2 (m_2 + m_3) \\ \gamma = l_1 l_2 (m_2 + m_3) \\ \delta = I_{z3} \end{cases} \quad (\text{D.6})$$

D'où

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2 + m_3)l_1^2 + 2(m_1 + m_2)l_1 l_2 \cos(\theta_2) + (m_2 + m_3)l_2^2 & (m_2 + m_3)l_1 l_2 \cos(\theta_2) & I_{z3} & 0 \\ (m_2 + m_3)l_2^2 + (m_2 + m_3)l_1 l_2 \cos(\theta_2) & (m_2 + m_3)l_2^2 & I_{z3} & 0 \\ I_{z3} & I_{z3} & I_{z3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

et

$$V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -(m_2 + m_3)l_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_2 - 2\dot{\theta}_1) \\ (m_2 + m_3)l_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{D.7})$$

D.2 Paramètres du robot

Les simulations ont été effectuées pour un robot SCARA, à quatre degrés de liberté, défini par les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} m_1 &= 50 \text{ Kg} \\ m_2 &= 40 \text{ Kg} \\ m_3 &= 30 \text{ Kg} \\ l_1 &= 0.425 \text{ m} \\ l_2 &= 0.375 \text{ m} \\ l_3 &= 0.020 \text{ m} \\ k &= 7 \\ g &= 9.8 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (\text{D.8})$$

- La borne supérieure des incertitudes :

$$\eta_0 = \left[30\pi \quad 5\pi \quad \frac{55}{3}\pi \quad 1.2 \right]^T \times 5 \times 10^{-5} \quad (D.9)$$

- Les défauts actionneurs engendrent un affaiblissement du couple, tels que:

$$F_a = \alpha_a \tau, \text{ avec } \alpha_a = [0.7 \quad 0.1 \quad 0.1 \quad 0.9]^T \quad (D.10)$$

- Les défauts composants sont donnés par :

$$F_c = \alpha_c \left(-\text{sign}(\dot{\theta})(1 + 0.05 \exp(-10^6 |\dot{\theta}|)) + 20\dot{\theta} + 10 \sin(0.2\theta + \pi) \right) \quad (D.11)$$

Avec: $\alpha_c = [0.1 \quad 0.1 \quad 0.01 \quad 0.1]^T$

- L'observateur par modes glissants est défini par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{M}^{-1}(\tau - \hat{V} - \hat{G}) + \lambda I_s \end{cases} \quad (D.12)$$

Où x_1 et x_2 représentent respectivement les vecteurs des positions et vitesses articulaires. $I_s = \text{sat}(x_2 - \hat{x}_2)$, sat étant la fonction saturation. λ est le gain de l'observateur, déterminé de manière à assurer la robustesse des états estimés vis-à-vis des défauts et des incertitudes.

Résumé

Ce projet de fin d'études concerne la détection et l'isolation des défauts dans les systèmes physiques par les méthodes à base d'observateurs ainsi que la commande tolérante aux défauts. Après présentation d'un état de l'art des deux domaines, un observateur de défauts associé à un observateur d'états par modes glissants est proposé pour la génération de résidus robustes vis-à-vis des perturbations. Cette même structure d'observateurs est par la suite utilisée pour des objectifs de commande tolérante aux défauts du type actif. L'application de cet observateur, pour la détection et l'isolation des défauts engendrant des variations des grandeurs statoriques et rotoriques de la machine asynchrone, donne des résultats satisfaisants concernant la résolution du problème fondamental de génération de résidus. Des simulations effectuées sur le modèle du robot industriel SCARA montrent l'efficacité de l'approche de commande tolérante aux défauts proposée.

Mots clés : détection et isolation des défauts, robustesse, observateurs par modes glissants, commande tolérante aux défauts, machine asynchrone, robot SCARA.

Abstract

This work deals with observer-fault detection and isolation in physical systems and fault-tolerant control. After introducing the state-of-the-art of these two fields, a fault observer associated with a sliding mode state observer is proposed for generating robust residuals. The same structure is used for active fault-tolerant control objectives. Application of this observer for detection and isolation of faults that generate changes in stator and rotor parameters in an asynchronous machine, gives satisfactory results concerning the resolution of the fundamental problem of residual generation. Simulations achieved on the industrial SCARA robot model show the effectiveness of the proposed fault-tolerant control approach.

Key words: fault detection and isolation, robustness, sliding mode observers, fault-tolerant control, asynchronous machine, SCARA robot.

ملخص

يخص هذا العمل كشف و عزل الخلل الذي قد يصيب الأنظمة الفيزيائية باستعمال الطرق المعتمدة على الأنظمة الملاحظة و كذلك التحكم المتسامح للخلل. بعد عرض لحالة فنية للمجالين، يقترح نظاما ملاحظا للخلل، غير حساس للمشوشات و الإشارات الطفيلية، مشترك مع نظام ملاحظ حالي، مركب عن طريق حالة الانزلاق. و يستعمل نفس الملاحظ بهدف التحكم المتسامح للخلل من النوع النشط. إن تطبيق هذا النظام الملاحظ لكشف و عزل الخلل الذي يؤدي إلى تغيرات مقنومات المحرك اللائزمني يقدم نتائج مرضية كما تبين نتائج تطبيق طريقة التحكم المتسامح للخلل المقترحة على ذراع آلية سكارا فعاليتها و صلاحيتها.

كلمات مفتاحية: كشف و عزل الخلل، الصلابة، أنظمة ملاحظة معتمدة على حالة الانزلاق، التحكم المتسامح للخلل، المحرك اللائزمني، ذراع آلية سكارا.