

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
ÉCOLE SUPÉRIEURE EN SCIENCES APPLIQUÉES DE TLEMCEM



MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Domaine : sciences et technologies

Spécialité : automatique

Option : automatique

Présenté par :

Benyoucef CHAIBI

Charafeddine MERADJI

Génération d'algorithmes de diagnostic à l'aide d'observateurs à entrées inconnues

Membres du jury :

Directeur du mémoire :

A.Meghebbar

MCA à ESSA Tlemcen

Président :

F.Arichi

MCB à ESSA Tlemcen

Examineurs :

R.Mokhtari

MCA à ESSA Tlemcen

M.Benallal

MCA à l'université de Tlemcen

*À mes chers parents, pour tous leurs
sacrifices, leur soutien et leurs prières
tout au long de mes études,*

À toute ma famille,

À Mme Anteur.

Merci de tout mon cœur

Chaibi Benyoucef

*Au nom de Dieu le Clément et le Miséricordieux Louange à Allah le tout-puissant
En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la
force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

Je dédie ce travail aux deux êtres les plus chers au monde

A Maman,

*Tu t'es tellement battue pour nous, toutes les pages du monde ne suffiraient pas pour
te témoigner ma gratitude, je ne te remercierais jamais assez. Ce travail est également
le tien, le fruit de tes sacrifices. Un énorme merci pour ton soutien, ton écoute, tes
encouragements et ton amour ...
' Tu es la lumière de notre vie '.*

A mon père,

*Mon héros je te l'ai toujours dit ! Tu trouveras ici le témoignage de toute ma gratitude
à ton égard, pour ton amour et ton soutien qui m'ont toujours guidé dans la bonne
direction. Durant toutes ces années vous m'avez laissé la liberté de choisir ma voie,
tout en me prodiguant les conseils nécessaires à ma réussite. Veuillez trouver dans ces
quelques lignes le symbole de ma profonde reconnaissance et de mon amour. Chaque
ligne, chaque mot et chaque lettre vous exprime la reconnaissance, le respect et
l'estime. Ce travail est le tien, je ne te remercierais jamais assez...*

*A mes chers frères Mohand, Imad et Akram merci pour l'amour, l'aide et le soutien
qu'ils m'ont toujours apporté aussi bien dans les moments difficiles que radieux. Trois
personnes uniques au monde mon amour pour vous est sans limite.*

*A ma petite famille SLIMANI pour leur appui et leur encouragement et qui a été
toujours une source de motivation, source d'amour, soutien et encouragement.*

MERADJI Charaf Eddine

Remerciements

Par les premières lignes de ce document, Nous remercions l'Éternel DIEU pour le souffle de vie et toutes les capacités physiques et intellectuelles utilisées pour réaliser ce travail DIEU Merci.

Je souhaite adresser mes remerciements distingués et toute ma gratitude à mon encadrant, Monsieur Abdelmajid Meghabbar qui a contribué et aidé à la réalisation de ce travail de fin d'études et surtout pour sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils.

Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants de l'École supérieure en sciences appliquer à Tlemcen qui nous a fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires, et les participants professionnels responsables de la formation, qu'ils puissent trouver dans ce travail le témoignage de notre sincère gratitude et notre profond respect. Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Enfin, du point de vue personnel, nos chaleureux remerciements vont à tous les gens que j'ai les rencontrer dans cette ville et qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long l'année universitaire. Nous remercions tous ceux qui de loin où de près ont procuré leurs apports pour la construction de ce mémoire.

Le chemin a été long et pavé d'arbustes peut-être, l'aventure, jonchées d'adversités mais ce qui importe véritablement, c'est la finalité, le dénouement... Et je suis de ceux qui croient que, la fin d'une chose vaut mieux que son début...

Cette mémoire n'est que le début de mon voyage.

Merci Dieu d'être toujours là pour moi

Sommaire

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | Chapitre 1 : Etat de l'art | 9 |
| 1.1 | Introduction | 10 |
| 1.2 | Concepts et terminologies | 10 |
| 1.3 | Mode de fonctionnement d'un système | 12 |
| 1.4 | Classification de défaut | 12 |
| 1.4.1 | Localisation | 13 |
| 1.4.2 | Modélisation. | 13 |
| 1.4.3 | Caractéristiques temporelles | 14 |
| 1.5 | Principe de diagnostic | 15 |
| 1.5.1 | La détection : | 15 |
| 1.5.2 | La localisation : | 15 |
| 1.5.3 | L'identification : | 15 |
| 1.6 | Surveillance utilisant les modèles | 16 |
| 1.6.1 | Redondance physique (matérielle) | 16 |
| 1.6.2 | Redondance analytique (matrices de transfert/équations différentielles) | 17 |
| 1.7 | Les concepts fondamentaux du diagnostic | 17 |
| 1.8 | Les avantages/inconvénients du diagnostic | 18 |
| 1.9 | Performance d'une procédure de diagnostic | 18 |
| 1.10 | Méthodes de diagnostic à base de modèles | 19 |
| 1.10.1 | Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs | 20 |
| 1.10.2 | Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs | 21 |
| 1.11 | Conclusion : | 25 |
| 2 | Chapitre 2 : Synthèse d'un observateur | 26 |
| 2.1 | Introduction | 27 |
| 2.2 | Système dynamique | 28 |
| 2.2.1 | Système non linéaire | 29 |
| 2.2.2 | Système linéaire | 29 |
| 2.2.3 | Linéarisation d'un système non linéaire | 30 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3 | Principe de l'observateur | 32 |
| 2.4 | Notions relatives aux observateurs | 32 |
| 2.4.1 | Observabilité d'un système linéaire | 33 |
| 2.4.2 | Observabilité des systèmes non linéaires | 33 |
| 2.4.3 | DéTECTABILITÉ d'un système | 33 |
| 2.5 | Observateurs des systèmes linéaires | 33 |
| 2.5.1 | Observateur de Luenberger | 34 |
| 2.5.2 | Observateur à entrées inconnues : | 37 |
| 2.6 | Conclusion | 42 |
| 3 | Chapitre 3 : Observateurs d'états pour le diagnostic | 43 |
| 3.1 | Introduction | 44 |
| 3.2 | Etapes de diagnostic | 44 |
| 3.2.1 | Generation des résidus | 44 |
| 3.2.2 | Analyse des résidus | 44 |
| 3.2.3 | Evaluation des résidus | 45 |
| 3.2.4 | Localisation des défauts..... | 45 |
| 3.3 | Structuration et évaluation des résidus générés | 46 |
| 3.3.1 | Structure d'observateur simplifié | 46 |
| 3.3.2 | Structure d'observateurs dédiés (<i>DOS</i>)..... | 46 |
| 3.3.3 | Structure d'observateurs généralisés (<i>GOS</i>) | 48 |
| 3.4 | Natures des défauts | 49 |
| 3.4.1 | Bruit de mesure | 49 |
| 3.4.2 | Défauts actionneurs | 49 |
| 3.4.3 | Défauts modèle | 51 |
| 3.4.4 | Défauts capteurs | 51 |
| 3.5 | Exemple 1..... | 53 |
| 3.5.1 | Description du système..... | 53 |
| 3.5.2 | Synthèse d'observateur à gain | 53 |
| 3.5.3 | Simulation..... | 54 |
| 3.5.4 | Interprétation | 56 |
| 3.5.5 | La table des signatures : | 57 |
| 3.6 | Exemple 2..... | 57 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.7 | Conclusion | 61 |
| 4 | Chapitre 4 : Application au processus hydraulique | 62 |
| 4.1 | Introduction | 63 |
| 4.2 | Description du procédé | 63 |
| 4.3 | Modèle mathématique du système | 64 |
| 4.4 | Linéarisation du système non linéaire | 67 |
| 4.4.1 | Calcul du point d'équilibre | 67 |
| 4.4.2 | Simulation du système linéaire | 69 |
| 4.5 | Conception d'un observateur à gain | 69 |
| 4.5.1 | Fonctionnement sain du système : | 70 |
| 4.5.2 | En présence d'entrée inconnue : | 71 |
| 4.5.3 | Interprétations | 71 |
| 4.6 | Conception d'un OEI | 72 |
| 4.6.1 | Algorithme de synthèse de l'observateur | 73 |
| 4.7 | Calcul théorique des résidus | 74 |
| 4.8 | Étude expérimentale | 75 |
| 4.8.1 | La robustesse de l'observateur à entrées inconnues | 75 |
| 4.8.2 | Diagnostic d'un défaut capteur | 76 |
| 4.8.3 | Diagnostic d'un défaut actionneur : | 77 |
| 4.8.4 | Présence d'un défaut capteur et actionneur simultanément | 78 |
| 4.9 | Interprétations | 79 |
| 4.10 | Algorithme de diagnostic de défauts | 80 |
| 4.11 | Conclusion | 81 |
| | Annexe | 85 |
| 5 | Bibliographie | 88 |

Table de figures:

| | |
|---|----|
| Figure 1-1 : génération des résidus. | 11 |
| Figure 1-2: différents types de défauts. | 13 |
| Figure 1-3 : Classification des défauts selon la modélisation. | 14 |
| Figure 1-4: évolution temporelle des types de défauts | 14 |
| Figure 1-5 : Principe de surveillance. | 16 |
| Figure 1-6: architecture de redondance physique et analytique. | 16 |
| Figure 1-7: schéma explicatif de la redondance matérielle. | 16 |
| Figure 1-8 : Étape du diagnostic. | 17 |
| Figure 1-9: structure d'une procédure de diagnostic. | 18 |
| Figure 1-10 : Classification générale des méthodes de diagnostic. | 20 |
| Figure 1-11 : Architecture générale à base de modèles quantitatifs. | 21 |
| Figure 1-12 : principe de générateur des résidus à base de l'espace de parité. | 22 |
| Figure 1-13 : Estimation paramétrique. | 23 |
| Figure 1-14 : Un observateur générateur de résidus. | 24 |
| | |
| Figure 2-1 : le rôle d'observateur. | 28 |
| Figure 2-2 : représentation d'un système dynamique. | 28 |
| Figure 2-3 : représentation d'état d'un système linéaire. | 30 |
| Figure 2-4 : Principe de l'observateur. | 32 |
| Figure 2-5 : Schéma Block d'observateur de Luenberger. | 35 |
| Figure 2-6 : Le choix des pôles. | 36 |
| Figure 2-7 : Schema bloc d'un OEI. | 39 |
| | |
| Figure 3-1 : Observateur simplifié. | 46 |
| Figure 3-2 : Structure observateur dédié. | 47 |
| Figure 3-3 : Structure d'observateur généralisé. | 48 |
| Figure 3-4 : Système de surveillance de défauts pour les actionneurs. | 50 |
| Figure 3-5 : Système de surveillance de défauts pour les capteurs. | 52 |
| Figure 3-6 : Simulink utilisé pour la simulation de l'exemple. | 54 |
| Figure 3-7 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ sans défauts. | 55 |
| Figure 3-8 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ avec défaut capteur 1. | 55 |

| | |
|--|----|
| Figure 3-9 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ avec défaut capteur 2. | 55 |
| Figure 3-10 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ avec défauts capteur 1 et 2. | 56 |
| Figure 3-11 : Simulink de l'exemple 2 en présence d'entrées inconnues. | 58 |
| Figure 3-12 : Les résidus $r(t)$ en présence des bruits de mesure et sans perturbation. | 59 |
| Figure 3-13 : Les résidus $r(t)$ en présence des bruits de mesure et perturbation $d(t)$ | 59 |
| Figure 3-14 : Les résidus $r(t)$ en présence de défaut actionneur 1. | 59 |
| Figure 3-15 : Les résidus $r(t)$ en présence de défaut capteur 2. | 60 |
| Figure 3-16 : Les résidus $r(t)$ en présence de défaut capteur 3. | 60 |
| | |
| Figure 4-1 : Système Hydraulique à trois cuves..... | 63 |
| Figure 4-2 : Le benchmark étudié en réalité..... | 64 |
| Figure 4-3 : Simulink du système à trois réservoirs. | 69 |
| Figure 4-4 : Les signaux de sortie $y(t)$ et leurs estimations..... | 70 |
| Figure 4-5 : Les résidus $r(t)$ sans entrées inconnues. | 70 |
| Figure 4-6 : intégration d'entrée inconnue $d(t)$ | 71 |
| Figure 4-7 : Les résidus $r(t)$ en présence d'entrée inconnue $d(t)$ | 71 |
| Figure 4-8 : Simulink du système et l'OEI..... | 73 |
| Figure 4-9 : Les résidus $r(t)$ en absence d'entrée inconnue. | 76 |
| Figure 4-10 : Les résidus $r(t)$ en présence d'entrée inconnue. | 76 |
| Figure 4-11 : Résidus $r(t)$ en présence d'un défaut capteur..... | 77 |
| Figure 4-12 : Résidus $r(t)$ en présence d'un défaut actionneur. | 78 |
| Figure 4-13 : Résidus $r(t)$ en présence des deux défauts (capteur/actionneur). | 78 |

Introduction générale

Dès le début des années 1980, la détection et l'isolation des fautes (FDI) ont suscité un intérêt considérable dans la communauté des ingénieurs. En effet, l'augmentation de la sécurité des systèmes est un défi pour les industries, ainsi les approches de détection des défauts basées sur des modèles ont reçu une attention considérable.

Le diagnostic des processus est indispensable pour garantir l'efficacité du contrôle des processus et donc, une exploitation rentable et sûre de l'usine. Les défaillances des capteurs ou des actionneurs, l'encrassement des équipements, les influences saisonnières, les changements de produits et les variations des matières premières peuvent affecter les performances des composants. Ces problèmes représentent effectivement la majorité des problèmes des installations industrielles. La FDI consiste à déduire l'apparition de défauts dans une installation industrielle et à trouver leurs causes profondes à l'aide de diverses stratégies de systèmes basés sur la connaissance : modèles qualitatifs, modèles quantitatifs et données historiques.

Des méthodes de détection et d'identification de défauts basées sur des modèles ont été développées pour la description mathématique exacte et certaine des systèmes linéaires et non linéaires basée sur des schémas d'observation, des algorithmes d'estimation des paramètres ou des techniques d'espace de parité. Plusieurs livres sont consacrés à ces sujets tels que « Fault detection and diagnosis in industrial systems » écrit par L. Chiang, E. Russell, and R. Braatz ou plus récemment « Model-based fault diagnosis techniques - design schemes, algorithms et tools. » écrit par S.X. Ding. Pour l'isolation des défauts, diverses techniques basées sur une connaissance exacte du modèle non linéaire nous permettent d'engendrer des résidus sensibles à des défauts spécifiques et insensibles à d'autres.

Compte tenu de la grande diversité des méthodes avancées basées sur des modèles pour les FDI automatisés, le problème de la détection des défauts d'actionneurs et/ou de capteurs est d'une importance fondamentale. Cependant, en raison des difficultés inhérentes à l'identification en ligne des systèmes en boucle fermée, les techniques d'estimation des paramètres ne sont pas toujours adaptées. La technique de l'espace de parité permet de distinguer les différents défauts en présence de paramètres inconnues, mais n'est pas utile pour l'estimation de l'ampleur des défauts. En revanche, les méthodes basées sur les observateurs est plus adéquate pour atteindre cet objectif. Les techniques classiques

découplées, telles que l'observateur à gain de Luenberger, l'observateur à entrées inconnues ou les filtres dédiés, sont consacrées à la détection et à l'estimation des défauts.

On s'est intéressé spécifiquement aux observateurs à entrées inconnues parce qu'ils sont massivement utilisés dans l'industrie en raison de la robustesse et de la souplesse d'utilisation.

De plus, de nombreux accidents de centrales nucléaires ou d'avions ont illustré l'importance des approches FDI pour annoncer aux opérateurs l'état du système. Malgré cela, il semble clair que la détection et l'isolation d'un défaut ne sont pas suffisantes si aucune action ultérieure ne se produit une fois le défaut reconnu.

Nous avons concentré notre étude sur les défauts additifs qui apparaissent au niveau des capteurs et actionneurs. L'observateur de Luenberger et celui à entrées inconnues ont été utilisés dans le diagnostic des pannes pour les installations industrielles et processus. Pour résoudre le problème d'isolation des défauts de capteurs et actionneurs, on se base sur les observateurs.

Les travaux exposés dans ce mémoire proposent des techniques de génération des résidus à base d'observateurs de Luenberger et à base d'observateurs à entrées inconnues, pour but de minimiser les fausses alarmes et d'identifier les défauts. Les algorithmes générés seront testés et validés à partir des simulations obtenues sur un modèle académique bien connu : le système hydraulique à trois réservoirs.

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Chapitre 1 : sera consacré aux concepts fondamentaux du diagnostic des systèmes, l'objectif se résume à définir quelques notions de base sur la détection et la localisation de défauts (le diagnostic) et les principes fondamentaux sur lesquels il repose.

Chapitre 2 : traite la présentation théorique des méthodes de synthèse d'observateurs à gain et à entrées inconnues pour les systèmes linéaires, en rappelant les conditions nécessaires à la synthèse d'observateurs linéaires.

Chapitre 3 : dédié à la mise en œuvre des techniques de génération des résidus robustes à la présence des entrées inconnues.

Chapitre 4 : permet d'évaluer les performances de l'approche proposé, en illustrant, à travers un système non linéaire "Système hydraulique", le diagnostic de leur fonctionnement à base des deux observateurs présentés au cours des chapitres précédents.

Chapitre 1 : Etat de l'art

Chapitre 1

1.1 Introduction

Le perfectionnement des performances de fonctionnement, de fiabilité et de sécurité et sûreté des systèmes ainsi que les enjeux économiques actuels qui sont la réduction des coûts de maintenance font tous partie de l'évolution de l'automatisation ces dernières années, or, cela implique l'accroissement de la complexité des systèmes industriels (i.e. : augmentation du nombre de composants et de leurs interactions).

Longtemps, l'homme a utilisé l'observation directe c'est-à-dire sans utiliser les instrumentations dédiées ou capteurs spécifiés, les sensations aperçues directement par l'opérateur humain (bruit, température, odeurs, vibrations...etc.), les capteurs apparus par la suite, les systèmes industriels sont devenus de plus en plus complexes avec l'automatisation du processus, de fait, cette évolution a compliqué la tâche de diagnostic des processus industriels.

En effet, la naissance du diagnostic industriel a été au début des années 1970, depuis, de nombreux chercheurs ont approfondi leur recherche dans ce domaine proposant diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Actuellement, plusieurs communautés de recherche telles que la communauté de l'automatique, de la production, de l'intelligence artificielle s'intéressent au domaine de la surveillance, plus particulièrement au diagnostic afin d'aider les opérateurs dans la gestion des événements anormaux.

1.2 Concepts et terminologies

Avant d'entamer les chapitres suivants, il convient de définir les termes auxquels nous aurons souvent recours dans la suite :

- **Supervision :**

Représente la surveillance d'un système physique et la prise de décision pour maintenir son bon fonctionnement.

- **Une anomalie :**

Est une particularité non conforme à la loi logique ou naturelle.

- Résidu :

Est un signal indicateur d'anomalie basé sur la différence entre les valeurs mesurées et les valeurs attendues, sensiblement nul en fonctionnement normal et non nul en présence de défauts. Il reflète la cohérence des données vis-à-vis du modèle comportemental du système.

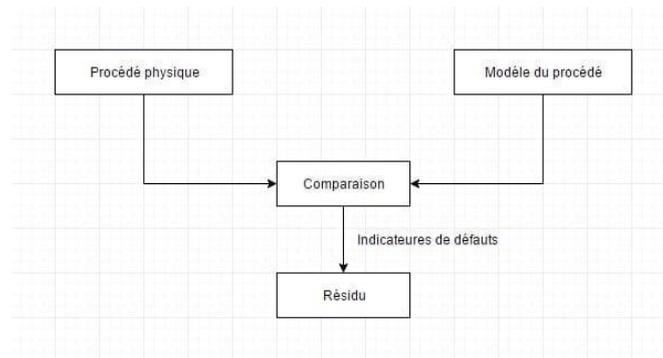


Figure 1-1 : génération des résidus.

- Seuil :

La valeur-limite de l'écart d'un résidu avec le zéro, s'il est dépassé, un défaut est déclaré comme remarqué.

- Symptôme :

C'est un changement observable d'un comportement vis-à-vis de son comportement normal. Elle est un signe comportant une information de l'état réel du processus.

- Un défaut :

Une déviation non autorisée et inattendue d'au moins une variable observée par rapport à sa valeur fixée dans les caractéristiques espérées de processus lui-même. Un défaut peut rester caché un certain temps avant de provoquer une défaillance.

- Défaillance :

Est l'incapacité d'un processus à accomplir sa fonction requise avec les performances attendues.

Une défaillance implique l'apparition d'un défaut par contre un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le défaut peut ne pas affecter le bon fonctionnement de système.

Chapitre 1

- Panne :

Une interruption permanente de la capacité du système à accomplir sa fonction requise à la suite d'une défaillance.

Défaut → défaillance → panne

- Dysfonctionnement :

Une irrégularité intermittente qui n'empêche pas le système de remplir sa fonction.

- Erreur :

Est l'écart entre une valeur mesurée d'une variable et la vraie valeur spécifiée par un capteur, jugé théoriquement correcte.

- Perturbation :

Une entrée non contrôlée (i.e. n'est pas une commande) et inconnue qui agit sur le système.

- La robustesse :

Détermine l'aptitude du système à détecter les anomalies indépendamment des perturbations et des erreurs de modélisations.

1.3 Mode de fonctionnement d'un système

Plusieurs régimes de fonctionnement peuvent être observés au sein d'un système, parmi lesquels on peut citer :

- Mode de fonctionnement nominal :

L'installation remplissait sa fonction avec les performances souhaitables.

- Mode de fonctionnement dégradé :

Représente l'accomplissement de fonction associée à des performances moindres ou l'accomplissement partiel de la tâche.

- Mode de défaillance :

Correspond à l'inaptitude de remplir la fonction demandée.

1.4 Classification de défaut

Les défauts sont classés selon leur positionnement, leur modélisation et leurs caractéristiques temporelles.

1.4.1 Localisation

Un défaut peut se produire soudainement dans n'importe quelle partie du système, il peut être classé selon l'endroit où il se produit :

- Défauts capteurs :

Une mauvaise image de l'état physique du processus peut engendrer ce type de défauts, un capteur peut produire un signal approximatif de la valeur vraie de la grandeur mesurée, on parle donc d'un défaut capteur partiel, ou une valeur qui n'a aucun rapport avec la variable mesurée.

- Défauts actionneurs :

Agissent sur la partie opérative, correspond au blocage d'un composant ou à la perte de performance (vérin bloqué, vitesse dégradée d'un moteur ...etc.).

- Défauts systèmes :

Résulte (proviennent) du système lui-même, ils sont classés arbitrairement comme un défaut capteur ou actionneur, correspond à une modification de caractéristiques physiques du système.

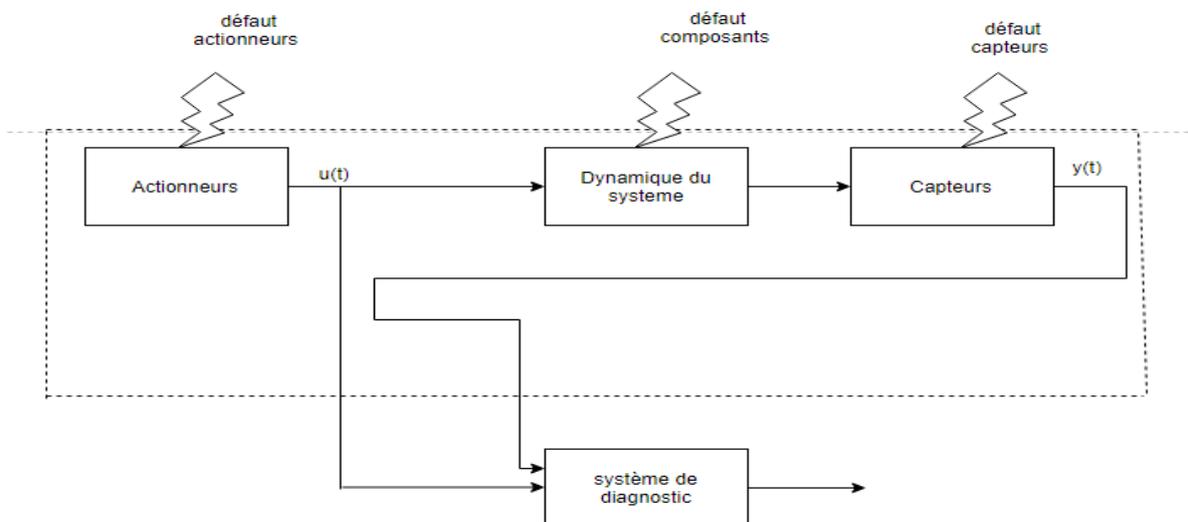


Figure 1-2: différents types de défauts.

1.4.2 Modélisation.

D'un point de vue modélisation, un défaut peut être classé soit additif soit multiplicatif.

- Défauts additifs :

Considérer comme des signaux externes, ils sont considérés comme des entrées inconnues qui causent un changement observé du comportement du système.

Chapitre 1

- Défauts multiplicatifs :

Corresponds à des changements des paramètres qui affectent l'évolution des entrées /sorties.

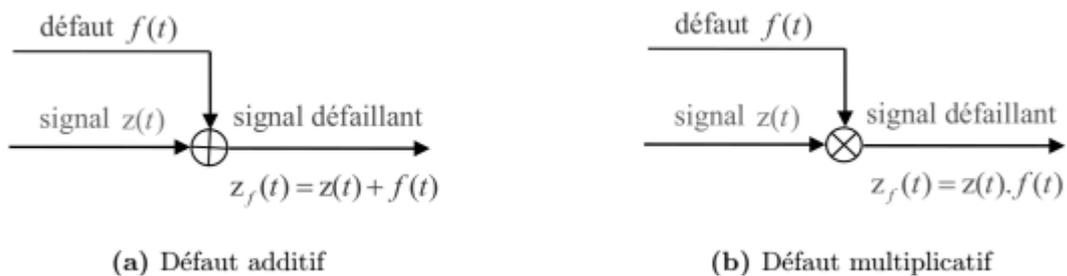


Figure 1-3 : Classification des défauts selon la modélisation.

1.4.3 Caractéristiques temporelles

Ainsi en fonction du temps, les défauts peuvent être différenciés comme graduels, abrupts et intermittentes :

- Défauts abrupts :

Les défauts abrupts (brusques/biais) se produisent instantanément à cause de dommages matériels. Généralement ils sont très graves car ils affectent les performances ainsi que la stabilité du système commandé.

- Défauts graduels :

Les défauts graduels (progressifs/dérivés) sont caractérisés par le lent changement des valeurs paramétriques, dans la plupart du temps dus au vieillissement, la détection de ces derniers est très difficile en raison de leurs évolutions temporelles lentes mais sont également moins graves.

- Défauts intermittents :

Ce défaut est un cas particulier de défaut abrupt avec la propriété particulière que le signal revient de façon aléatoire à sa valeur normale. Ce type de défauts indique les faux contacts, par exemple un câblage partiellement endommagé.

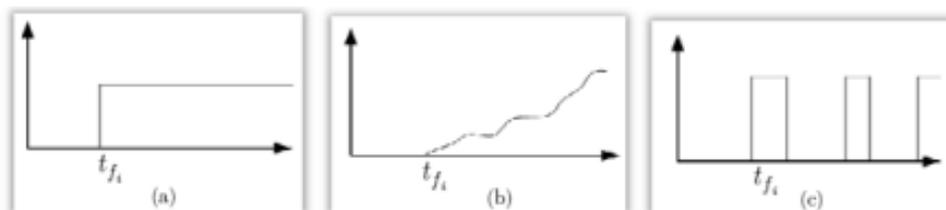


Figure 1-4: évolution temporelle des types de défauts

1.5 Principe de diagnostic

Un système de diagnostic est une couche logicielle ou matérielle qui permet de caractériser en temps réel le mode de fonctionnement d'un système en enregistrant le maximum d'informations sur les grandeurs pertinentes, en reconnaissant et en signalant les anomalies de comportement. Le diagnostic peut être réalisée en cours d'exploitation ou hors exploitation, le premier permet de traiter en temps réel les différents signaux et de réagir rapidement aux anomalies et se suit généralement d'une procédure de maintenance sur site, par contre, l'implémentation hors exploitation qui se permet de faire la maintenance préventive et qui aura lieu si le mode d'implémentation en exploitation n'a pas précisé la raison du dysfonctionnement du système. Le diagnostic se limite à des systèmes de traitement d'alarmes qui sont l'outil de base pour aider l'opérateur dans sa tâche de surveillance.

Un système de diagnostic doit réaliser les trois étapes suivantes :

1.5.1 La détection :

Principale étape du diagnostic, consiste à prendre une décision binaire, soit le système marche convenablement soit une panne s'est produite, ainsi l'instant d'occurrence du défaut ayant provoqué la panne. Le résultat de la procédure de détection est une alarme indiquant que le fonctionnement réel du système ne concorde plus avec le modèle de fonctionnement valide.

1.5.2 La localisation :

Consiste à déterminer d'une façon approfondie le composant ou l'ensemble défectueux. Elle peut être plus ou moins précise, pratiquement, il est rare de déterminer précisément le composant endommagé, par contre la fonction de localisation permettra de déterminer les éléments physiques susceptibles d'être la cause de défaut.

1.5.3 L'identification :

Elle consiste en la détermination du type de défaut en vue de définir le type de maintenance à réaliser sur l'installation. Cette étape nécessite la connaissance d'un modèle de la panne.

Généralement, les systèmes de diagnostic n'implémentent que la détection et la localisation.

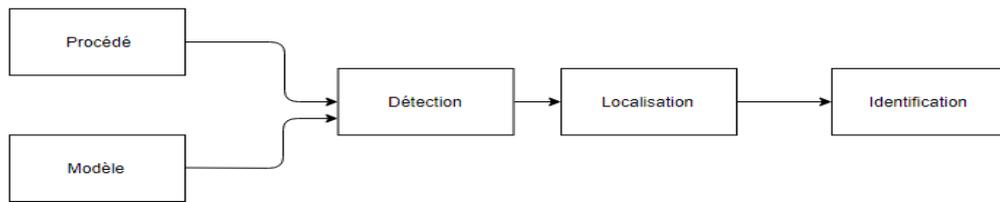


Figure 1-5 : Principe de surveillance.

1.6 Surveillance utilisant les modèles

Le principe de base de la surveillance des défauts repose sur le concept de redondance.

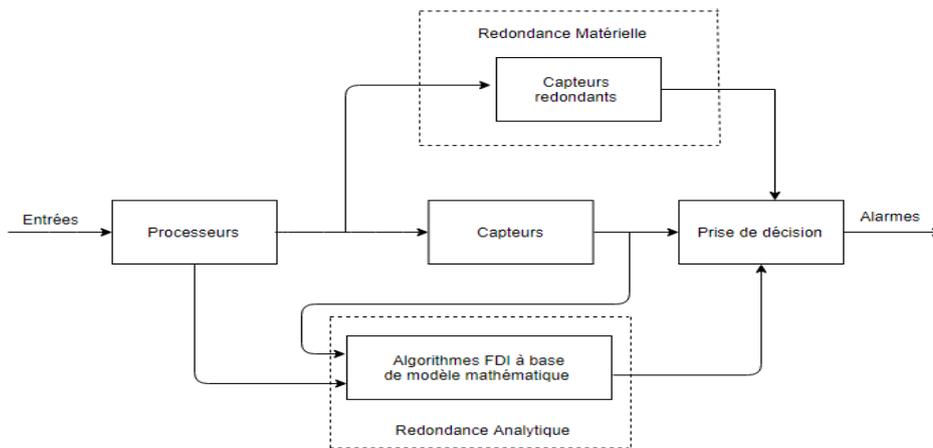


Figure 1-6: architecture de redondance physique et analytique.

1.6.1 Redondance physique (matérielle)

Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie car elle est très fiable, basée sur l'utilisation de plusieurs capteurs similaires afin de mesurer une variable particulière, l'utilisation de principe de vote sur les valeurs redondantes permet de décider de l'existence ou non d'un défaut, elle est mise en œuvre principalement sur les systèmes à haut risques tels que les centrales nucléaires ou l'aéronautique. Le majeur inconvénient de la redondance physique est le cout entraîné en augmentant le nombre des capteurs.

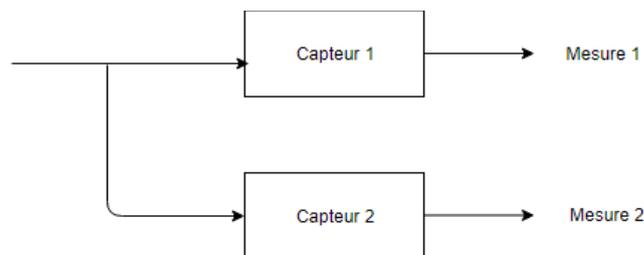


Figure 1-7: schéma explicatif de la redondance matérielle.

1.6.2 Redondance analytique (matrices de transfert/équations différentielles)

Elles sont plus simples, plus flexibles, moins coûteuses et plus écologiques au contraire de l'approche traditionnelle. Une équation de redondance analytique est une équation dans laquelle toutes les grandeurs sont connues. Pour éviter les fausses alarmes ou les manques de détection, ces équations doivent tenir compte des perturbations, des bruits de mesure ainsi que des erreurs de modélisation. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller, pour cela, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle.

Le principe du diagnostic utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision.

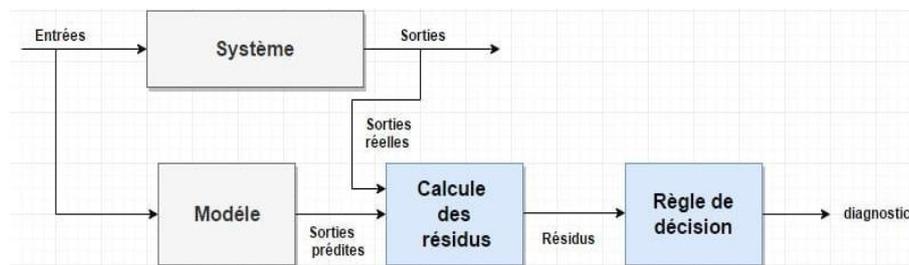


Figure 1-8 : Étape du diagnostic.

1.7 Les concepts fondamentaux du diagnostic

Le diagnostic repose sur les deux concepts suivants : d'une part signaler un défaut lorsqu'il apparaît et d'autre part le localiser le plus précisément possible, afin que les actions correctrices adéquates puissent être mise en œuvre. Ces deux concepts sont spécifiés comme la détection et l'isolation de défauts, la détection consiste à reconnaître un comportement anormal du système et l'isolation consiste à déterminer quel est ce comportement anormal. Remarquons bien que cette terminologie du diagnostic n'est pas figée et qu'il soit possible de trouver différentes notions résultantes toutes dans le même sens.

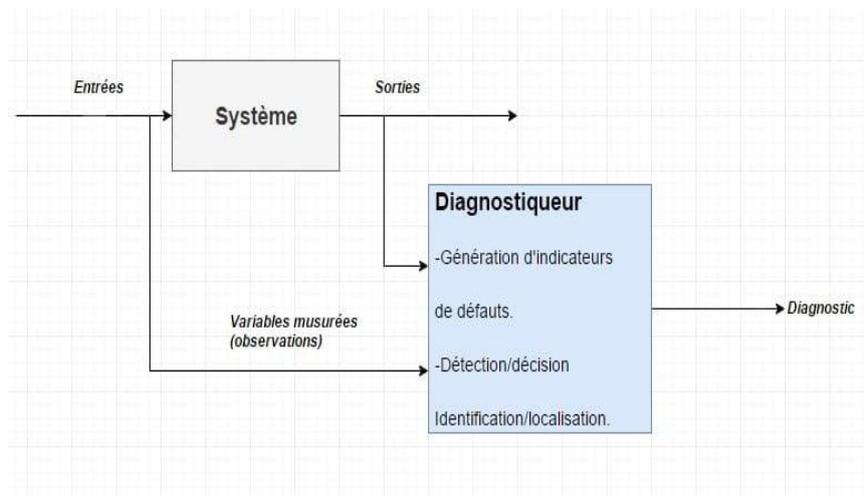


Figure 1-9: structure d'une procédure de diagnostic.

1.8 Les avantages/inconvénients du diagnostic

- Les Avantages du diagnostic
 - Applicable aux systèmes linaires et non linéaires.
 - Il s'agit de connaissance de conception plutôt que d'exploitation.
 - La connaissance sur le système est découplée de la connaissance de diagnostic.
 - Le coût de développement et de maintenance est moindre.
 - Méthode plus robuste aux bruits de mesures.
 - Possibilité de découpler les réponses des entrées inconnues.
- Les Inconvénients du diagnostic
 - Local du modèle.
 - Nécessité d'avoir un modèle précis et complet.
 - Pas de garantie de détection si le type de défaut n'a pas été modélisé.

1.9 Performance d'une procédure de diagnostic

Pour se garantir que le système de diagnostic développé est le plus performant possible, il faut tout d'abord définir les critères sur lesquels le système peut être évalué.

Les critères de performances du système de diagnostic peuvent se regrouper comme suit :

- Déteçtabilité :

Est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir découvrir la présence d'une défaillance sur le procédé. Elle est liée à la notion des résidus (indicateurs de défauts), le générateur de résidu doit être sensible à la défaillance que l'on souhaite détecter.

- L'isolabilité :

Est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une alarme engendre bien souvent des nouvelles alarmes qui augmente la difficulté de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la structure des résidus et à la procédure de détection elle-même.

- La sensibilité :

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

- La robustesse :

Détermine la capacité du système à détecter des défauts indépendamment des erreurs de modélisation (sensibilité du résidu aux défauts et l'insensibilité vis-à-vis les perturbations). Généralement, la robustesse est définie par rapport aux entrées inconnues.

En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes économiques sont essentielles. La rapidité de détection a un rôle déterminant, de même, les coûts économiques vont conditionner la stratégie de diagnostic (d'une façon plus claire : le système nécessite-t-il des composants trop chers pour sa conception, le temps de développement est-il trop important ? Autant de points à vérifier afin de satisfaire le cahier des charges).

1.10 Méthodes de diagnostic à base de modèles

Le principe de ces méthodes consiste à comparer le comportement réel du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif prédit afin de déterminer est ce que le système est en état de fonctionnement normal ou en dysfonctionnement. Ces techniques se distinguent selon plusieurs critères : la dynamique de procédé (continu, discret ou hybride), l'implémentation de diagnostic en ligne ou/et hors ligne, sa complexité, la nature d'information (qualitative et/ou quantitative), sa profondeur (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (distribuée, décentralisée ou centralisée) ...etc.

On peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI et les méthodes qualitatives issues des communautés intelligence

Chapitre 1

artificielle. La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approches peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic.

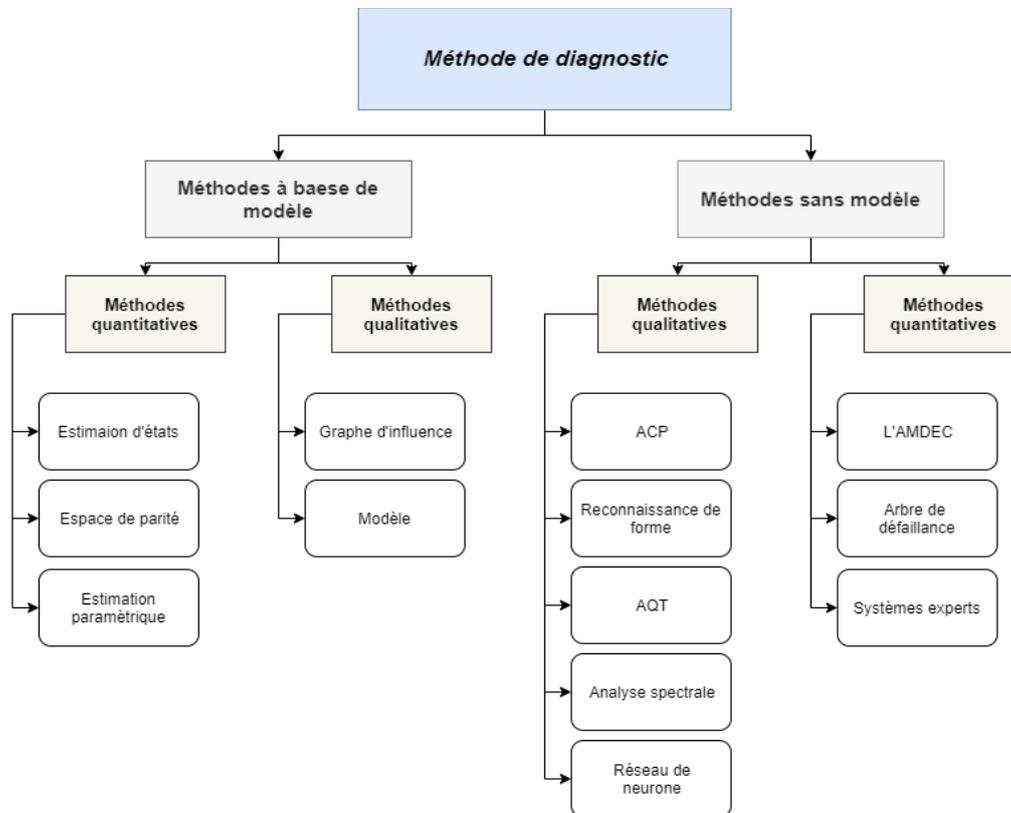


Figure 1-10 : Classification générale des méthodes de diagnostic.

1.10.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs

Basée sur la connaissance et l'expérience d'opérateur humain ayant une parfaite maîtrise du système à surveiller et nécessite l'existence d'un large éventail de données historiques correspondant aux divers états de fonctionnement du système. Suivant ce type d'approche, on trouve l'ensemble des méthodes reposées sur l'intelligence artificielle telle que :

- Les réseaux de neurones.
- Les systèmes d'inférence floue.
- Les systèmes experts.

Ainsi celles reposées sur les bonds graphs tels que :

- Bond graph.
- Graphes causaux.
- Graphe biparti.

1.10.2 Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs

Ce sont les méthodes utilisées par la communauté de l'automatique et connues sous le terme de Model-Based Fault Detection and Isolation (dont l'acronyme est FDI). Ils sont fondés sur l'idée de la redondance analytique. Ces méthodes, qui doivent d'abord avoir un modèle mathématique précis, estiment quelques grandeurs du système et les utilisent avec les mesures prélevées du système afin de procéder à la synthèse d'un schéma de diagnostic.

La détection de défauts basée sur l'utilisation de modèle peut être divisée en deux étapes principales : la génération de résidus et la prise de décision. La première s'effectue sur la base d'estimations (états ou paramètres) ou à l'aide d'un raisonnement heuristique, les signaux d'entrée et de sorties du système sont utilisés pour générer un résidu pour mettre en évidence la présence d'un défaut, ensuite et durant la deuxième étape les résidus sont analysés pour dire s'il y a présence de défaut ou non et il intervient au niveau de quel composant.

L'architecture générale de la détection de défaut basée sur l'utilisation des modèles quantitatifs est présentée à la figure 1-11 :

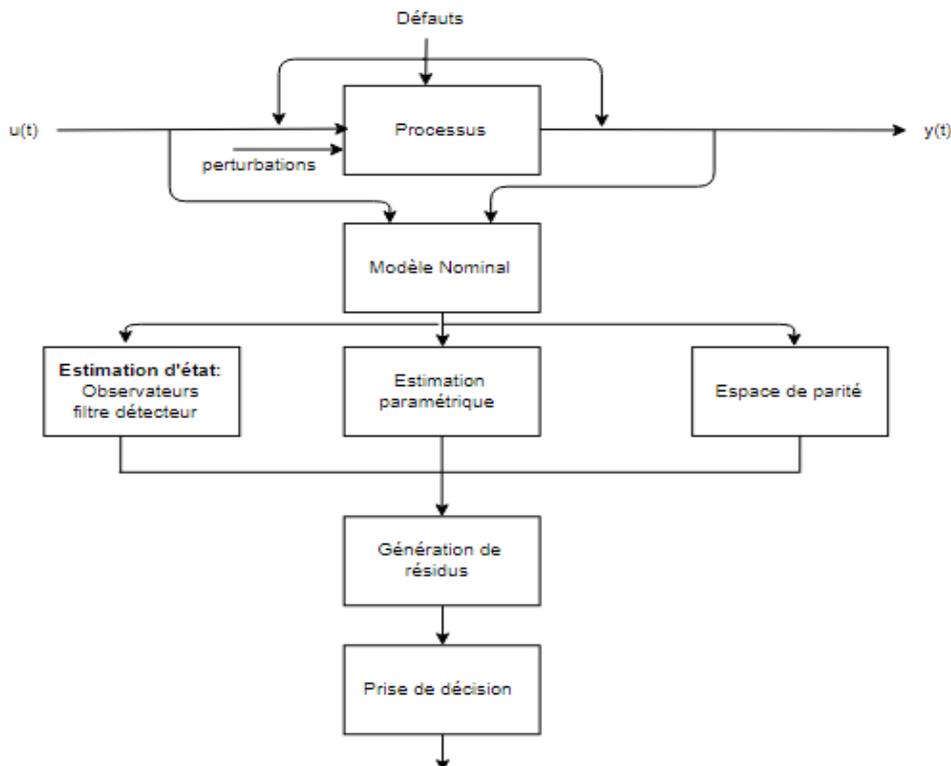


Figure 1-11 : Architecture générale à base de modèles quantitatifs.

Chapitre 1

1.10.2.1 Espace de parité :

Cette approche est basée sur le principe de transformer les équations du modèle de façon à obtenir des relations algébriques appelées des relations de redondance analytique (dont l'acronyme est *RRA*). Ces relations n'utilisent que des grandeurs connues et disponibles en ligne du système et les résidus sont alors obtenus en substituant dans ces relations les variables connues par leurs valeurs réelles, prélevées sur le système en fonctionnement. L'ensemble des valeurs que peuvent prendre les résidus compose alors un espace appelé espace de parité, comportant autant de dimensions qu'il existe de résidus, permettant d'éliminer les inconnues à l'aide des redondances. Dans cet espace, le vecteur de parité y est défini comme la valeur des résidus à un instant donné et prend alors une direction dans le cas de l'apparition d'un défaut. Tout l'enjeu consiste alors à transformer l'espace de parité de départ en un espace permettant de découpler les défauts : c'est-à-dire que chaque défaut soit uniquement représentatif d'un élément du vecteur.

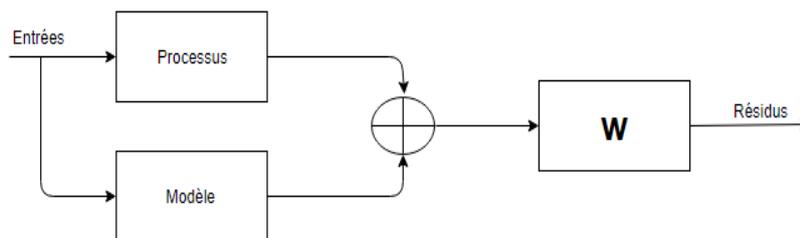


Figure 1-12 : principe de générateur des résidus à base de l'espace de parité.

1.10.2.2 Méthodes d'estimation paramétrique :

L'idée de base des méthodes d'estimation paramétriques est d'estimer, en temps réel, les paramètres du système et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts. On entend par paramétrer les constantes physiques du système (masse, coefficient de viscosité, ...etc.) ou une agrégation de plusieurs paramètres physiques. Pour ce dernier cas, une correspondance unique doit exister entre les paramètres du modèle et les paramètres du système.

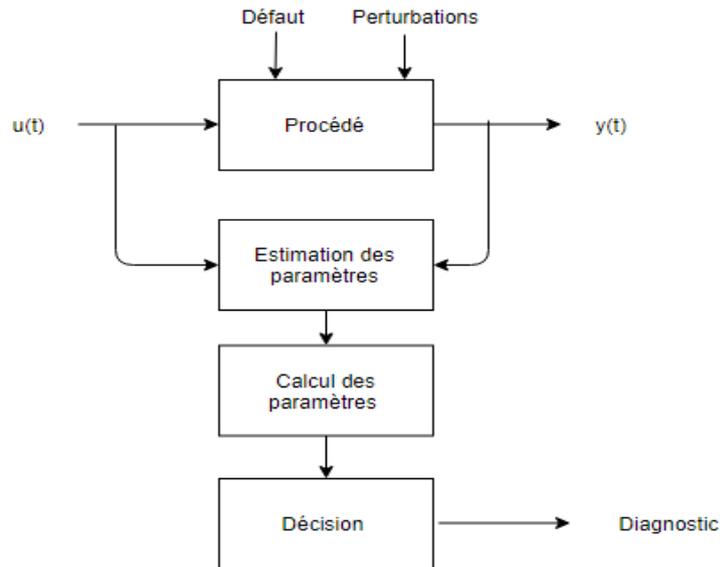


Figure 1-13 : Estimation paramétrique.

1.10.2.3 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Les approches à base d'observateurs ou de filtres, bien connues dans le monde de l'automatique, sont les plus couramment utilisées et les premiers travaux datent des années 70. R.V. Beard était le créateur de l'idée de diagnostic par observateur en 1971, suivie par Robert Clark de l'Université de Washington en 1975, depuis, plusieurs chercheurs ont rejoint la ligne de R.V. Beard et Robert Clark, comprenant Paul Frank d'Allemagne en 1980, M.Massoumnia en 1986 et 1989, Viswanadham en 1987, R.J.Patton en 1989 et J.White et J.Speyer en 1987.

Plusieurs types d'observateurs ont été utilisés pour détecter les défauts dans les processus. Nous pouvons citer les observateurs de rang complet ou réduit, les observateurs généralisés, filtres détecteurs, les observateurs à modes glissants, les observateurs Takagi-Sugeno flous, les observateurs à entrées inconnues, le filtre de Kalman et les observateurs à grand gain. Les observateurs sont aussi utilisés pour estimer les paramètres de la machine, c'est le cas des observateurs adaptatifs, le filtre de Kalman étendu et l'observateur à grand gain non linéaire.

L'idée principale des méthodes de génération du vecteur des résidus à base d'observateurs est d'estimer une partie ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables. De la comparer avec la sortie mesurée réellement, puis à générer l'écart entre ces deux fonctions et l'utiliser comme résidu. En absence de défauts, les

Chapitre 1

différences convergent vers zéro, dès qu'un défaut apparaisse, ces différences ne sont plus égales à zéro.

Dans le cas des systèmes linéaires, la structure de base des reconSTRUCTEURS est toujours la même, un modèle parallèle corrigé à l'aide de l'erreur d'estimation multipliée par un gain adéquat, mais dans le cas non linéaire le problème s'avère difficile.

En diagnostic, la construction d'observateur est beaucoup plus complexe que ce qu'il en est dans le cas de la commande linéaire où la mesure et les paramètres d'observateurs jouent un rôle aussi sur la façon dont les défauts vont affecter les résidus. En plus d'assurer la stabilité, ces paramètres doivent permettre de structurer les résidus dans le but de localiser les défauts. Cependant, pour ce type de stratégie, si une anomalie apparaît, elle affecte en général toutes les composantes des vecteurs résidus, de ce fait, le problème de localisation est plus complexe que ce qu'il en est dans le cadre de l'espace de parité. Pour résoudre ce problème, une solution consiste à construire des bancs d'observateurs où chacun d'entre eux surveille un défaut.

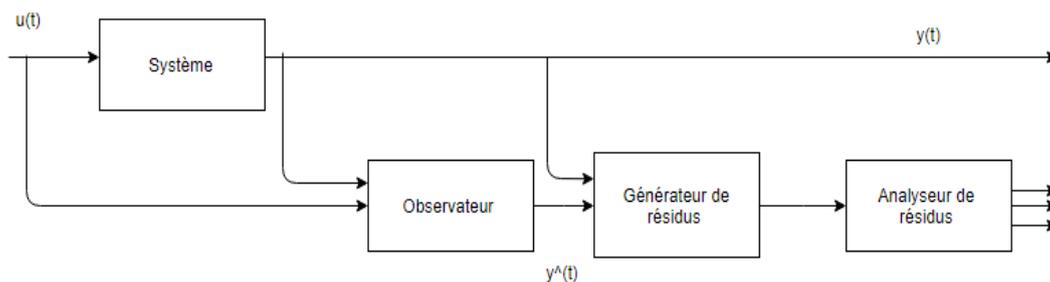


Figure 1-14 : Un observateur générateur de résidus.

- **Observateur à entrées inconnues :**

Un processus physique est souvent soumis à des perturbations qui ont comme origine des bruits dus à l'environnement du processus ou des incertitudes de mesures, des défauts de capteurs ou d'actionneurs. Ces perturbations ont des effets néfastes sur le comportement sain du processus, et leurs estimations peuvent servir à concevoir un système de commande capable de minimiser les effets. Les perturbations sont appelées entrées inconnues, lorsqu'elles affectent l'entrée du processus, et leurs présences peut rendre difficile l'estimation de l'état du système. Plusieurs travaux ont été réalisés, concernant l'estimation de l'état et de la sortie en présence d'entrées inconnues. Ils peuvent être regroupés en deux catégories : La première suppose la connaissance à priori d'informations sur ces entrées non

mesurables en particulier, le chercheur C.D.Johnson en 1975 propose une approche polynomiale et J.S.Meditch en 1971 suggère d'approcher les entrées inconnues par la réponse d'un système dynamique connu. La deuxième procède soit par estimation de l'entrée inconnue, soit par son élimination complète des équations du système.

Parmi les techniques que ne nécessitant pas l'élimination des entrées inconnues, divers auteurs ont proposé des méthodes de conception d'observateurs permettant de reconstruire entièrement l'état d'un système linéaire en présence d'entrées inconnues telle que L.C.Wang en 1975, J.Moreno en 2001 et C.S.Liu et H.Peng en 2002 en utilisent une méthode d'inversion de modèle pour l'estimation d'état.

Parmi les techniques qui permettent l'élimination des entrées inconnues, celle de P.Kudva. P.Kudva en 1980 s'est intéressé, dans le cas d'un système linéaire, aux conditions d'existence de l'observateur à entrées inconnues en s'appuyant sur la technique d'inverse généralisée de matrice. Y.Guan et M.Saif ont procédé à l'élimination des entrées inconnues des équations d'état d'un système linéaire continu en 1991.

L'utilisation d'observateurs à entrées inconnues pour le diagnostic de défaut et les systèmes de surveillance de processus a encore attiré largement d'attention telle que M.Saif en 1993, S.K.Dassanayake a considéré un observateur, en éliminant les entrées inconnues dans les équations d'état, pour pouvoir détecter et isoler de nombreux défauts de capteurs, en présence d'entrées inconnue.

1.11 Conclusion :

Le diagnostic est une discipline qui vise le développement d'algorithmes permettant de déterminer si le comportement d'un système est conforme au comportement espéré ou nominal, l'algorithme doit être capable de déterminer le plus précisément possible quelles parties du système sont fautives et de quels types de dysfonctionnements elles souffrent.

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale un état d'art non exhaustif sur le diagnostic de défauts suivi par la présentation principale des méthodes de diagnostic, ainsi que les différentes natures de défauts qui peuvent affectés le système.

Chapitre 2 : Synthèse d'un observateur

2.1 Introduction

Une bonne maîtrise d'un procédé passe en général par une bonne information sur ce procédé, les variables directement mesurées ne couvrent généralement pas la totalité des grandeurs susceptibles de décrire le comportement du procédé (les états), on peut se poser le problème de reconstruction de l'information non directement mesurée au moyen de celle disponible : c'est le rôle de l'estimateur d'états qui porte le nom d'observateur dans un cadre déterministe et de filtre dans un cadre stochastique, en effet, pour reconstruire l'état et la sortie d'un système, il faut savoir si les variables d'état sont observables ou non. En général, pour des raisons de réalisabilité techniques, de coût, etc.... la dimension du vecteur de sortie est inférieure à celle de l'état. Ceci entraîne qu'à l'instant donné t , l'état $x(t)$ ne peut pas être déduit algébriquement de la sortie $y(t)$ à cet instant, par contre, sous des conditions d'observabilité qui seront expliquées ailleurs, cet état peut être déduit de la connaissance des entrées et sorties sur un intervalle de temps passé.

La théorie de l'observateur d'état a été introduite pour la première fois par Kalman et Bucy pour un système linéaire dans un environnement stochastique (Filtre de Kalman-Bucy). Ensuite l'apparition de Luenberger qui a fait une théorie générale des observateurs pour les systèmes linéaires déterministes, introduisant notamment les notions d'observateur réduit et d'observateur plein. Les observateurs linéaires ont donné lieu à des travaux récents, allant vers une généralisation toujours plus approfondie.

La robustesse des observateurs est un problème très important il faut la prendre en considération. Les observateurs linéaires ont donné lieu à des travaux récents, allant vers une généralisation toujours plus approfondie afin de construire des observateurs de plus en plus robustes.

Il est fréquent, lors d'une modélisation d'un système, de faire intervenir des entrées qui ne sont pas mesurables. On utilise alors le vocable d'entrées inconnues pour les désigner et la reconstruction de l'état de ce système ne peut se faire que sous certaines conditions, pour cela on utilise un type particulier d'observateurs, les observateurs à entrées inconnus.

Au cours de ces dernières décennies, beaucoup d'activités de recherche ont axées sur le problème de l'estimation de l'état des systèmes dynamiques, ceci est justifié par le fait que l'estimation de l'état est une étape importante, voire essentielle pour la synthèse des lois de contrôle, pour le diagnostic ou la supervision des systèmes industriels.

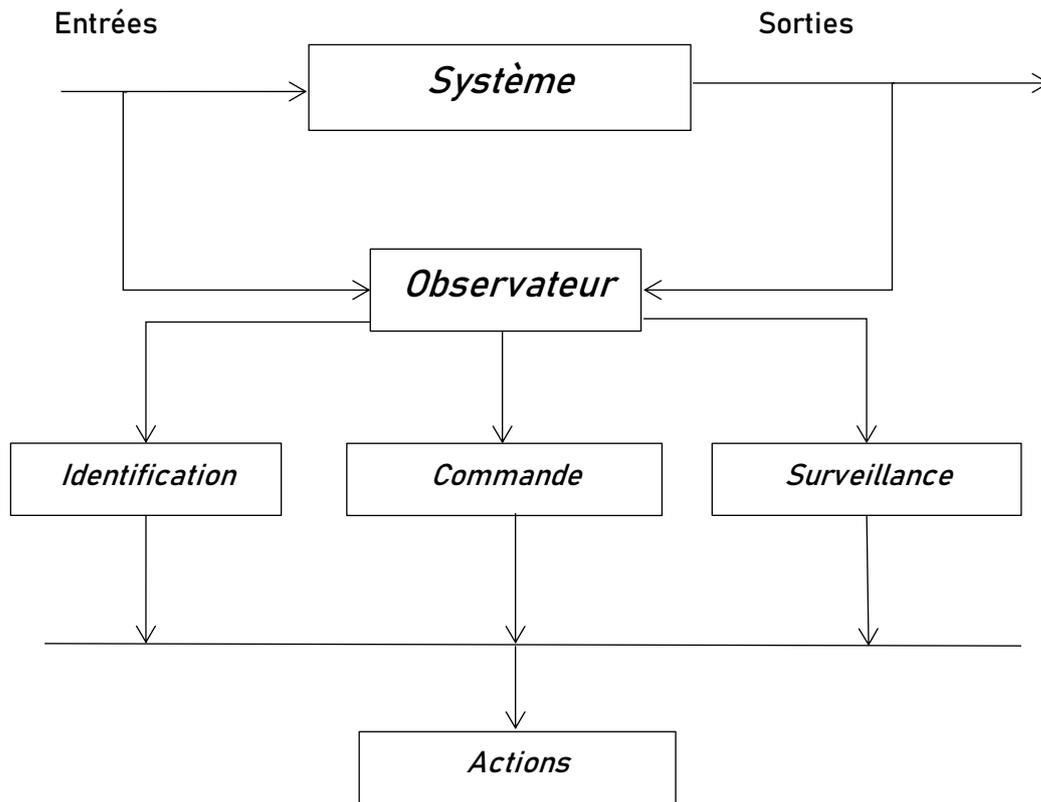


Figure 2-1 : le rôle d'observateur.

2.2 Système dynamique

Un système est un ensemble organisé d'éléments interagissant les uns avec les autres et avec l'extérieur, dans le but de réaliser une fonction déterminée. Il est dit dynamique si son comportement évolue au fil du temps. D'un point de vue conceptuel il peut être représenté comme suit :

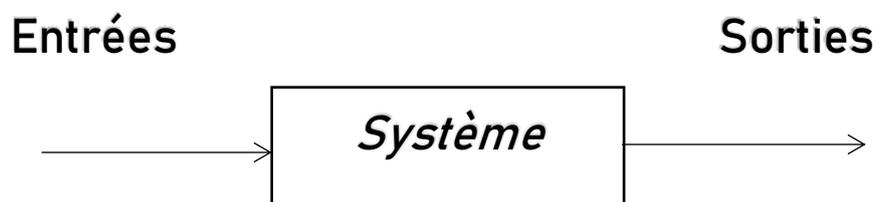


Figure 2-2 : représentation d'un système dynamique.

2.2.1 Système non linéaire

La majorité des systèmes industriels se modélisent par des systèmes non linéaires, en raison des différents types de non-linéarités qui peuvent intervenir dans la modélisation, il est très difficile d'établir des méthodes générales comme dans le cas des systèmes linéaires.

La représentation d'état d'un système dynamique non linéaire est définie par les équations :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) \\ y = g(x, u, t) \end{cases}$$

Où la variable t représente le temps, x le vecteur d'état, u le vecteur de commande ou entrée, y le vecteur de mesure ou de sorties. f et g sont les fonctions non linéaires correspondant respectivement à l'équation dynamique de l'état et à l'équation de mesure.

2.2.2 Système linéaire

Est un système pour lequel les entrées et les sorties obéissent au principe de superposition, généralement, ils sont liés par une équation différentielle linéaire à coefficients constants. Un système linéaire est donné par l'équation :

$$a_0 y + a_1 \dot{y} + \dots + a_n y^{(n)} = b_0 u + \dots + b_m u^{(m)}$$

On dit qu'un système de type entrées-sorties est linéaire où obéit au principe de superposition si :

- À la somme de deux entrées quelconques correspond la somme des deux sorties correspondantes,

$$f(x_1) + f(x_2) = f(x_1 + x_2)$$

- À un multiple d'une entrée quelconque correspond le même multiple de la sortie correspondante.

$$a \cdot f(x_1) = f(a \cdot x_1)$$

Malgré les différents travaux réalisés dans le cadre du diagnostic des systèmes non linéaires, la mise en pratique de ces méthodes nécessite un coût assez élevé. Souvent les méthodes linéaires sont préférées.

Chapitre 2

2.2.2.1 Représentation d'état d'un système linéaire

Une représentation d'état permet de modéliser un système dynamique sous forme matricielle en utilisant des variables d'état, cette représentation (qui peut être linéaire ou non, continue ou discrète) permet de déterminer l'état du système à n'importe quel instant t si l'on connaît l'état à l'instant initial t_0 et le comportement des variables qui influent sur le système.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Où A, B, C et D sont des matrices représentant respectivement la matrice d'état, matrice de commande, matrice d'observation, matrice d'action directe. x le vecteur d'état, u le vecteur de commande ou entrée, y le vecteur de mesure ou de sortie.

Ceci est le cas le plus général. Les matrices A, B, C et D sont souvent invariantes dans le temps, alors elles sont des matrices constantes.

La représentation sous forme de schéma bloc est la suivante :

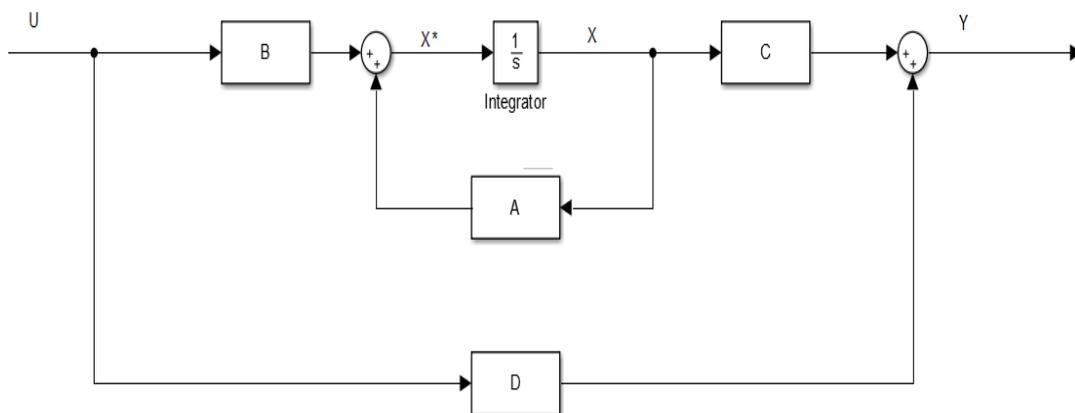


Figure 2-3 : représentation d'état d'un système linéaire.

2.2.3 Linéarisation d'un système non linéaire

Dès qu'un système dynamique est non linéaire, il est possible de le transformer en un système linéaire autour d'un point d'équilibre. On va illustrer une méthode de linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

En général, un système non linéaire est décrit par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) \\ y = g(x, u, t) \end{cases}$$

Le point d'équilibre est donné par :

$$f(x_{eq}, u_{eq}) = 0$$

On calcule les matrices :

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}}$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{pmatrix} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}}$$

$$C = \frac{\partial g}{\partial x} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial x_n} \end{pmatrix} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}}$$

$$D = \frac{\partial g}{\partial u} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_p}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_p}{\partial u_m} \end{pmatrix} \Big|_{x_{eq}, u_{eq}}$$

Ou A, B, C et D sont des matrices jacobéennes des dérivés f et g par rapport à x et u au point d'équilibre.

Le système linéarisé est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Chapitre 2

2.3 Principe de l'observateur

Dans la plupart des systèmes industriels, les variables d'états ne sont pas toutes accessibles à la mesure, seules l'entrée u et la sortie y qui sont accessibles. Le principe d'observation est de reconstruire un vecteur \hat{x} , qui soit aussi proche que possible de x , à partir des données exploiter de la commande u et la sortie y .

La synthèse d'un observateur (appeler aussi estimateur d'état ou capteur virtuel) consiste à trouver un modèle d'état pour l'observateur en s'appuyant sur le modèle d'état du système.

Au début et avant toute synthèse d'observateur, on doit se demander si sa conception est possible, la notion d'observabilité et quelques propriétés des entrées appliquées au système fournissent des conditions nécessaires à la synthèse d'un observateur, nous discutons dans cette partie l'observabilité des systèmes linéaires.

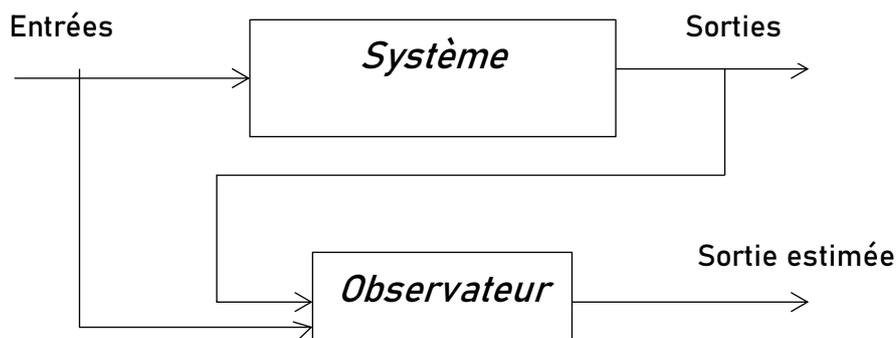


Figure 2-4 : Principe de l'observateur.

2.4 Notions relatives aux observateurs

En représentation d'état, il est important d'être capable de connaître à chaque instant l'état du système ainsi son vecteur d'état x associé, certaines variables d'état sont faciles à mesurer à l'aide d'un capteur placé au bon endroit, dans ce cas la variable d'état considéré est mesurable. Dans les systèmes industriels, les variables d'état ne sont pas toutes accessibles à la mesure alors on doit vérifier si la grandeur considérée est observable à partir de la mesure de la sortie.

2.4.1 Observabilité d'un système linéaire

- Définition : Le système linéaire

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Est dit observable à l'instant t_0 si $\forall t_1 > 0$, l'état $x(t_0) = x_0$ peut-être déterminé à partir de $u(t)$, $t \in [t_0, t_1]$ et $y(t)$, $t \in [t_0, t_1]$. Autrement le système est dit inobservable.

- Théorème :

La paire (C, A) est observable si la matrice d'observabilité $O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix}$ est de rang complet.

- Théorème :

$$\det \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \neq 0 \Rightarrow \text{rang} \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} = n$$

2.4.2 Observabilité des systèmes non linéaires

Pour les systèmes non linéaires, l'observabilité est fondée sur la possibilité de différencier deux conditions initiales distinctes, on parlera ainsi de la distinguabilité d'un couple de conditions initiales.

2.4.3 Détectabilité d'un système

Une notion légèrement plus faible que l'observabilité est la détectabilité. Un système est détectable si tous les états inobservables sont stables.

- Définition : Un système linéaire est dit détectable si ses pôles non observables appartiennent tous au demi-plan gauche ouvert.
- Remarque : Observabilité \Rightarrow détectabilité.

2.5 Observateurs des systèmes linéaires

On considère par suite le modèle dynamique d'un système linéaire défini comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Kw(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases}$$

Chapitre 2

avec : $w(t)$ et $v(t)$ sont deux (2) bruits blancs gaussiens d'espérance nulle.

- Théorème : Un observateur linéaire existe pour un système linéaire si et seulement si la paire (C, A) est détectable.

2.5.1 Observateur de Luenberger

Ce type d'observateur a été proposé par David G. Luenberger en 1966, dans le cas général, (le cas d'une seule sortie, ayant été publié dès 1964). L'observateur déterministe de Luenberger permet de reconstituer l'état d'un système observable à partir de la mesure des entrées et des sorties.

La théorie de l'observation de Luenberger repose sur des techniques de placement de pôles. On se place dans le cas déterministe, où les bruits w et v sont nuls.

Luenberger présente l'observateur suivant pour un système linéaire :

$$\begin{cases} \hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

Pour la simulation, une forme plus aisée peut être utilisée :

$$\begin{cases} \hat{\dot{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + (B \quad L) \begin{pmatrix} u(t) \\ y(t) \end{pmatrix} \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

Où L représente la matrice de gain de l'observateur, elle est calculée de telle sorte que l'état estimé $\hat{x}(t)$ tend vers l'état réel $x(t)$ du système quand $t \rightarrow \infty$, quels que soient les états initiaux $x(0)$ et $\hat{x}(0)$.

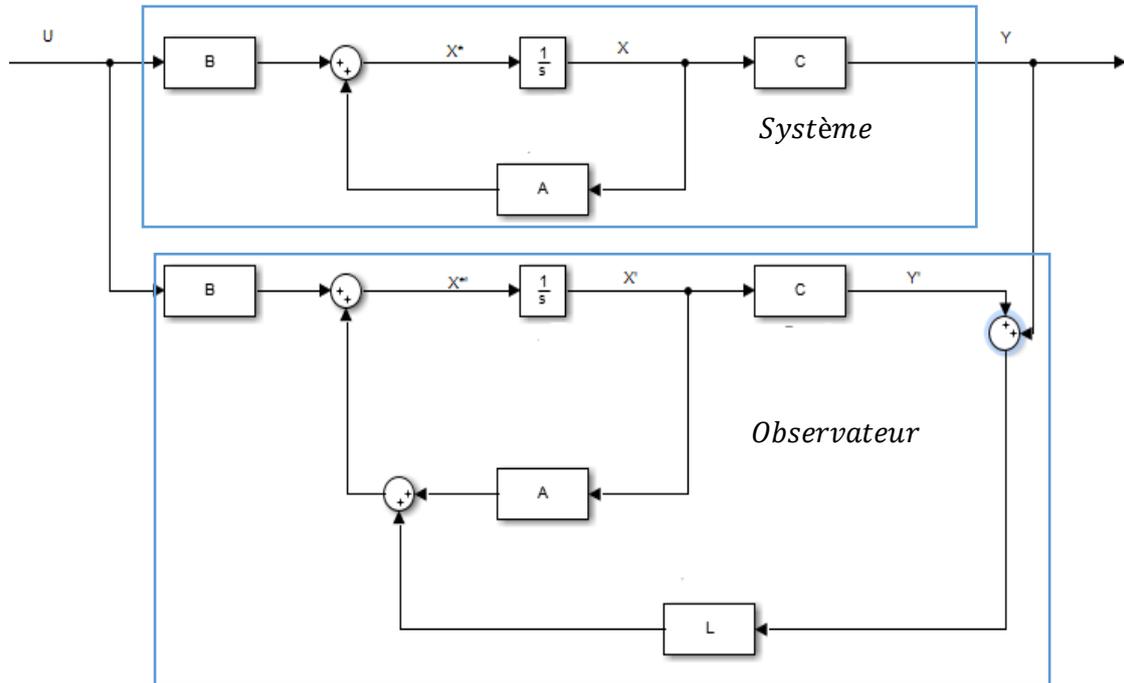


Figure 2-5 : Schéma Block d'observateur de Luenberger.

Un estimateur d'état fournit un état proche de celui du système réel, on définit l'erreur d'estimation comme suit $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, la dynamique de l'erreur d'estimation est alors :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}}$$

$$\dot{e} = A(x - \hat{x}) - LC(x - \hat{x})$$

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

Cette dynamique ne dépend pas de l'entrée et elle peut être réglée arbitrairement par le théorème de placement de pôles.

Remarque :

En présence des bruits w et v , la dynamique de l'erreur est régie par l'équation :

$$\dot{e} = (A - LC)e(t) + Kw(t) - Lv(t)$$

Cette erreur est donc sensible aux bruits, l'étude du gain fréquentiel permet de quantifier l'influence des bruits sur l'erreur d'estimation.

Chapitre 2

L'objectif est de faire converger le vecteur $e(t)$ vers zéro avec $e(0) = x_0 - \widehat{x}_0$. Donc si $e(0) \neq 0$, $e(t) \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow \infty$ ssi $(A - LC)$ est stable c'est-à-dire toutes ses valeurs propres sont négatives.

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

En utilisant une technique de placement de pôles, il suffit alors de choisir le gain L de l'observateur d'une façon que les valeurs propres de la matrice $(A - LC)$ soient dans le demi-plan complexe gauche. Pour une bonne estimation de l'état, la dynamique de l'observateur est choisie plus rapide que celle du processus. Pour cela, on fixe les valeurs propres de l'observateur dans le demi-plan gauche du plan complexe de sorte que leurs parties réelles soient plus grandes en valeur absolue que celles de la matrice d'état A .

- Choix des pôles :

Le choix de pôles dépend toujours du système observé et des performances voulues. Voici quelques règles fondamentales à respecter :

- Les pôles choisis doivent être stables.
- Les pôles ne doivent pas être trop proches de l'axe imaginaire, une petite variation de modèle peut provoquer une instabilité.
- Les pôles complexes conjugués seront choisis pour présenter un dépassement convenable (inférieur à 20%) sinon le régime transitoire sera long.
- Les pôles ne doivent pas être trop rapides (4 à 10 fois plus rapides que les pôles du système).

La figure suivante résume ces règles :

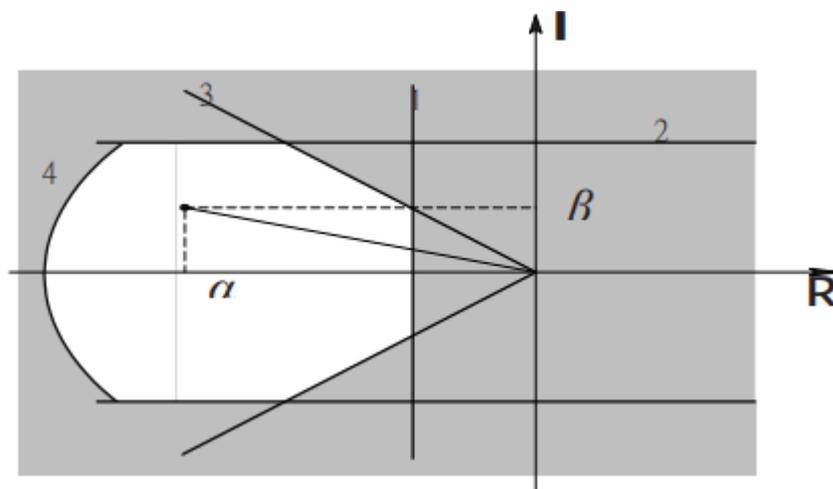


Figure 2-6 : Le choix des pôles.

2.5.1.1 Exemple

Prenant le système défini par le quadruplet $\{A, B, C, D\}$ avec

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 2 & -2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad C = (1 \ 0), \quad D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

On désire construire un observateur ayant pour pôles -2 et -5, en conséquence la matrice (A-LC) a comme pôles -2 et -5 et le polynôme caractéristique associé est

$$P_{des}(\lambda) = (\lambda + 2)(\lambda + 5)$$

$$\Rightarrow P_{des}(\lambda) = \lambda^2 + 7\lambda + 10$$

En posant $L = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix}$:

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 2 & -2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} (1 \ 0) = \begin{pmatrix} -1 - l_1 & 1 \\ 2 - l_2 & -2 \end{pmatrix}$$

Le polynôme caractéristique associé s'écrit alors :

$$P_{A-LC}(\lambda) = \lambda^2 + (3 + l_1)\lambda + 2l_1 + l_2$$

Il suffit de faire une identification $P_{A-LC}(\lambda) \equiv P_{des}(\lambda)$ pour obtenir la valeur de L et $A - LC$

$$\begin{cases} (3 + l_1) = 7 \\ 2l_1 + l_2 = 10 \end{cases}$$

$$L = \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix}, \quad A - LC = \begin{pmatrix} -5 & 1 \\ 0 & -2 \end{pmatrix}$$

2.5.2 Observateur à entrées inconnues :

La conception d'observateur à entrées inconnues (OEI) a fait l'objet dernièrement, ce type d'observateurs a suscité l'attention de beaucoup de chercheurs.

Parmi les travaux précurseurs marquants, citons les travaux de J.S.Meditch (1973) et de C.D.Johnson (1975) qui posent les fondements de la construction d'observateurs quand le comportement des entrées inconnues est supposé régi par une équation différentielle. Ces entrées inconnues, c'est à dire les perturbations ou les défauts, sont alors estimées. Dans le cas le plus courant où seule la matrice de distribution des entrées inconnues est connue, les approches algébriques sont les plus utilisées et font souvent intervenir les techniques utilisant des pseudo-inverses. Les conditions d'existence des (OEI) ont été définies par

Chapitre 2

P.Kudva (1980), dans le cadre de la conception d'un observateur à gain de Luenberger soumis à des entrées inconnues.

La reconstruction de l'état d'un système dynamique linéaire, dont une partie des entrées n'est pas mesurable, a un grand intérêt dans la pratique. Dans de telles circonstances, un observateur conventionnel, qui exige la connaissance de toutes les entrées, ne peut pas être utilisé directement. L'observateur à entrées inconnues a été développé pour estimer l'état d'un système, en dépit de l'existence des entrées inconnues ou des perturbations en les éliminant dans les équations d'état.

La reconstruction d'un observateur à entrées inconnues :

Le principe de reconstruction de l'observateur à entrées inconnues consiste à rendre l'erreur d'estimation indépendante des perturbations non mesurables. Considérons le système à surveiller, supposé correctement décrit par la représentation d'état suivante :

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

Notons :

F_x et F_y désignent respectivement la distribution des défauts actionneurs et défauts capteurs.

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

$d(t)$ est le vecteur des perturbations dénommé le vecteur des entrées inconnues.

$f(t)$ représente un vecteur de défauts d'actionnement variant dans le temps.

La structure de l'observateur généralement adoptée est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Mz(t) + Nu(t) + Py(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) - L_y y(t) \end{cases}$$

Où M , N , P et L_y sont des matrices inconnues de dimensions appropriées.

Le schéma de principe d'observateur d'entrée inconnue est illustré à la figure 2-7.

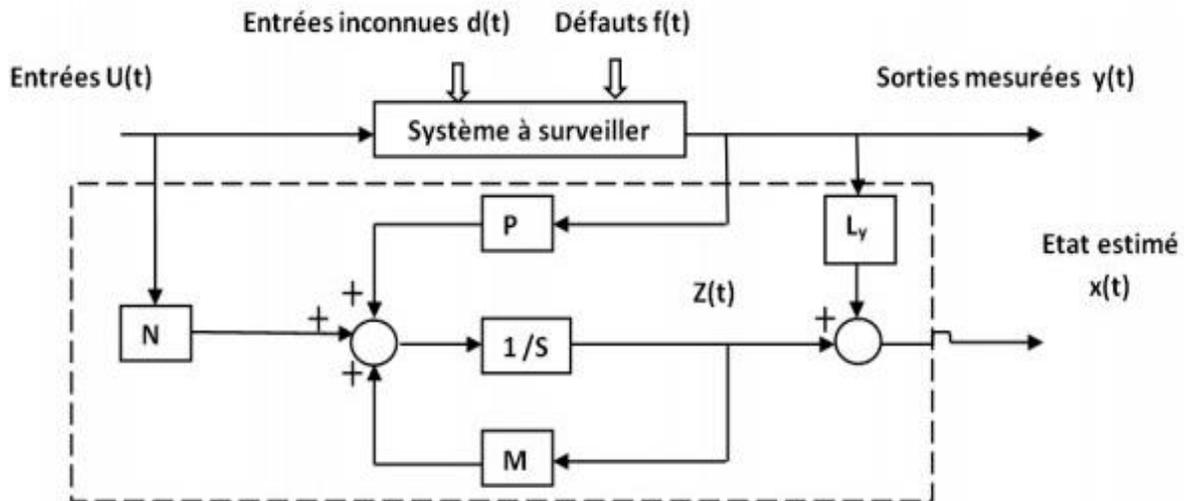


Figure 2-7 : Schema bloc d'un OEI.

Ces matrices vont être déterminées de façon que l'estimé $\hat{x}(t)$ converge asymptotiquement vers l'état réel $x(t)$ du système, malgré l'influence des perturbations.

L'erreur de reconstruction d'état $e_x(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ s'écrit :

$$e_x(t) = z(t) - L_y y(t) - x(t) = z(t) - (I + L_y C)x(t) - L_y F_y f(t)$$

L'entrée inconnue $d(t)$ n'intervient pas dans l'expression de l'erreur de sortie et donc elle n'est pas détectable par le résidu correspondant. Cependant, on peut y trouver un autre intérêt : le résidu reste sensible aux erreurs de capteurs et d'actionneurs et donc on dispose d'un moyen pour discriminer une erreur affectant le système, d'une erreur de capteur ou d'actionneur.

En posant $E = I + L_y C$ il vient :

$$e_x(t) = z(t) - E x(t) - L_y F_y f(t), \text{ soit aussi : } z(t) = e_x(t) + E x(t) + L_y F_y f(t)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation d'état est alors :

$$\begin{aligned} \dot{e}_x(t) = & M e_x(t) + (M E + P C - E A)x(t) + (N - E B)u(t) + (M L_y F_y + P F_y - E F_x)f(t) \\ & - L_y F_y \dot{f}(t) - E D_x d(t) \end{aligned}$$

Si les conditions suivantes sont vérifiées :

$$\left\{ \begin{array}{l} M \text{ est de Hurwitz} \\ M E + P C = E A \\ N = E B \\ E D_x = 0 \\ M L_y F_y + P F_y - E F_x \neq 0 \\ L_y F_y \neq 0 \end{array} \right.$$

Chapitre 2

Alors la dynamique de l'erreur d'estimation devient indépendante de l'état, de l'entrée de commande et de l'entrée inconnue, elle n'est sensible qu'aux défauts.

$$\dot{e}_x(t) = Me_x(t) + (ML_yF_y + PF_y - EF_x)f(t) - L_yF_y\dot{f}(t)$$

La résolution du système de conditions précédent consiste, en premier lieu, à assurer la condition de découplage des entrées inconnues, c-à-d à satisfaire $ED_x = 0$. Or, $E = I + L_yC$, d'où :

$$(I + L_yC)D_x = 0 \rightarrow L_yCD_x = -D_x$$

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

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

La matrice L_y n'existe que si la matrice $(CD_x)^T(CD_x)$ est inversible. Cette matrice étant de dimension $n_d \times n_d$ elle n'est pas inversible que si $Rang(CD_x) = n_d$, où n_d représente le nombre d'entrées inconnues. Finalement, le découplage n'est possible que si le rang de la matrice CD_x est égal au nombre d'entrées à découpler.

La synthèse de l'observateur à entrées inconnues :

1. Vérifier que $Rang(CD_x) = n_d$, puis calculer $L_y = -D_x[(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T$.
2. A partir de L_y calculer $E = I + L_yC$.
3. A partir de E calculer $N = EB$.
4. Imposer que M soit une matrice de Hurwitz. On peut à cet effet choisir pour M une matrice diagonale faisant apparaître les valeurs propres désirées pour l'observateur.
5. Calculer la matrice P telle que $PC = EA - ME$.

Calculons à présent la matrice de transfert reliant les défauts à l'erreur d'estimation en sortie. Posons $F = ML_yF_y + PF_y - EF_x$ et $F' = -L_yF_y$. La transformée de Laplace de l'expression de l'erreur s'écrit alors :

$$se_x(s) = Me_x(s) + Ff(s) + F'sf(s) \rightarrow e_x(s) = (sI - M)^{-1}(F + F')f(s)$$

L'erreur d'estimation en sortie est :

$$e_y(s) = \hat{y}(s) - y(s) = C\hat{x}(s) - x(s) - F_yf(s) = Ce_x(s) - F_yf(s)$$

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

$$\begin{cases} e_y(s) = [C(sI - M)^{-1}(F + sF') - F_y]f(s) \\ F = ML_yF_y + PF_y - EF_x \\ F' = -L_yF_y \end{cases}$$

Générons un vecteur de résidus $r(s)$ telle que :

$$\begin{cases} r(s) = e_y(s) = G_f(s)f(s) \\ G_f(s) = [C(sI - M)^{-1}(F + sF') - F_y \end{cases}$$

2.5.2.1 Exemple

Soit le système d'écrit par la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 100 & -10 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, F_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

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

$$L_y = -D_x[(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$E = I + L_yC = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad N = EB = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

On impose que M est une matrice de Hurwitz. En choisissant M diagonale, $M = \text{diag}[-5, -6, -7]$, calculons la matrice P telle que $PC = EA - ME$, comme C unitaire, on a directement :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & -7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 5 & -1 & 0 \\ 0 & 100 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_{y1} \\ e_{y2} \\ e_{y3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 + y_3 \end{bmatrix} \end{cases}$$

Chapitre 2

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé des généralités sur les observateurs linéaires et non linéaires en indiquant la méthodologie de synthèse d'observateur à gain de Luenberger et de l'observateur à entrées inconnues.

Nous avons commencé par rappeler quelques définitions relatives à l'observabilité des systèmes dynamiques, cette dernière s'avère difficile à vérifier lorsqu'il s'agit des systèmes non linéaires et plus souvent on se contente de vérifier l'observabilité autour d'un point d'équilibre. Puis nous avons présenté les observateurs linéaires, deux exemples d'applications sont illustrés, ces deux types d'observateur peuvent être utilisés dans le domaine du diagnostic dans le but de détecter des défauts, ce qui est le but du prochain chapitre.

Chapitre 3 : Observateurs d'états pour le diagnostic

Chapitre 3

3.1 Introduction

En pratique, le diagnostic est plus complexe car le modèle mathématique du système est imparfait d'où la nécessité de prendre en considération les incertitudes de modélisation toujours présentes ainsi les différentes perturbations auxquelles les systèmes sont inévitablement soumis, par conséquent une robustesse du générateur de résidu face à ses différentes incertitudes est obligée.

Ce chapitre montre la logique du diagnostic des systèmes dynamiques à l'aide de deux types différents d'observateur, l'observateur à gain de Luenberger et l'observateur à entrées inconnues sur l'ensemble des défauts cités auparavant : actionneurs-capteurs-modèle et sur les bruits de mesures et perturbations qui affecte les systèmes en présence d'entrées inconnues.

3.2 Etapes de diagnostic

3.2.1 Generation des résidus

La génération de résidus est propre à la méthode utilisée, c'est à dire elle diffère d'une méthode à l'autre (estimation paramétrique, espace de parité ou observateurs), lors de cette étape les signaux d'entrée et de sortie du système sont utilisés pour générer un résidu. Ce dernier est un signal qui met en évidence la présence d'un défaut en général en mode de fonctionnement normal, ce signal est sensiblement nul et s'écart notablement de zéro en présence de défauts.

$$r_i(t) = y_i(t) - \hat{y}_i(y)$$

3.2.2 Analyse des résidus

Pour analyser les résidus, la notion de seuil est introduite, elle permet d'indiquer les limites de domaine de chaque résidu en absence de défauts, la fixation des valeurs de seuil est effectuée en fonction des caractéristiques statistiques de chaque résidu en fonctionnement normal, la valeur de tolérance est déterminée comme suit :

$$\phi_i(t) = \alpha \sqrt{\text{var}(r_i(t))}$$

$r_i(t)$ est la *ième* composante du vecteur de résidu généré par l'observateur, α est un paramètre de réglage de la sensibilité de détection et $\text{var}(r_i(t))$ la variance du résidu en fonctionnement normal.

3.2.3 Evaluation des résidus

Dite aussi étape de prise de décision, elle consiste au remplissage de la matrice des signatures, pour la faire, on doit associer à chaque résidu la valeur 0 ou 1 selon qu'il est affecté ou non par un défaut. On se basant sur une logique de seuillage, si le résidu s'écarte de l'intervalle de seuil, on est certain de l'apparition d'un défaut :

$$\begin{cases} \| r_i \| < \phi_i & \text{Absence de défaut} \\ \| r_i \| \geq \phi_i & \text{Présence de défaut} \end{cases}$$

Ou encore :

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

3.2.4 Localisation des défauts

Elle peut être effectuée à l'aide de la table des signatures, les lignes correspondent aux différents résidus et les colonnes sont les différents défauts, pour que tous les défauts puissent être détectés, aucune colonne de matrice de signatures ne doit être nulle, et pour que tous les défauts puissent être localisés, toutes les signatures de défauts doivent être distinctes.

Trois types de matrices de signatures peuvent être distingué :

- Non localisante :

Une colonne est nulle ou au moins deux colonnes sont identiques, cette table ne permet pas de distinguer certains défauts entre eux.

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

Tableau 1: Table de signature non localisante

- Faiblement localisante :

Les colonnes sont non nulles et distinctes deux à deux.

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

Tableau 2: Table de signature faiblement localisante

Chapitre 3

- Fortement localisante :

En plus d'être faiblement localisante, aucune colonne ne peut être obtenue à partir d'une autre en remplaçant un "1" par un "0".

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

Tableau 3: Table de signature fortement localisante

3.3 Structuration et évaluation des résidus générés

La localisation des défauts se fait à partir de l'évaluation des résidus issus d'un banc d'observateurs. Parmi les structures les plus expérimentées, on trouve tout d'abord la structure d'observateur simplifié, les bancs d'observateurs de Luenberger généralisés (GOS : Generalized Observer Scheme), ou dédiés (DOS : Dedicated Observer Scheme).

3.3.1 Structure d'observateur simplifié

Dans cette structure le banc est constitué d'un seul observateur. Il est synthétisé de façon à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraire, elles seront exactes

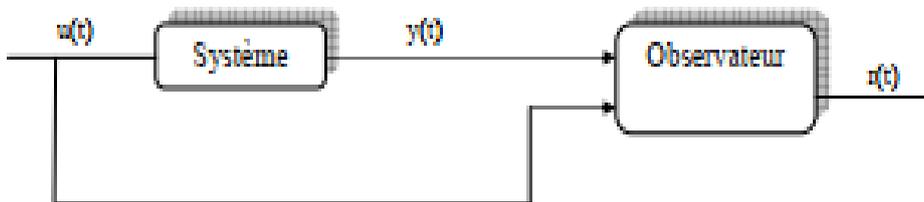


Figure 3-1 : Observateur simplifié.

3.3.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS)

Dans ce type de structure, le problème est de construire autant d'observateurs qu'il y a de défauts à détecter, et chaque observateur génère des résidus qui ne sont pas sensibles à tous sauf un défaut. Ainsi l'observateur qui reçoit le mauvais résultat de mesure a une fausse estimation de la variable estimée, tandis que les estimations des autres observateurs convergent vers le résultat de mesure de sortie correspondante (à l'exception du mauvais résultat). Les observateurs peuvent être conçus, chaque observateur est sensible à une unique faille, et traite le reste des défauts comme des perturbations. Même dans le cas de plusieurs défauts simultanément, le schéma suivant est toujours valable.

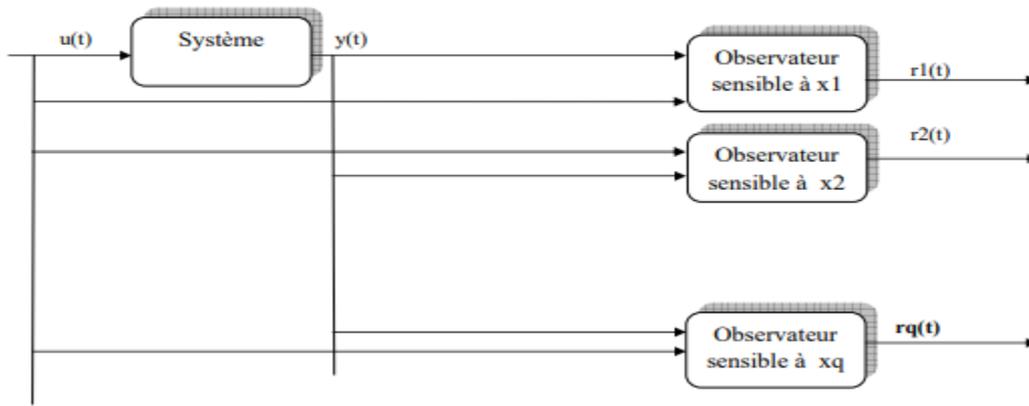
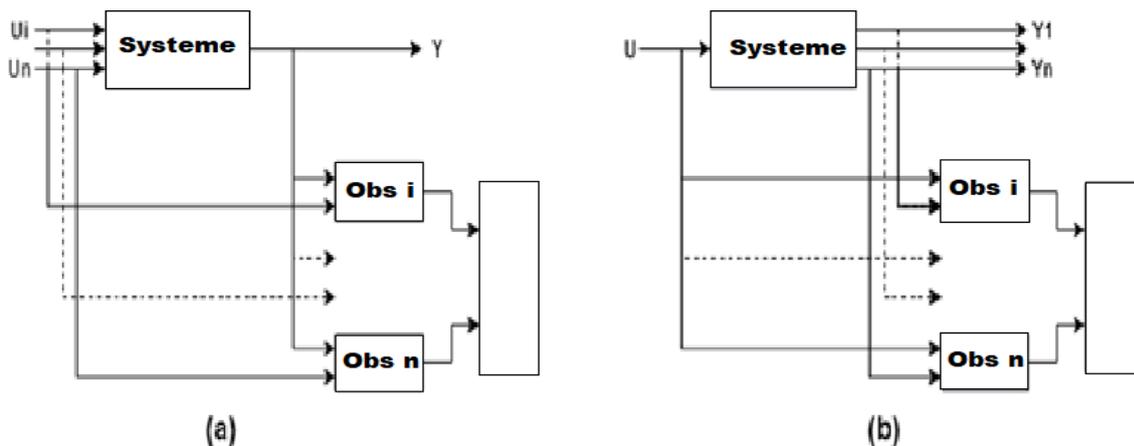


Figure 3-2 : Structure observateur dédié.

a) Défauts actionneurs *DOS*: dans un schéma d'observateur dédiée (*DOS*) le i^{eme} observateur est pilote par la i^{eme} entrée et toutes les sorties, les $m - 1$ autres entrées restantes sont considérées comme inconnues, et la sortie de cet i^{eme} observateur est insensible aux défauts des entrées non utilisées donc chaque résidu issu d'un *UIO* est sensible à un et un seul défaut actionneur ce qui permet de détecter et localiser les défauts même quand ceux-ci surviennent ensemble.

b) Défauts capteurs *DOS*: dans ce cas, le i^{eme} observateur est piloté par la i^{eme} sortie et toutes les entrées ; la sortie de ce i^{em} observateur est insensible aux défauts des sorties non utilisées donc chaque résidu issu d'un observateur est sensible à un et un seul défaut capteur ce qui permet de détecter et localiser les défauts capteurs même lorsqu'ils apparaissent de façon simultanée.



Chapitre 3

3.3.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Dans cette structure, le problème est de synthétiser un certain nombre d'observateurs dont chacun n'est pas sensible à un seul défaut. Si une défaillance apparaît par la suite, toutes les estimations d'état seront erronées, à l'exception des estimations d'état où l'observateur ne répond pas à une seule défaillance. Cette solution offre plus de liberté pour la conception de l'observateur et permet une robustesse accrue. Cependant, en plus de ne pas généralement résoudre le problème de localisation des défauts, le problème de cette méthode réside dans l'interaction entre les sous-systèmes.

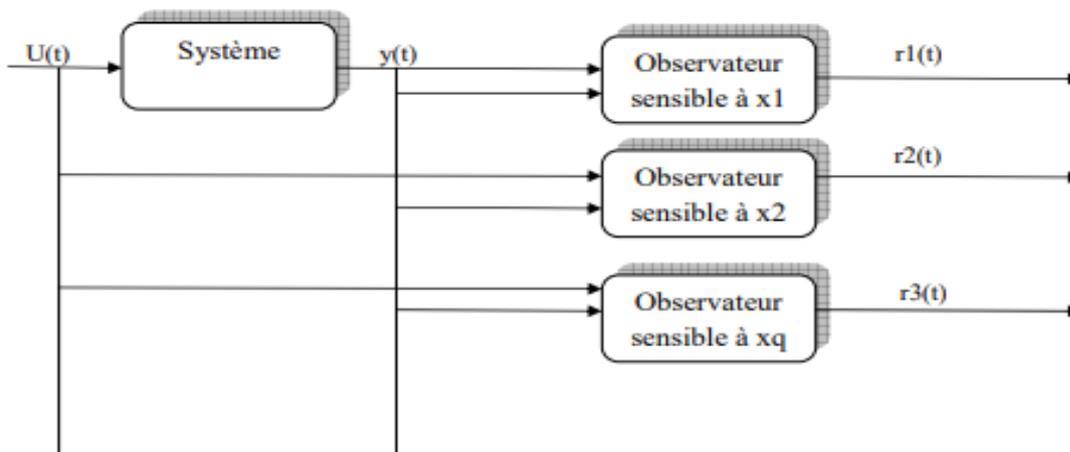
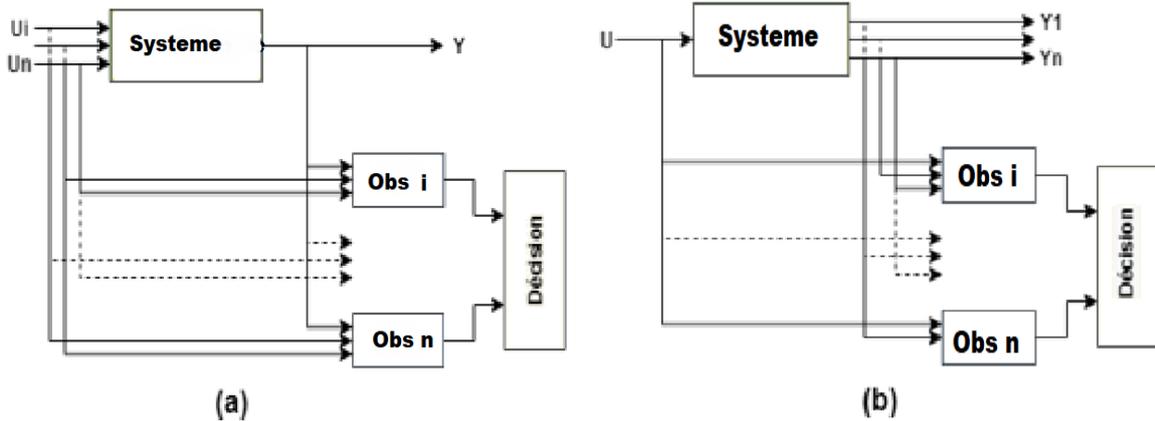


Figure 3-3 : Structure d'observateur généralisé.

a) Défauts actionneurs GOS : Dans un schéma d'observateur généralisé (GOS), le i^{em} observateur est piloté par toutes les entrées sauf la k^{iem} et toutes les sorties, la sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de toutes les entrées sauf ceux de l'entrée u_k , chaque résidu issu d'un UIO est insensible à un défaut actionneur particulier et sensible à tous les autres. Il est donc possible de détecter et localiser les défauts actionneurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.

b) Défauts capteurs GOS : Dans ce cas, le i^{em} observateur est piloté par toutes les sorties sauf la i^{em} , et toutes les entrées. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de tous les capteurs sauf ceux de la i^{em} . Il est donc possible de détecter et de localiser les défauts capteurs lorsque ceux-ci interviennent séparément.



3.4 Natures des défauts

Les différentes incertitudes sont considérées comme des entrées agissant sur la dynamique de l'état et les sorties. On adopte généralement un modèle mathématique d'un système dynamique à surveiller au fonctionnement nominal décrit par un espace état comme suit :

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

3.4.1 Bruit de mesure

Dans l'idéal, les mesures obtenues correspondent aux quantités pertinentes que l'on cherche à mesurer. Mais dans la réalité, lorsque l'on prend des mesures, on remarque l'apparition de signaux parasites qui viennent de se superposer des sorties (l'information que l'on souhaite récupérer). En diagnostic, ces signaux gênent la compréhension de l'information que le signal porte.

Pour observer l'influence des bruits de mesure sur la qualité de la reconstruction de l'état, la sortie du processus peut être observée en considérant le système suivant :

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

On définit $v(t)$ comme étant une variable aléatoire d'espérance mathématique nulle.

3.4.2 Défauts actionneurs

Un actionneur est un constituant permettant de mettre en mouvement les organes des machines suite aux commandes électriques. Ceci en convertissant une énergie d'entrée (électrique, hydraulique ou pneumatique...etc.) en une énergie de sortie (mécanique ou autre).

Chapitre 3

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détruisent le signal d'entrée du système. Les conséquences de défauts actionneurs peuvent varier d'une consommation élevée de l'énergie jusqu'à la perte totale de contrôle.

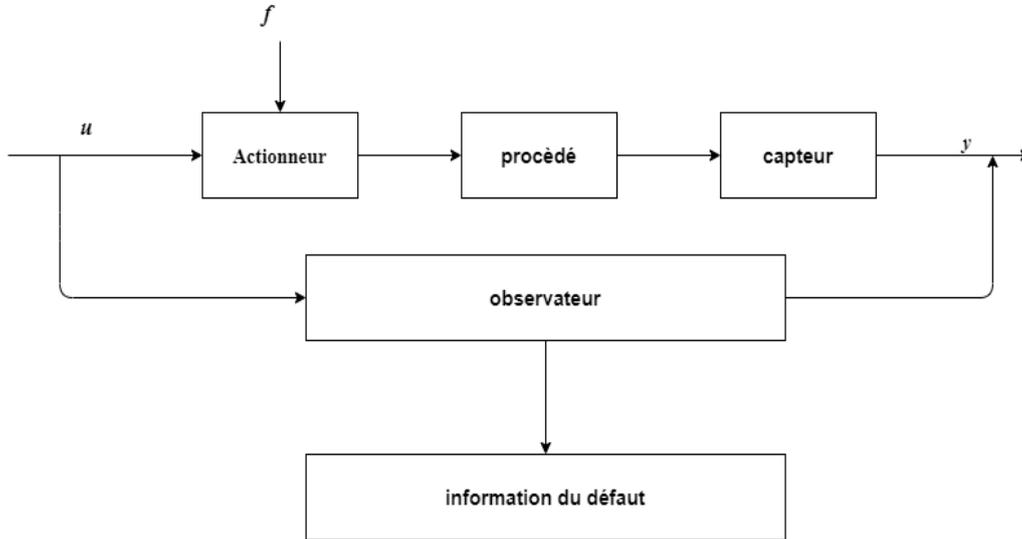


Figure 3-4 : Système de surveillance de défauts pour les actionneurs.

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

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

x, u et y Ainsi que A, B, C et D sont définis précédemment.

f représente un vecteur de défauts d'actionneur variant dans le temps.

Les colonnes de la matrice F_x désignent la distribution des défauts actionneurs indépendants.

L'observateur associé est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

L'erreur d'estimation d'état obéit à l'équation différentielle suivante :

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ \Rightarrow \dot{e}(t) &= (A - LC)e(t) + F_x f(t) \end{aligned}$$

3.4.3 Défauts modèle

Ce sont les défauts qui ne peuvent pas être classifiés ni parmi les défauts actionneurs ni parmi les défauts capteurs, les défauts modèles sont des défauts qui affectent les paramètres du système lui-même, ce type d'erreur conduit à une modification de la dynamique du système après un changement de ces paramètres. Généralement, ces défauts induisent l'instabilité du système suite d'un changement d'équation d'état qui peut être soit paramétrique soit fonctionnel.

Pour un diagnostic fiable, l'intégration de l'incertitude de modèle est fortement recommandée, le système suivant est établi en prenant compte de l'erreur de modèle :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \delta A)x(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

L'observateur est construit à partir de la matrice d'état A :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases}$$

L'erreur d'estimation d'état est toujours définie par :

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ \Rightarrow \dot{e}(t) &= (A - LC)e(t) + \delta Ax(t) \end{aligned}$$

D'une façon générale, les incertitudes de modélisation proviennent d'erreurs de structure et d'erreur de paramètres, ces derniers jouent le rôle des perturbations sur les équations de dynamique et de mesure du système. En régime stationnaire, l'introduction des intégrateurs dans la structure de l'observateur fait disparaître l'influence de ces erreurs.

3.4.4 Défauts capteurs

Les capteurs sont des outils qui convertissent une grandeur physique observée en une grandeur utilisable qui peut être traitée par un ordinateur. Ils sont l'interface entre la sortie d'un système et l'environnement extérieur. Les défauts des capteurs sont donc caractéristiques d'une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Pour les systèmes en boucle fermée, les mesures de ces capteurs sont utilisées pour générer des signaux de commande. Par conséquent, la présence d'un capteur défectueux conduit à un contrôle incertain et inefficace.

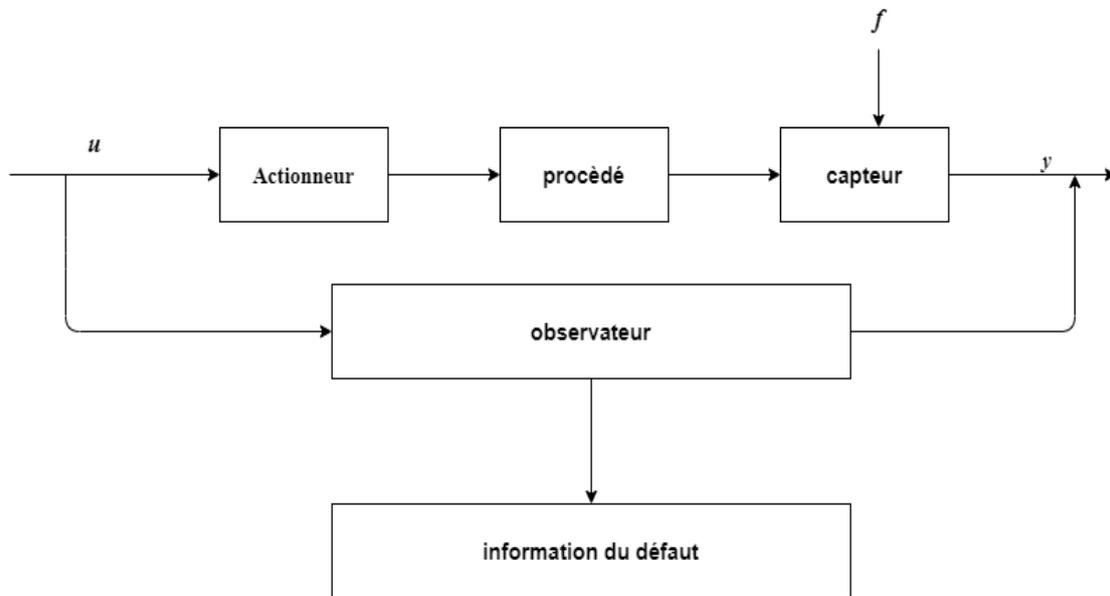


Figure 3-5 : Système de surveillance de défauts pour les capteurs.

Le modèle mathématique du système contrôlé permettant la prise en compte des incertitudes et avec défauts capteurs additifs est décrit par le modèle suivant :

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

f représente un vecteur de défauts d'actionnement variant dans le temps.

Les colonnes de la matrice F_y désignent la distribution des défauts capteurs.

En particulier, l'erreur de reconstruction de la sortie est :

$$\begin{aligned} \tilde{y}(s) &= y(s) - \hat{y}(s) \\ \tilde{y}(s) &= (I - C(sI - A + LC)^{-1}L) F_y f(s) \end{aligned}$$

Remarque :

En simulation, Il est plus réaliste de faire apparaître les défauts en prenant en considération les bruits des mesures, le système devient alors :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + F_y f(t) + v(t) \end{cases}$$

3.5 Exemple 1

3.5.1 Description du système

Soit le système décrit par :

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

Où F_x et F_y sont les matrices de distribution des défauts $f(t)$ à détecté.

Les diverses matrices de la représentation d'état sont les suivants :

$$A = \begin{pmatrix} -10 & -1 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} ; \quad B = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix} ; \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} ; \quad F_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$F_x = 0 ; \quad D_x = 0 ; \quad D_y = 0$$

Considérons le système suivant, affecté par un défaut de capteur $f_c(t)$ et par des bruits de mesure $v(t)$:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -10 & -1 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \end{pmatrix} u(t) \\ \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_{c1}(t) \\ f_{c2}(t) \end{bmatrix} + v(t) \end{cases}$$

On suppose que le défaut $f_c(t)$ intervient sur la première et la deuxième mesure, entre les instants $t = 9s$ et $t = 11s$, entre ces deux instants, il est constant et d'amplitude égale à 2.

3.5.2 Synthèse d'observateur à gain

Afin de détecter et d'estimer ces défauts de capteurs, un observateur d'état est construit, pour ensuite filtrer l'erreur d'estimation de sortie.

La paire (C, A) est observable, choisissons une matrice L diagonale d'éléments diagonaux l_1 et l_2 . En effet le système étant de degré deux, deux paramètres de réglage sont suffisants pour réaliser le placement des pôles du constructeur.

Le polynôme caractéristique s'écrit :

$$\begin{aligned} p_{obs}(s) &= \det[sI - (A - LC)] = \begin{vmatrix} s + 10 + l_1 & 1 \\ -2 & s + 10 + l_2 \end{vmatrix} \\ &= s^2 + (11 + l_1 + l_2)s + 12 + l_1 + 10l_2 + l_1l_2 \end{aligned}$$

Ajustons les paramètres l_1 et l_2 de manière à obtenir le polynôme $:(s + 20)^2 = s^2 + 40s + 400$

Chapitre 3

On obtient ainsi les deux solutions suivantes :

$$l_1 = 10 \pm \sqrt{2} \text{ et } l_2 = 19 \pm \sqrt{2}$$

En adoptant $l_1 = 10 + \sqrt{2}$ et $l_2 = 19 - \sqrt{2}$

La forme générale d'observateur s'écrit

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \\ r_y(t) = e_y = y(t) - \hat{y}(t) \end{cases}$$

Dans notre cas l'observateur est défini par la forme suivante :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -20 - \sqrt{2} & -1 \\ 2 & -20 - \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 10 & 10 + \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 19 - \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(t) \\ y_1(t) \\ y_2(t) \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{pmatrix} \\ r_y(t) = e_y = y(t) - \hat{y}(t) \end{cases}$$

Le modèle Simulink complet pour diagnostiquer le système est alors le suivant :

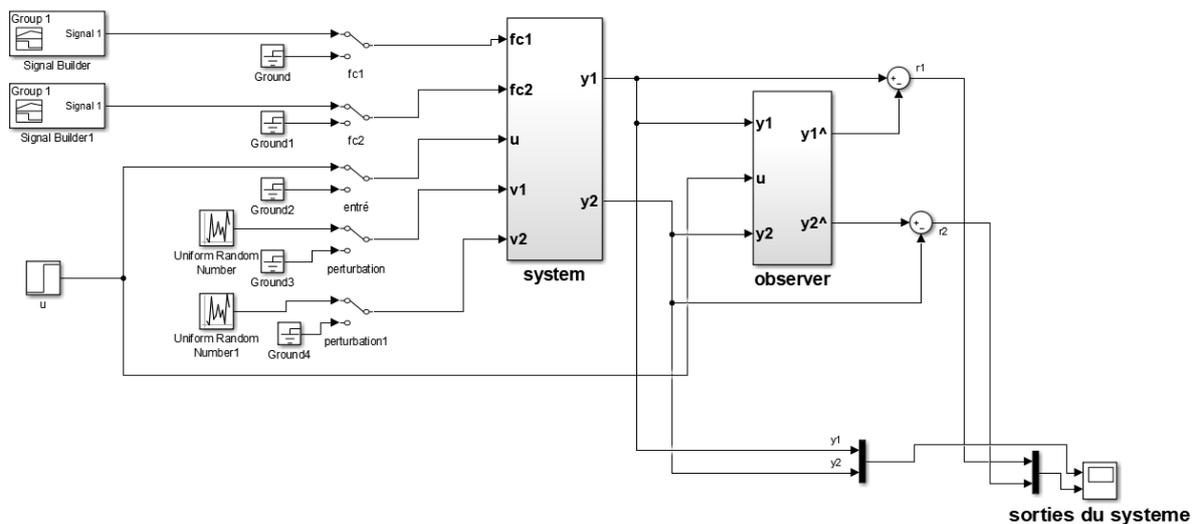


Figure 3-6 : Simulink utilisé pour la simulation de l'exemple.

3.5.3 Simulation

La simulation du système exposé dans la section précédente permet de retrouver les résidus illustrés dans les figures et ainsi le comportement des deux capteurs.

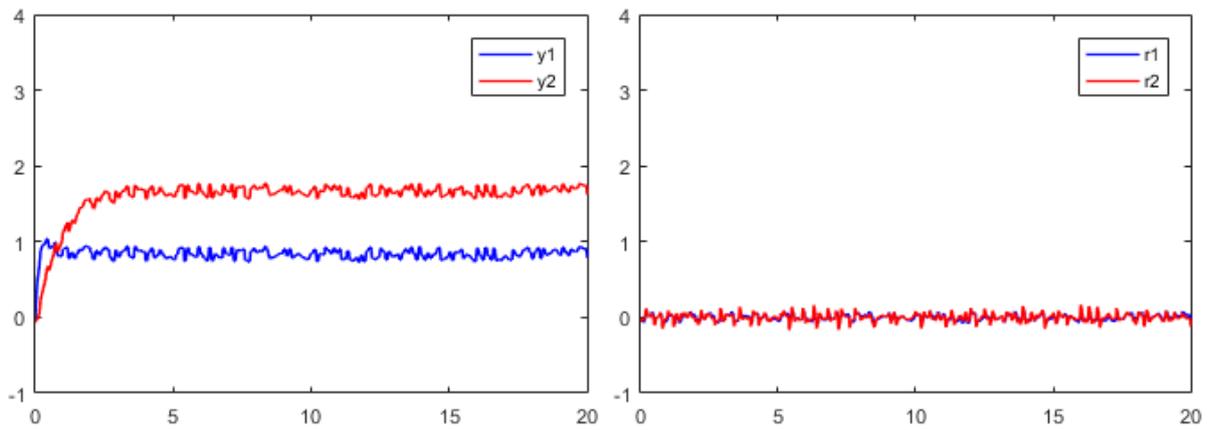


Figure 3-7 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ sans défauts.

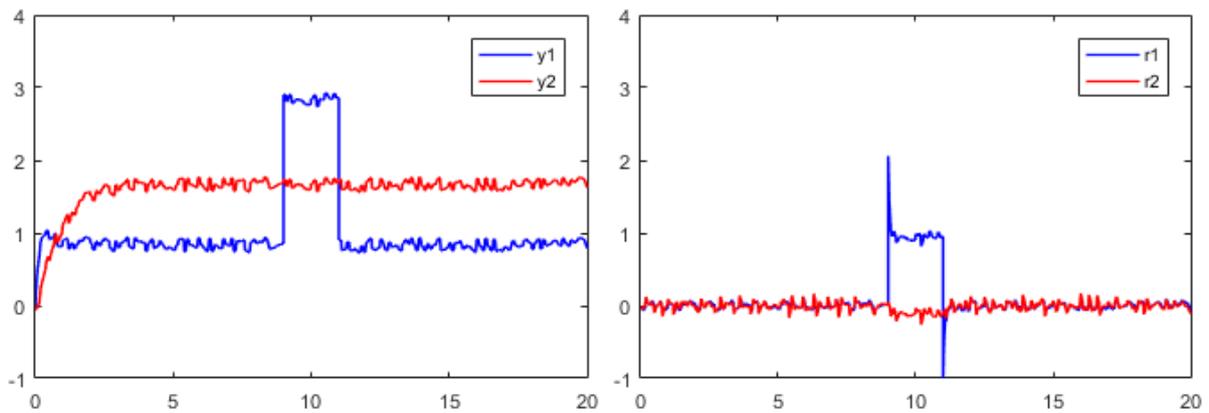


Figure 3-8 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ avec défaut capteur 1.

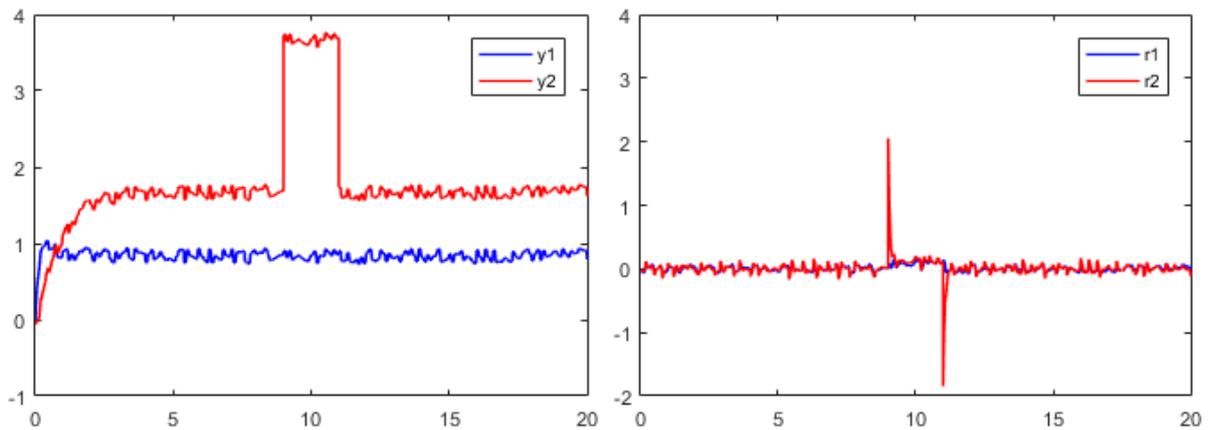


Figure 3-9 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ avec défaut capteur 2.

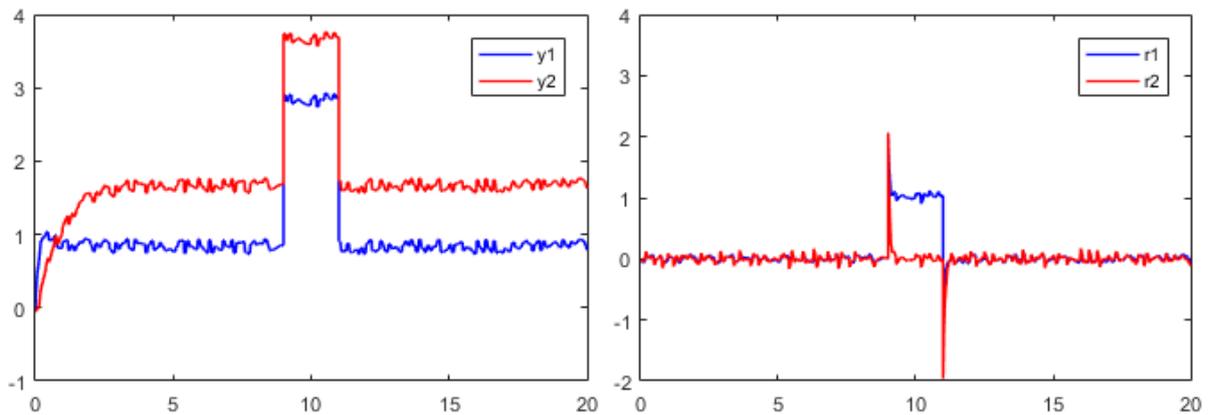


Figure 3-10 : Les sorties $y(t)$ et les résidus $r(t)$ avec défauts capteur 1 et 2.

3.5.4 Interprétation

En réalité, les valeurs des résidus ne sont pas égales à zéro à cause des bruits de mesure $v(t)$, c'est la cause pour laquelle on les a ajoutés aux simulations pour se rapprocher à la réalité.

En simulant successivement l'apparition d'un défaut du premier capteur d'amplitude 2 à l'intervalle $9s \leq t \leq 11s$ et d'un défaut du deuxième capteur de même amplitude que le premier.

Par la suite, des signaux aléatoires seront superposés aux mesures afin de prendre en compte l'influence des bruits de mesures $v(t)$. Figure 3 – 7 indique que les deux résidus en absence de défauts sont statiquement nuls (autour de zéro) donc les capteurs sont en bon état de fonctionnement.

Le résultat sur la figure 3 – 8 montre que le résidu r_1 est sensible au défaut capteur f_{c1} au moment d'application du défaut c.à.d. de l'instant $t = 9s$ jusqu'à $t = 11s$, par contre le résultat de deuxième résidu r_2 montre l'insensibilité à ce défaut.

La Figure 3 – 9 montre que le résidu r_1 est insensible au défaut capteur f_{c1} , par contre le résidu r_2 montre sa sensibilité au défaut actionneur f_{c2} de l'instant $t = 9s$ au $t = 11s$. Les résultats de simulation sur les figures nous permettent de générer la table des signatures ci-dessous.

On remarque que l'amplitude de défaut a un impact sur la forme du signal de résidu.

L'utilisation de cet observateur pour l'estimation de défauts f_{c1} , f_{c2} séparément permet la détection et la localisation des défauts.

3.5.5 La table des signatures :

L'objectif de ce type de table est de construire un certain nombre de résidus chacun réagissant à un sous-ensemble spécifique de défauts (signature élémentaire égale à 1) et étant insensible d'autres défauts (signature élémentaire égale à 0).

La table des signatures associée à ce générateur des résidus est dressée dans le tableau suivant, dont "1" indique l'apparition de défaut f_j affectant le résidu r_i et "0" l'insensibilité de ce dernier par rapport au défaut.

| | f_{c1} | f_{c2} |
|-------|----------|----------|
| r_1 | 1 | 0 |
| r_2 | 0 | 1 |

Tableau 4 : Table des signatures

La structure de la table de signature obtenue est fortement localisante (signature différente pour f_{c1} et f_{c2}) alors on peut utiliser l'observateur synthétiser pour la détection et la localisation des défauts.

3.6 Exemple 2

Reprenons le système de l'exemple situé en chapitre 2, les diverses matrices de la représentation d'état sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 100 & -10 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ D_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, F_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Le reconstituteur obtenu est défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & -7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 5 & -1 & 0 \\ 0 & 100 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_{y1} \\ e_{y2} \\ e_{y3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 + y_3 \end{bmatrix} \end{array} \right.$$

Calculons la matrice de transfert des défauts $G_f(s) = C(sI - M)^{-1}(F + sF') - F_y$, on a :

Chapitre 3

$$F = (ML_y + P)F_y - EF_x = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 7 \end{bmatrix}$$

$$F' = -L_y F_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le vecteur des résidus s'écrit alors comme $r(s) = G_f(s)f(s)$ soit :

$$r(s) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{s+5} & -\frac{1}{s+5} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{s+10} & -\frac{1}{s+6} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix}$$

Ainsi on obtient une structure directement localisant. La dernière ligne n'a aucune utilité, elle résulte du découplage de la perturbation. En conservant que les deux premières lignes :

$$r(s) = \begin{bmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{s+5} & -\frac{1}{s+5} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{s+10} & -\frac{1}{s+6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \\ f_3(s) \end{bmatrix}$$

La table de signature théorique associée à ce générateur de résidus s'en déduit comme suit :

| | f_1 | f_2 | f_3 |
|-------|-------|-------|-------|
| r_1 | 1 | 1 | 0 |
| r_2 | 0 | 1 | 1 |

Tableau 5 : Table de signature théorique.

Vérifiant maintenant en simulation la table des signatures théorique obtenu la figure présente le fichier Simulink utilisé :

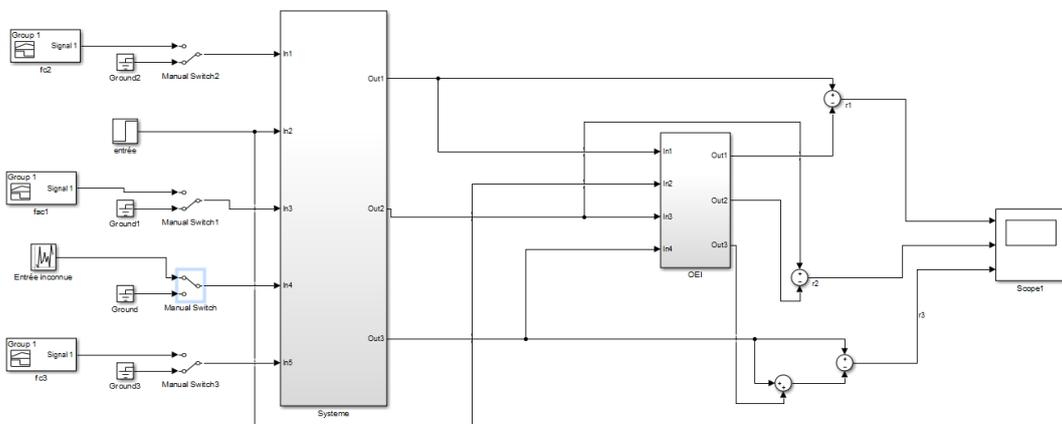


Figure 3-11 : Simulink de l'exemple 2 en présence d'entrées inconnues.

Observateurs d'états pour le diagnostic

Dans la simulation, on a superposé des signaux aléatoires de moyenne nulle aux mesures pour but de prendre en considération l'influence des bruits de mesure.

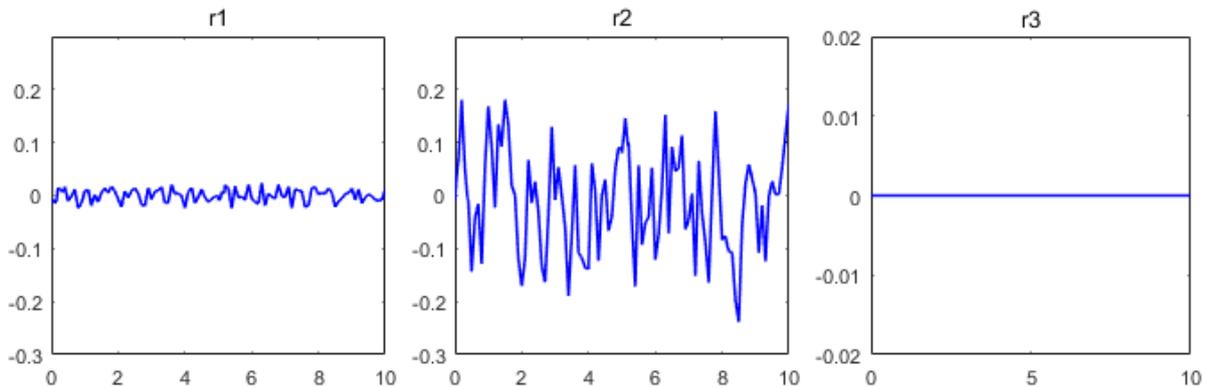


Figure 3-12 : Les résidus $r(t)$ en présence des bruits de mesure et sans perturbation.

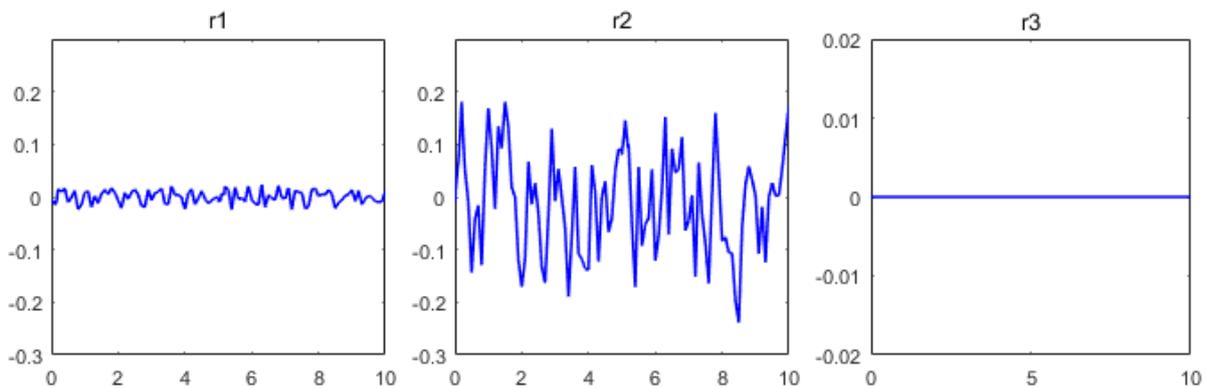


Figure 3-13 : Les résidus $r(t)$ en présence des bruits de mesure et perturbation $d(t)$.

Les figures montrent que les résidus sont parfaitement découplés de l'entrée inconnue $d(t)$.

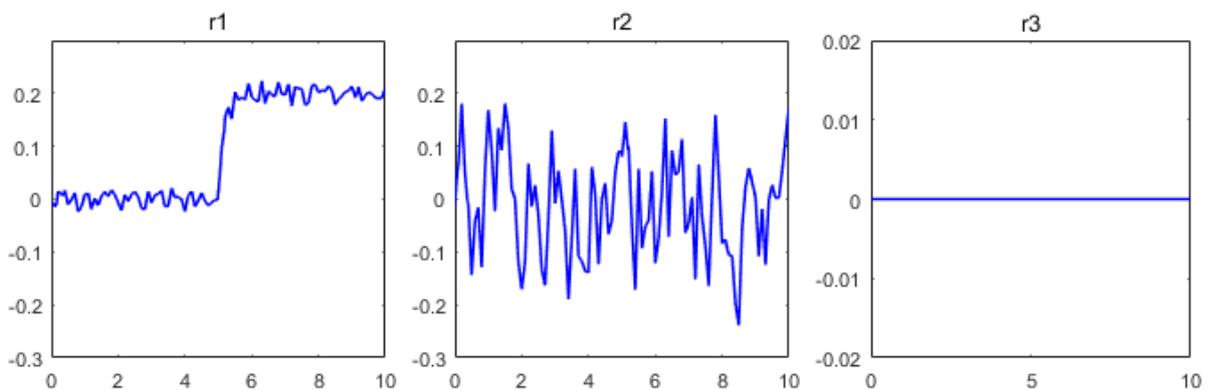


Figure 3-14 : Les résidus $r(t)$ en présence de défaut actionneur 1.

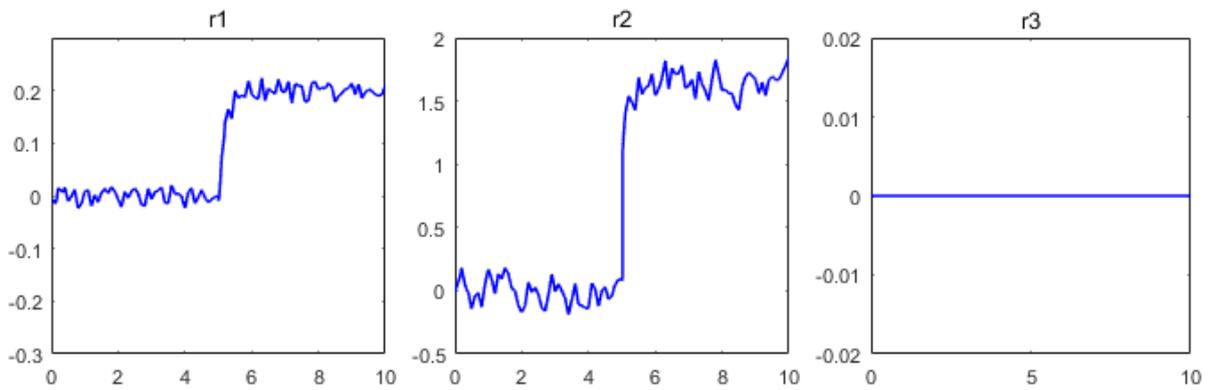


Figure 3-15 : Les résidus $r(t)$ en présence de défaut capteur 2.

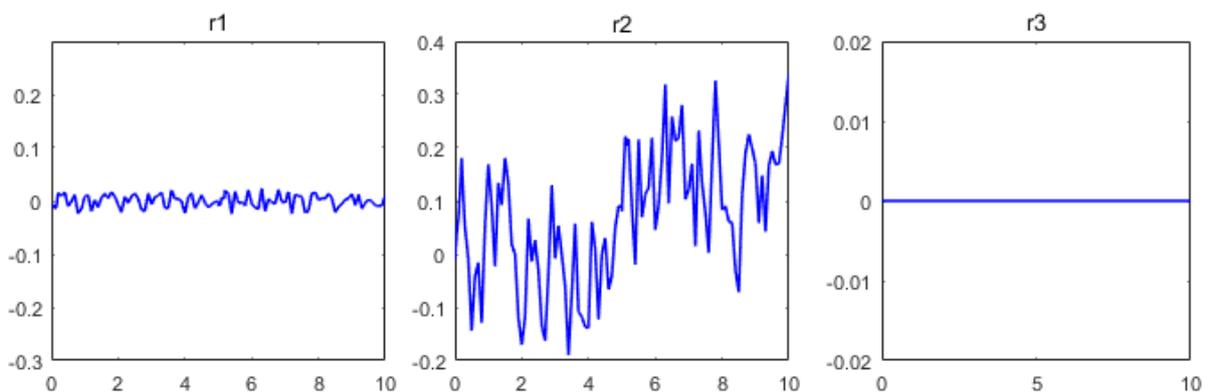


Figure 3-16 : Les résidus $r(t)$ en présence de défaut capteur 3.

En simulant successivement la présence d'un seul défaut actionneur f_{ac1} , capteur f_{c2} et f_{c3} respectivement d'amplitude 1 à l'instant $t = 5sec$. On obtient la table des signatures expérimentale suivante :

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

Tableau 6 : table de signature expérimentale.

En absence de défaut les résidus sont statiquement nuls, en présence d'un défaut les résidus évoluent conformément à la table des signatures théorique précédemment obtenue, on note que dans le cas du défaut f_{c3} l'évolution du résidu r_2 est à peine perceptible.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu les différentes étapes de diagnostic d'une façon plus profonde, comme on a traité la nature des défauts qui peuvent affecter le système, finalement notre approche de diagnostic à base d'observateurs à gain de Luenberger et à entrées inconnues ont été testées sur deux exemples différents qui nous ont permis d'obtenir d'excellents résultats concernant la détection et la localisation des défauts avec la présence des bruits de mesure.

Les procédures exprimées avant peuvent être utilisées avec d'autres systèmes similaires afin de les diagnostiquer.

Chapitre 4 : Application au processus hydraulique

4.1 Introduction

Le système hydraulique à trois réservoirs est un exemple pratique mettant en avant un aspect plus industriel qui peut être considéré comme prototype de nombreuses applications (les usines chimiques et pétrochimiques, stations d'eau usée, de l'huile et des systèmes de gaz.), avec une régulation de niveau autour de points de fonctionnement connus. Dans cette application, Nous allons synthétiser deux observateur le premier est l'observateur à gain de Luenberger et le deuxième est l'observateur à entrées inconnues afin de voir l'observateur le plus robuste vis-à-vis les entrées inconnues.

Ce chapitre illustre la mise en œuvre des techniques de modélisation, d'estimation d'état et de diagnostic de fonctionnement à base des observateurs. De plus, La particularité de cette étude est de faire une comparaison entre les deux observateurs synthétisés en présence des entrées inconnues qui agissent sur le processus.

4.2 Description du procédé

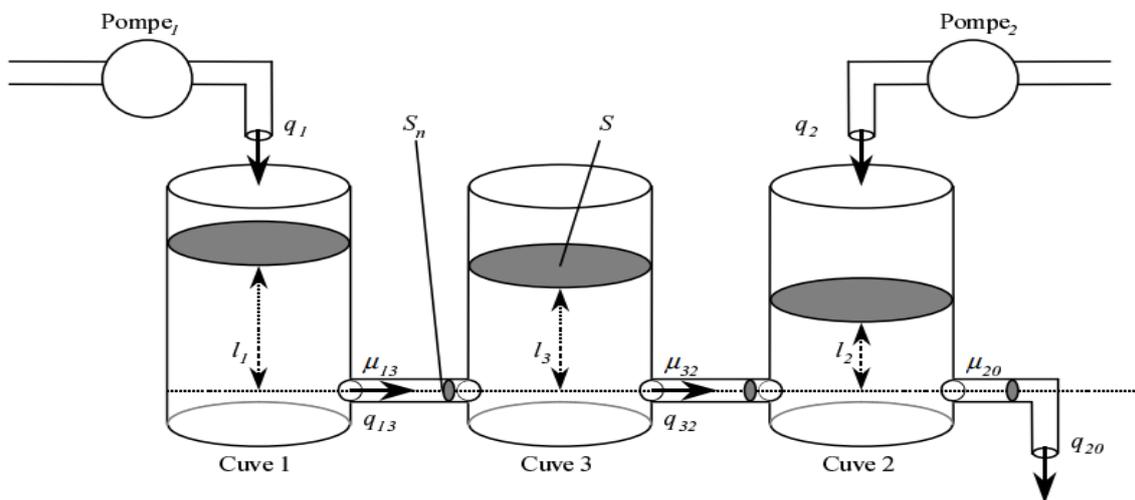


Figure 4-1: Système Hydraulique à trois cuves.

Le système à trois cuves est un benchmark fréquemment utilisé dans le domaine du diagnostic, il se compose de trois cuves cylindriques en série de section identiques S . comme le montre la figure 1. Ces cuves sont connectées entre elles par des tuyaux de sections S_n avec un coefficient d'écoulement $\mu_{13} = \mu_{32}$. Deux pompes alimentent les cuves 1 et 2, ces pompes sont commandées par des moteurs à courant continu. Les débits q_1 et q_2 sortant des pompes sont définis par le calcul du flux et le vecteur d'entrée est $u = [q_1 \ q_2]^T$, la sortie

Chapitre 4

d'évacuation est localisée sur la cuve 2, de même section S_n et un coefficient d'écoulement de sortie μ_{20} . Les trois cuves sont équipées de capteurs de pressions. Pour mesurer les niveaux des liquides (l_1, l_2, l_3) et le vecteur de sortie $y = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T$. Ces capteurs délivrent un signal de tension.



Figure 4-2 : Le benchmark étudié en réalité

4.3 Modèle mathématique du système

Dans cette partie, nous allons présenter les équations dynamiques du système hydraulique à trois réservoirs. Le modèle analytique peut être simplement dérivé du principe de Bernoulli et de la loi de Torricelli. Le modèle correspondant est donc donné par le système suivant :

$$\begin{cases} s \frac{dl_1}{dt} = q_1 - q_{13} \\ s \frac{dl_2}{dt} = q_2 + q_{32} - q_{20} \\ s \frac{dl_3}{dt} = q_{13} - q_{32} \end{cases}$$

En fait, le changement de volume d'eau (V) dans le réservoir (i) est déterminé par la formule :

$$V_i = S_i h_i = \Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out}$$

Où ΣQ_{in} et ΣQ_{out} représentent les entrées d'eau totales et les sorties d'eau dans le réservoir (i), respectivement. En outre, le flux d'eau q_{ij} du réservoir (i) directement dans le réservoir (j) est décrit par :

$$q_{ij} = a_{ij} \cdot \text{sign}(l_i(t) - l_j(t)) \cdot \sqrt{2g|l_i(t) - l_j(t)|}$$

Avec

$$a_{ij} = \mu_i \cdot S_n$$

| Variable | Symbole | Valeur |
|---------------------------------------|---------|-----------------------|
| La section des tuyaux | S_n | $5 * 10^{-5} m^2$ |
| La section des réservoirs | S | $0.0154 m^2$ |
| L'accélération de gravité | g | $9.81 m/s^2$ |
| Coefficient d'écoulement du réservoir | μ | 0.6 |
| Débit de la pompe P ₁ | q_1 | $0.3 * 10^{-4} m^3/s$ |
| Débit de la pompe P ₂ | q_2 | $0.3 * 10^{-4} m^3/s$ |

Tableau 7 : valeurs des paramètres utilisées

Et q_{20} représente le débit de sortie donnée par :

$$q_{20} = \mu_{20} \cdot S_n \cdot \sqrt{2gl_2}$$

L'équation de dynamique précédente peut être réécrite comme suit :

$$SNL: \begin{cases} S \frac{dl_1}{dt} = q_1 - \mu_{13} S_n \sqrt{2g(l_1 - l_3)} \\ S \frac{dl_2}{dt} = q_2 + \mu_{32} S_n \sqrt{2g(l_3 - l_2)} - \mu_{20} S_n \sqrt{2gl_2} \\ S \frac{dl_3}{dt} = \mu_{13} S_n \sqrt{2g(l_1 - l_3)} - \mu_{32} S_n \sqrt{2g(l_3 - l_2)} \end{cases}$$

On pose $x(t) = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix}$ et $u(t) = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$ le système peut être représenté sous la forme non linéaire

suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = f_1(x_1(t), x_2(t), x_3(t), u_1(t), u_2(t)) \\ \dot{x}_2(t) = f_2(x_1(t), x_2(t), x_3(t), u_1(t), u_2(t)) \\ \dot{x}_3(t) = f_3(x_1(t), x_2(t), x_3(t), u_1(t), u_2(t)) \\ y(t) = g(x_1(t), x_2(t), x_3(t), u_1(t), u_2(t)) \end{cases}$$

$$SNL: \begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{u_1}{S} - \frac{\mu_{13} S_n \sqrt{2g(x_1 - x_3)}}{S} \\ \dot{x}_2 = \frac{u_2}{S} + \frac{\mu_{32} S_n \sqrt{2g(x_3 - x_2)}}{S} - \frac{\mu_{20} S_n \sqrt{2gx_2}}{S} \\ \dot{x}_3 = \frac{\mu_{13} S_n \sqrt{2g(x_1 - x_3)}}{S} - \frac{\mu_{32} S_n \sqrt{2g(x_3 - x_2)}}{S} \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases}$$

Remarque : Ainsi, on peut définir le modèle en cas de présence des défauts actionneurs additifs et abrupts f_{ac1} et f_{ac2} par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{S} \times \left(u_1 + f_{ac1} - \mu_{13} S_n \sqrt{2g(x_1 - x_3)} \right) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{S} \times \left(u_2 + f_{ac2} + \mu_{32} S_n \sqrt{2g(x_3 - x_2)} - \mu_{20} S_n \sqrt{2gx_2} \right) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{S} \times \left(\mu_{13} S_n \sqrt{2g(x_1 - x_3)} - \mu_{32} S_n \sqrt{2g(x_3 - x_2)} \right) \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases}$$

En posant $c = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{S}\right) \cdot \mu_i \cdot S_n \cdot \sqrt{2g}$, l'équation en mode de fonctionnement sain devient :

$$SNL: \begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{u_1}{S} - 2c\sqrt{(x_1 - x_3)} \\ \dot{x}_2 = \frac{u_2}{S} + 2c\sqrt{(x_3 - x_2)} - 2c\sqrt{x_2} \\ \dot{x}_3 = 2c\sqrt{(x_1 - x_3)} - 2c\sqrt{(x_3 - x_2)} \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases}$$

Remarque: Le système a quatre régions d'opérations dans lesquelles le modèle correspondant est différentiable. Dans cette étude, nous ne considérons que la région d'opérations $x_1 > x_3 > x_2$.

4.4 Linéarisation du système non linéaire

Les systèmes décrits par les équations et les lois de la physique sont non linéaires, La linéarisation de ces derniers consiste à aboutir à un comportement localement linéaire facile à étudier du système, on parlera alors de linéarisation autour d'un point de fonctionnement.

Un procédé non linéaire pourra être considéré comme linéaire autour d'un point de fonctionnement (x_{eq}, u_{eq}) si $x(t)$ et $u(t)$ restent petites.

Les différents cordonnés de points de fonctionnement sont obtenus par la résolution du système

$$\dot{x} = f(x) = 0$$

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

Les états d'équilibre x_{eq} , sont les solutions de l'équation algébrique

$$f(x) = 0$$

4.4.1 Calcul du point d'équilibre

Pour le système ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{u_1}{S} - 2c\sqrt{(x_1 - x_3)} = 0 \\ \dot{x}_2 = \frac{u_2}{S} + 2c\sqrt{(x_3 - x_2)} - 2c\sqrt{x_2} = 0 \\ \dot{x}_3 = 2c\sqrt{(x_1 - x_3)} - 2c\sqrt{(x_3 - x_2)} = 0 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \\ y_3 = x_3 \end{cases}$$

Le point d'équilibre est donc le suivant :

$$x_{eq} = (x_{1eq} = 0.3037; x_{2eq} = 0.2025; x_{3eq} = 0.2531)$$

Le système d'état suivant linéarisé autour de point d'équilibre x_{eq} est donné par :

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}(t) = A_{eq}\Delta x(t) + B_{eq}\Delta u(t) \\ \Delta y(t) = C_{eq}\Delta x(t) \end{cases}$$

Où $\Delta x(t) = x(t) - x_{eq}(t)$; $\Delta u(t) = u(t) - u_{eq}(t)$; $\Delta y(t) = y(t) - y_{eq}(t)$

Chapitre 4

$$A_{eq} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{pmatrix}_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \Rightarrow A_{eq} = \begin{pmatrix} \frac{-C}{\sqrt{x_1-x_3}} & 0 & \frac{C}{\sqrt{x_1-x_3}} \\ 0 & \frac{-C}{\sqrt{x_3-x_2}} - \frac{C}{\sqrt{x_2}} & \frac{C}{\sqrt{x_3-x_2}} \\ C & C & \frac{-C}{\sqrt{x_1-x_3}} - \frac{C}{\sqrt{x_3-x_2}} \end{pmatrix}$$

$$B_{eq} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \end{pmatrix}_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \Rightarrow B_{eq} = \begin{pmatrix} \frac{1}{S} & 0 \\ 0 & \frac{1}{S} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C_{eq} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_1} & \frac{\partial g_3}{\partial x_2} & \frac{\partial g_3}{\partial x_3} \end{pmatrix}_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \Rightarrow C_{eq} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Au final, Le système après la linéarisation autour d'un point d'équilibre $(x_{\acute{e}q}, u_{\acute{e}q})$ est donné par :

$$A_{eq} = \begin{pmatrix} -0.0191 & 0 & 0.0191 \\ 0 & -0.0286 & 0.0191 \\ 0.0191 & 0.0191 & -0.0383 \end{pmatrix}$$

$$B_{eq} = \begin{pmatrix} 64.9350 & 0 \\ 0 & 64.9350 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C_{eq} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4.4.2 Simulation du système linéaire

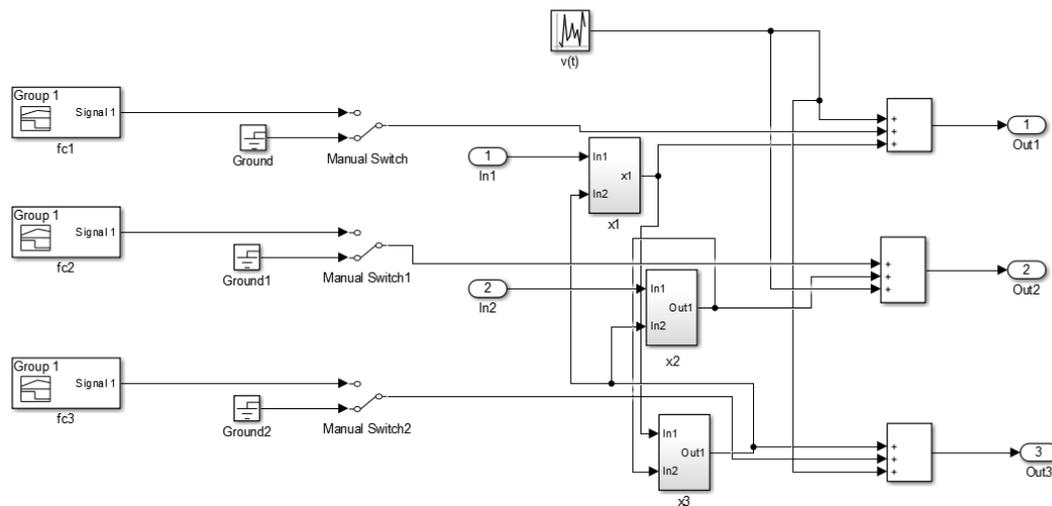


Figure 4-3 : Simulink du système à trois réservoirs.

Vous trouverez dans les pages annexes le programme qui nous a permis de simuler le modèle, d'après les simulations on pourra juger le fonctionnement de ce code.

Les pôles du système en boucle ouverte sont stables avec les valeurs numériques suivantes:

$$poles\ systeme = \{-0.0595; -0.0244; -0.0024\}$$

4.5 Conception d'un observateur à gain

L'observateur capable d'estimer les états du système à trois cuves décrit par le modèle algébrique précédent est le suivant :

$$\begin{cases} \hat{\dot{x}}(t) = A_{eq}\hat{x}(t) + B_{eq}u(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C_{eq}\hat{x}(t) \end{cases}$$

Le gain de l'observateur L est choisi tel que les valeurs propres de $A - LC$ soient toutes à parties réelles strictement négatives afin d'assurer la stabilité de l'observateur (technique de placement de pôles). On veut avoir un observateur rapide au niveau de la convergence et robuste vis-à-vis des perturbations sur la mesure. Les pôles d'observateur qui satisfont cet objectif dans notre cas sont :

$$poles\ desiree = \{-0.5; -0.2; -0.02\}$$

$$L = \begin{pmatrix} 0.4808 & 0 & 0.0192 \\ 0 & 0.1712 & 0.192 \\ 0.0192 & 0.0192 & -0.0184 \end{pmatrix}$$

Le gain de l'observateur est calculé par l'instruction "Place" sous *Matlab*.

Chapitre 4

4.5.1 Fonctionnement sain du système :

Les figures suivantes représentent respectivement les sorties $y(t)$, leurs estimations par l'observateur et l'évolution des erreurs d'estimation des sorties :

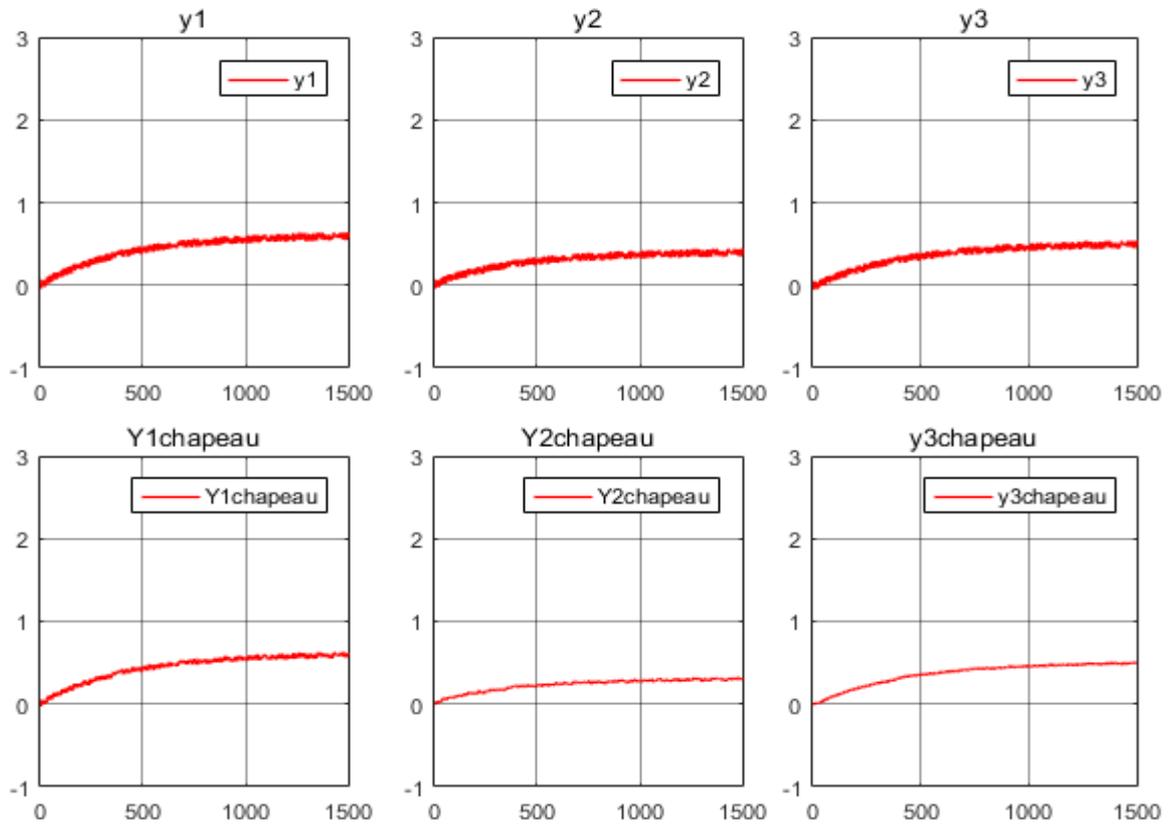


Figure 4-4 : Les signaux de sortie $y(t)$ et leurs estimations.

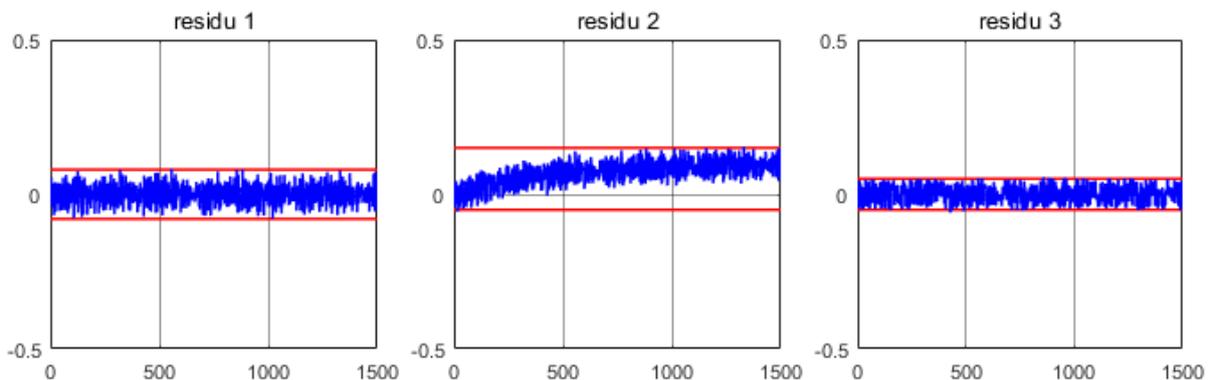


Figure 4-5 : Les résidus $r(t)$ sans entrées inconnues.

4.5.2 En présence d'entrée inconnue :

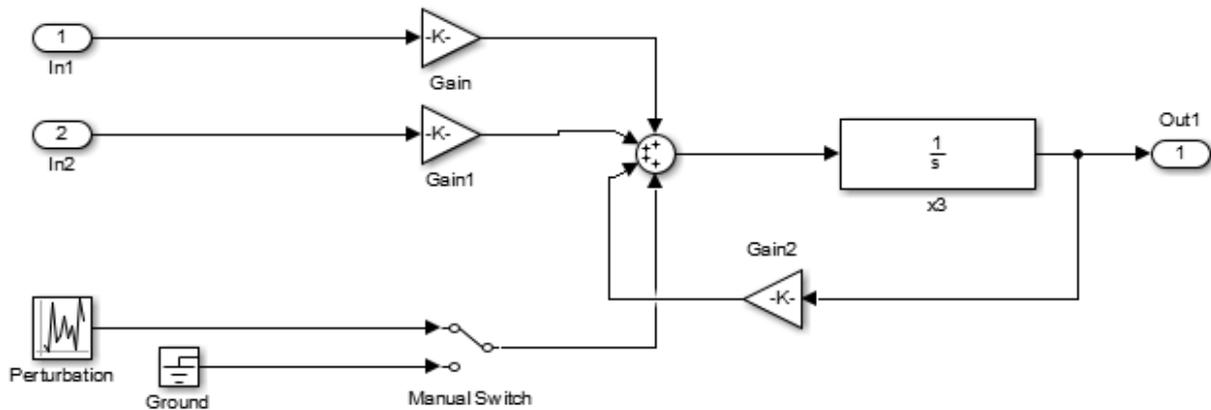


Figure 4-6 : intégration d'entrée inconnue $d(t)$.

On applique cette fois une perturbation qui représente une entrée inconnue au système pour voir la sensibilité de l'observateur à gain construit à cette dernière :

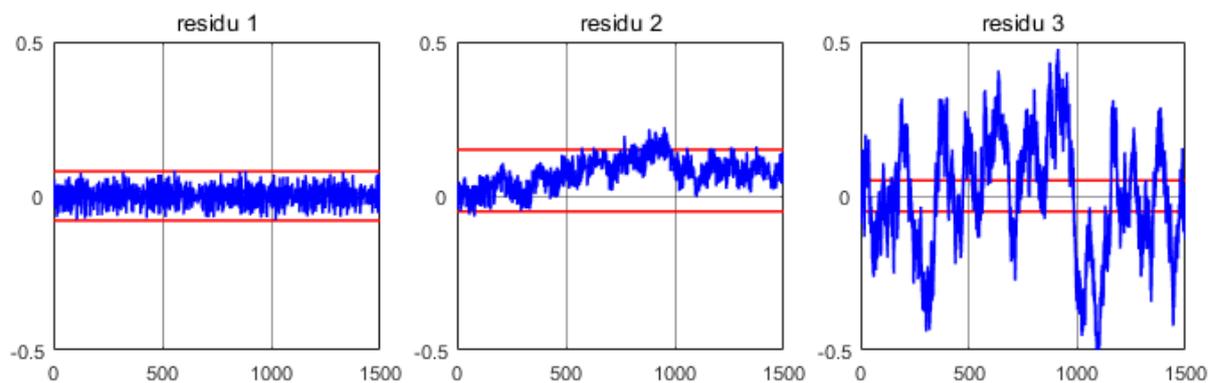


Figure 4-7 : Les résidus $r(t)$ en présence d'entrée inconnue $d(t)$.

4.5.3 Interprétations

- On constate que la qualité de l'estimation est acceptable même en présence des bruits de mesure.
- Comme le montre les figures ci-dessus, les erreurs d'estimation convergent asymptotiquement vers zéro dans le cas d'absence d'entrée inconnue mais ils divergent lorsque on applique une entrée inconnue $d(t)$.
- On peut conclure que notre observateur proposé ramène une bonne convergence des états reconstruit par rapport à leurs états réels, mais et au même temps il n'est pas robuste vis-à-vis les entrées inconnues.

Chapitre 4

- Le seuil est fixé à la valeur maximale du signal de résidus dans le cas sain i.e. dans le cas sans défauts.
- En présence de perturbation l'erreur d'estimation des états diverge de la zone définie par les seuils ceci indique que l'observateur à gain est sensible aux entrées inconnues.
- Ce type d'observateur ne peut pas être utilisé dans le domaine du diagnostic dans le cas de présence des entrées inconnues car la détection des défauts sera erronée et par conséquent le système de surveillance engendre des fausses alarmes.

4.6 Conception d'un OEI

Vu que l'observateur à gain construit précédemment n'est pas robuste aux entrées inconnues, on se propose de réaliser un observateur à entrées inconnues dans l'objectif d'estimer les états non apparents et réduire l'erreur, pour cela on met en aval la structure de l'observateur de ce dernier par :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Mz(t) + Nu(t) + Py(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + L_y y(t) \end{cases}$$

Où M, N, P et L sont des matrices inconnues à calculer.

Le modèle de système à surveiller est supposé correctement décrit par la représentation d'état suivante. On suppose que ce système est affecté par des défauts additifs, un défaut actionneur, un défaut capteur et une perturbation.

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

Le modèle est traduit en ce qui suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{pmatrix} -0.0191 & 0 & 0.0191 \\ 0 & -0.0286 & 0.0191 \\ 0.0191 & 0.0191 & -0.0383 \end{pmatrix} . B = \begin{pmatrix} 64.9350 & 0 \\ 0 & 64.9350 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . D_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} . F_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} . v(t) = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \end{pmatrix} \\ D = 0 . D_y = 0 . F_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

F_x et F_y sont Les matrices d'action des défauts $f(t)$ à détecter.

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

$v(t)$ Représente les bruits de mesure.

Dans la génération des résidus, des signaux aléatoires seront superposés aux mesures afin de prendre en compte l'influence des bruits de mesure.

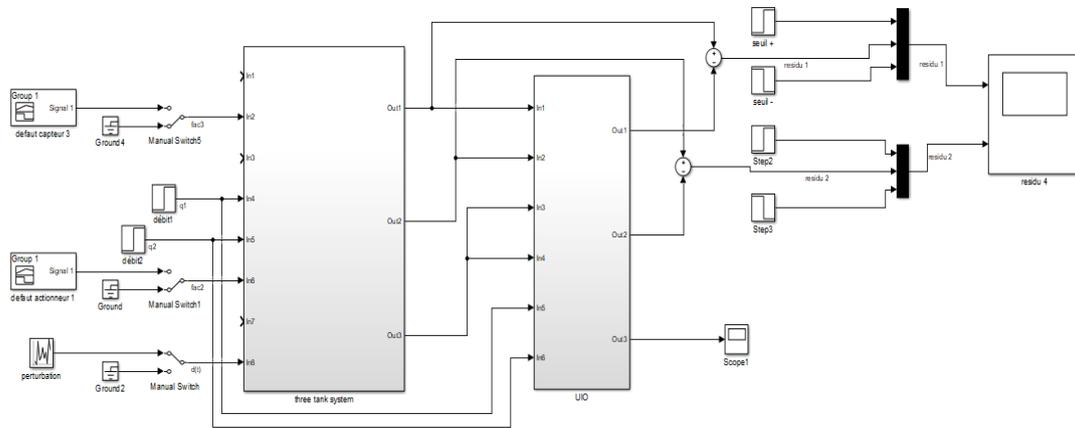


Figure 4-8 : Simulink du système et l'OEI.

4.6.1 Algorithme de synthèse de l'observateur

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

1. Vérifier que $\text{Rang}(CD_x) = n_d$, puis calculer $L_y = -D_x[(CD_x)^T(CD_x)]^{-1}(CD_x)^T$.
2. A partir de L_y calculer $E = I + L_y C$.
3. A partir de E calculer $N = EB$.
4. Imposer que M soit une matrice de Hurwitz . On peut à cet effet choisir pour M une matrice diagonale faisant apparaître les valeurs propres désirées pour l'observateur.
5. Calculer la matrice P telle que $PC = EA - ME$.

Vérifiant tout d'abord le rang de la matrice CD_x :

$\text{rang}(CD_x) = 1$ Comme il est égal au nombre d'entrées inconnues $d(t)$, donc il est possible de construire un générateur de résidus sensible aux défauts et insensible à la perturbation. Dans cette partie, des conditions d'existence de l'observateur à entrées inconnues pour le système sont étudiée :

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

$$E = I - L_y C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Chapitre 4

$$N = EB = \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 \\ 0 & 64.9351 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

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

Donc M est :

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

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

$$P = \begin{pmatrix} 1.9809 & 0 & 0.0192 \\ 0 & 2.9712 & 0.0192 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

De plus, on remarque que les matrices C , Dx sont respectivement de plein rang ligne et de plein rang colonne, que le produit CDx est de plein rang colonne et que le nombre de mesures est strictement supérieur au nombre d'entrées inconnues, donc les conditions d'existence d'un observateur à entrées inconnues sont vérifiées.

Nous obtenons un observateur à entrées inconnues ayant la structure suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 \\ 0 & 64.9351 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1.9809 & 0 & 0.0192 \\ 0 & 2.9712 & 0.0192 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} e_{y1} \\ e_{y2} \\ e_{y3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} - C \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 + y_3 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

4.7 Calcul théorique des résidus

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

La matrice de transfert de défauts $G_f = C(sI - M)^{-1}(F + sF') - F_y$, avec :

$$F = (ML_y + P)F_y - EF_x$$

$$F = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2.9712 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F' = -L_y F_y$$

$$F' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Le vecteur résidu est défini par :

$$r(s) = \begin{pmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \\ r_3(s) \end{pmatrix} = G_f(s) \begin{pmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r_1(s) \\ r_2(s) \\ r_3(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{s+2} & 0 \\ 0 & \frac{2.9712}{s+3} - 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1(s) \\ f_2(s) \end{pmatrix}$$

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

La table des signatures théoriques associés à ce générateur de résidu est donc peut être déduit immédiatement Dont "1" signifie l'apparition de défaut f_i affectant le résidu r_{ij} et "0" l'insensibilité de ce dernier par rapport au défaut.

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

| | f_1 | f_2 |
|-------|-------|-------|
| r_1 | 1 | 0 |
| r_2 | 0 | 1 |

Tableau 8 : Table des signatures.

Prochainement, une étude expérimentale est mise en question pour vérifier la table des signatures trouvé théoriquement.

4.8 Étude expérimentale

4.8.1 La robustesse de l'observateur à entrées inconnues

La robustesse des observateurs vis-à-vis aux entrées inconnues est indispensable pour un diagnostic fiable et avec moins de fausses alarmes, les figures suivantes illustrent le comportement des résidus en absence et en présence d'entrée inconnue $d(t)$.

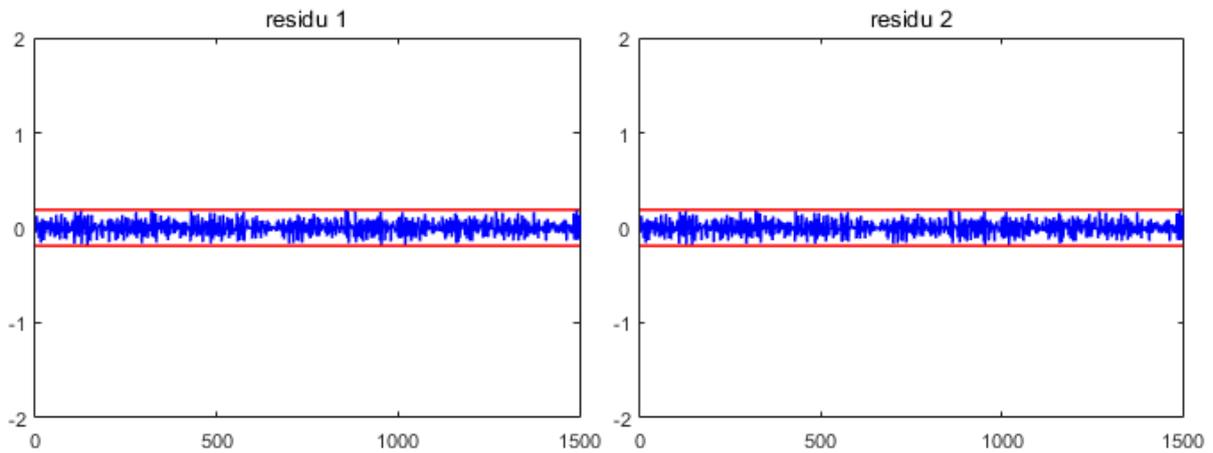


Figure 4-9 : Les résidus $r(t)$ en absence d'entrée inconnue.

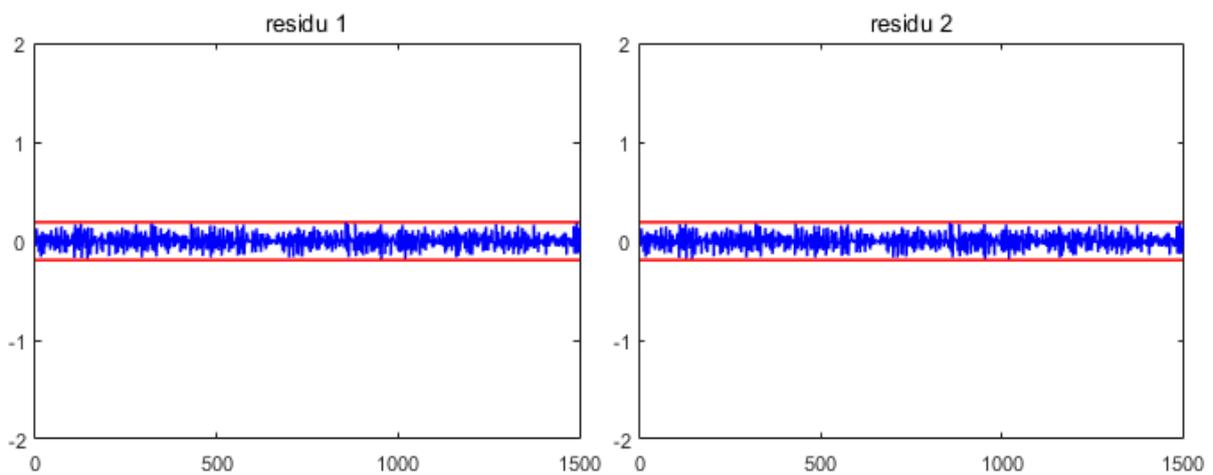


Figure 4-10 : Les résidus $r(t)$ en présence d'entrée inconnue.

L'observateur à gain été sensible aux entrées inconnues, en revanche l'utilisation d'observateur à entrées inconnues permet de générer des résidus robustes qui mènent à une estimation plus fiable des états du système à trois réservoirs afin d'améliorer l'estimation des défauts.

4.8.2 Diagnostic d'un défaut capteur

Les défauts dans les capteurs se produisent normalement en raison de dommages mécaniques qui provoquent un certain déplacement de la position idéale des capteurs, fournissant ainsi des mesures incorrectes. En outre, il existe également la possibilité d'un dommage électrique qui peut se produire à l'intérieur du circuit électronique ou au niveau de

l'alimentation du capteur. L'effet de ces dommages peut être représenté par un facteur d'atténuation qui multiplie la valeur réelle à mesurer. Si ce facteur d'atténuation est égal à zéro, alors le capteur est totalement perdu. En outre, des défaillances qui provoquent des effets additifs sur les mesures du capteur peuvent se produire, c'est-à-dire des défauts de décalage, ou encore des défauts de valeur fixe i.e. étalonnage, où les sorties du capteur ne sont pas mises à jour avec de nouvelles valeurs. Ici, seules les erreurs additives dans les capteurs seront considérées.

Cette fois on fait appel à un défaut du capteur Le défaut sera simulé sur la 2ème sortie (2ème capteur) d'amplitude 1 apparaisse à l'instant $t = 500s$ d'une durée de $100s$.

$$F_{c2} = \begin{cases} 1, & 500 < x < 600 \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases}$$

Les figures ci-dessous montrent les résidus obtenus par l'observateurs :

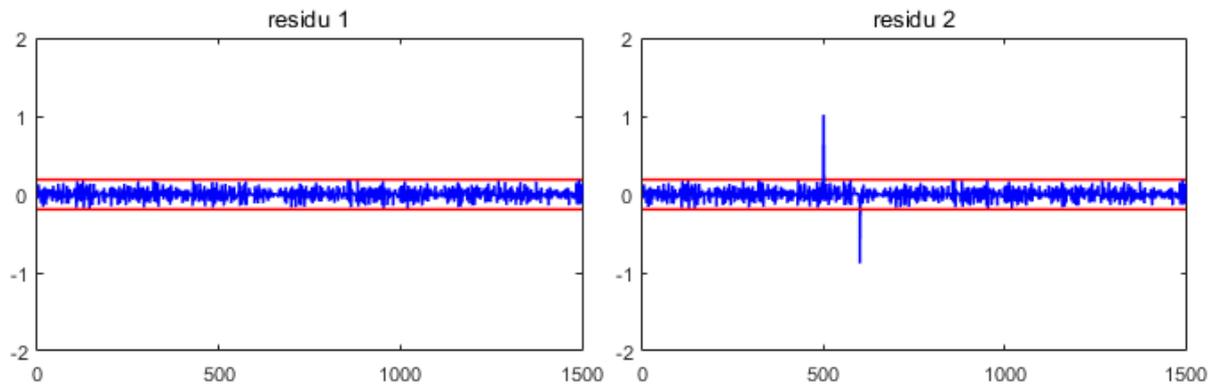


Figure 4-11 : Résidus $r(t)$ en présence d'un défaut capteur.

4.8.3 Diagnostic d'un défaut actionneur :

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et modifier le signal d'entrée du système. Les conséquences de défaut actionneur peuvent varier d'une consommation élevée de l'énergie jusqu'à la perte totale de contrôle.

Dans cette section le problème de la détection et la localisation de défauts d'actionneurs sont traités, considérons à présent le cas de l'apparition de défaut $f_{ac1}(t)$ affectant l'entrée q_1 , il se déclenche à l'instant $t = 500 \text{ sec}$ et disparaît à l'instant $t = 600 \text{ sec}$, avec une amplitude constante égale à 1.

$$f_{ac1}(t) = \begin{cases} 1, & 500s < t < 600s \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La figure suivante représente l'évolution des résidus en présence d'un défaut actionneur.

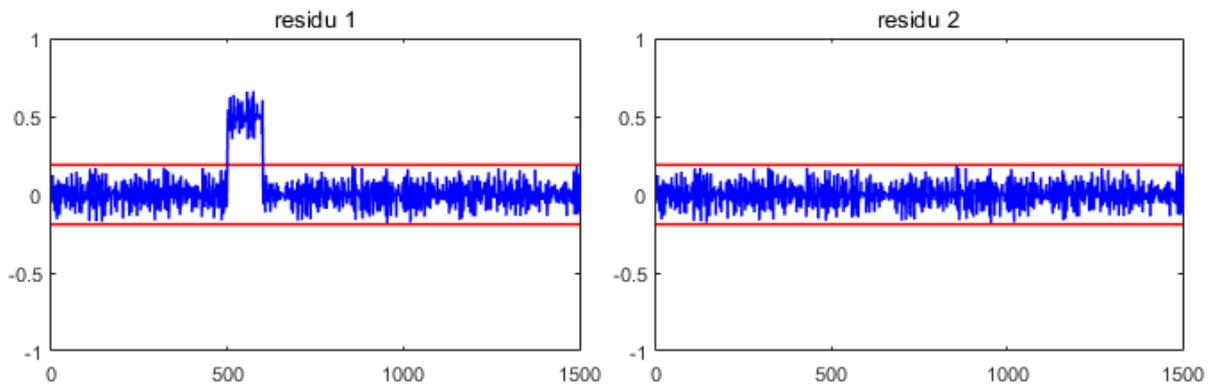


Figure 4-12 : Résidus $r(t)$ en présence d'un défaut actionneur.

Ces figures sont obtenues en suivant les mêmes étapes suivies précédemment dans le cas de défauts capteurs.

4.8.4 Présence d'un défaut capteur et actionneur simultanément

Dans ce cas, on suppose l'apparition simultanée d'un défaut actionneur et d'un défaut capteur, le premier est représenté par f_{ac1} à partir d'instant $t = 500$ jusqu'à $t = 600$ et le défaut capteur f_{c2} apparaît de l'instant $t = 500$ à $t = 600$, le graphe ci-dessous montre le comportement des résidus :

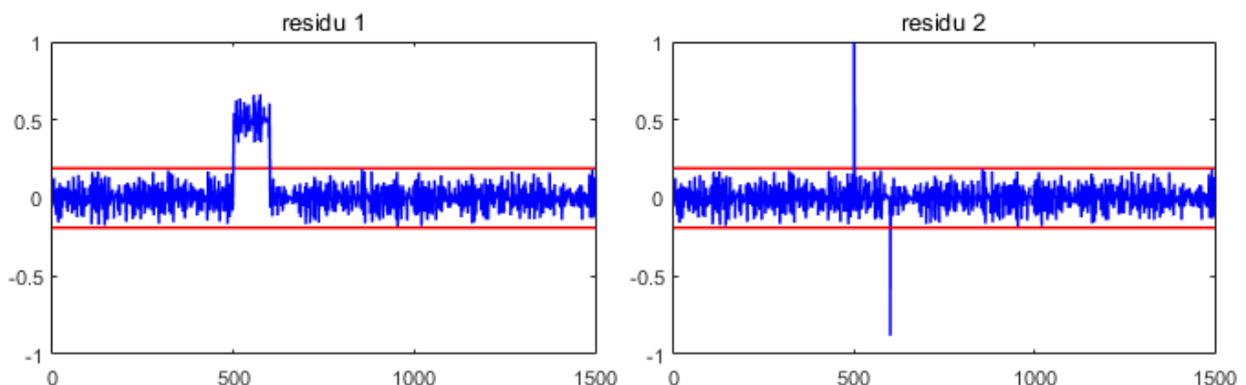


Figure 4-13 : Résidus $r(t)$ en présence des deux défauts (capteur/actionneur).

4.9 Interprétations

L'outil utilisé pour les simulations est le logiciel *MATLAB/SIMULINK*, La simulation utilise le modèle analytique du système à trois réservoirs. Dans le cas de la mesure, les entrées de l'observateur sont les débits sortant des pompes q_1 et q_2 , et la sortie est l'estimation des niveaux d'eau.

Pour rapprocher de la réalité, on a superposé des signaux aléatoires $v(t)$ aux mesures dans le but de prendre en considération les bruits de mesure,

La simulation du système à trois réservoirs présentés ci-dessus permet de retrouver les résidus illustrés dans les figures, la figure (4-9) est sans application de l'entrée inconnue $d(t)$ montre que le comportement des deux résidus en l'absence de défauts est statiquement nul, par contre la figure (4-10) montre la robustesse de l'observateur vis-à-vis l'entrée inconnue $d(t)$ donc les résidus sont insensibles à l'entrée inconnue qui affecte le système étudié.

La figure (4-11) montre que le résidu r_1 est insensible au défaut capteur f_{c2} au même temps nous observons le dépassement de seuil du résidu r_2 ceci montre sa sensibilité au défaut capteur f_{c2} à l'instant $t \geq 500s$.

Le résultat sur (4-12) la figure indique que le résidu r_1 a dépassé le seuil au moment d'apparitions de défaut à l'instant $t = 500$ jusqu'à $t = 600s$ donc il est sensible au défaut actionneur f_{ac1} par contre le résultat de deuxième résidu r_2 montre l'insensibilité à ce défaut.

D'après la figure (4-13) On peut détecter et localiser les deux défauts même si elles apparaissent simultanément.

On conclut d'après les figures que Les résultats de simulation évoluent conformément à la table des signatures obtenue précédemment où la structure de la table des signatures est fortement localisante (deux signatures différente).

Les résultats de la simulation trouvés confirment l'efficacité de l'approche suggérée qui est l'utilisation de l'observateur à entres inconnues pour la détection et la localisation des défauts affectant le système en présence des entrées inconnus.

Chapitre 4

4.10 Algorithme de diagnostic de défauts

Etant donné : un résidu $r_j(t)$ dans les conditions normales de fonctionnement

$H_0(0, t)$: absence de défaut

$$\|r_j(t)\| = 0$$

$H_1(f, t_j)$: occurrence de défaut f depuis l'instant t_j

$$\|r_j(t)\| \neq 0, t \geq t_j$$

Où $\|r_j(t)\|$ est une norme appropriée du résidu

1. Déterminer une fonction test $\varphi(r_j(t))$

L'utilisation de cette fonction permet de fournir une mesure de l'écart du résidu par rapport à zéro les fonctions tests les plus utilisées sont :

La valeur absolue :

$$\varphi(r_j(t)) = |r_j(t)|$$

L'approximation de la norme sur un intervalle $[t, t + T]$:

$$\varphi(r_j(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} |r_j(\tau)|^2 d\tau}$$

La racine moyenne quadratique (RMS) :

$$\varphi(r_j(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |r_j(\tau)|^2 d\tau}$$

2. Déterminer une fonction de seuil $\phi(t)$ pour l'évaluation de la fonction de test, cette fonction de seuil devra avoir les deux propriétés suivantes :

- Absence de défaut :

$$\forall t \geq 0, f(t) = 0 : \varphi(r_j(t)) \leq \phi(t)$$

- Présence de défaut :

$$\forall t \geq 0, f(t) \neq 0 : \varphi(r_j(t)) > \phi(t)$$

Dans le cas idéal (i.e. en absence des entrées inconnues et des perturbations), le seuil $\phi(t)$ peut être choisi constant et aussi proche de zéro. Dans le cas général, il faut prendre en considération les effets des entrées, des perturbations et des bruits de mesures.

Initialiser : $H^{(j)} = H_0$

–Faire :

1. calculer $\varphi(r_j(t))$ et $\phi(t)$

2. si $H^{(j)} = H_0, \forall j$:

Si $\varphi(r_j(t)) > \phi(t)$ alors $H^{(j)} = H_1$

Fin si

–Fin

4.11 Conclusion

Cette étude montre la conception des observateurs, à gain et à entrées inconnues (*UIO*), appliqué au problème de diagnostic de défauts d'un système hydraulique à trois réservoirs, de sorte que les résidus sont insensibles aux perturbations et sensibles aux défauts. Une détection robuste des défauts d'actionneur et de capteur a été considérée où l'algorithme de diagnostic des défauts a été proposée et testé en simulation avec présence et absence de perturbations.

En résumé, nous constatons que la méthode de diagnostic à l'aide d'observateur à entrées inconnues est plus efficace pour la détection et localisation des défauts affectant les composants du système même en présence des perturbations et des bruits de mesure.

Conclusion générale

Ce travail de mémoire a porté sur le diagnostic à base d'observateurs de systèmes non linéaires. L'objectif de ces travaux est la synthèse d'observateurs pour des systèmes non linéaires observables avec défauts afin de détecter et localiser ces derniers.

Nous avons dans un premier temps rappelé les généralités du diagnostic et des observateurs. Le diagnostic de défauts permet d'anticiper l'apparition d'une panne dans le sens où il permet de détecter un défaut. En effet, ce défaut pourrait, s'il n'était pas détecté à temps minimal, causer une panne.

Les observateurs sont souvent utilisés pour la commande d'un système mais ils peuvent aussi servir au diagnostic de défauts. Dans ce cas, les signaux estimés fournis par l'observateur serviront non seulement à la commande du système mais aussi au diagnostic de défauts. L'objectif du diagnostic par observateurs est donc double. L'observateur doit permettre de détecter les défauts tout en étant robuste pour la commande.

L'une des contributions de nos travaux est la définition d'un algorithme de diagnostic de défauts pour un système non linéaire observable. Cette stratégie est basée sur la synthèse d'un observateur non linéaire au travers d'une transformation des coordonnées d'état du modèle non-linéaire au modèle linéaire. La stratégie a ensuite été appliquée au diagnostic de défauts d'un système à trois réservoirs série grâce à un observateur de Luenberger.

La principale difficulté dans l'application de cette méthode de diagnostic des défauts dans un système industriel plus complexe consiste en l'établissement d'un modèle analytique. Cependant, dans de nombreux cas, la décomposition de l'ensemble du système en sous-systèmes permet de modéliser et d'analyser le système. On peut noter que pour chaque sous-système, le modèle obtenu est supposé linéaire autour d'un point de fonctionnement et convient dans la zone de fonctionnement associée.

Dans un contexte de diagnostic à base d'observateurs, la qualité du diagnostic peut être altérée pour plusieurs raisons. D'une part, l'entrées inconnue peut atténuer l'effet des défauts et donc entraîner des non détections, d'autre part, les entrées du système sont corrélées avec les bruits de mesure à cause des entrées inconnues ce qui engendre une difficulté de localisation des défauts. Ce problème se résolu par l'utilisation de L'observateur à entrées inconnues.

Pour que la détection de défauts soit précise, l'observateur doit nécessairement être robuste aux incertitudes paramétriques et aux perturbations.

La démarche utilisée dans ce mémoire pour les systèmes hydrauliques peut être mise en œuvre pour d'autres systèmes industriels à modèle non linéaire.

Annexe

Synthèse d'observateur à entrées inconnues (pages 58-61) :

```
clear all ;close all ; clc
%initialisation
%definir le systeme
A=[0 -1 0;100 -10 -1;0 2 -1]
B=[1;0;0]
C=eye(3)
D=zeros(3,2)
dx=[0;0;1]
fx=[1 0 0;0 0 0;0 0 0]
fy=[0 0 0;0 1 0;0 0 1]
%verifie les conditions
%1
rank(C*dx)
%2
r=C*dx
t=r'
w=inv(t*r)
L=-dx*w*t
%3
E=C+L*C
%4
N=E*B
%5
M=[-5 0 0;0 -6 0;0 0 -7]
%6
% pc=(E*A)-M*E
P=(E*A)-(M*E)
% P=pc*inv(C)
%calculs théorique
I=eye(3)
F=(M*L*fy)+(P*fy)-(E*fx)
Fprime=-L*fy
syms s
G=C*(inv((s*I)-M))*(F+(s*Fprime))-fy
```

Synthèse d'observateur de Luenberger du système à trois réservoirs (pages 71-72) :

```
clear all ;close all ; clc
%initialisation
s=0.0154;%section cuve
sn=0.00005;%section tube
g=9.81;% gravity
u=0.6;%coefficiant d'ecoulement
q1=0.00003;%débit pompe 1
q2=0.00003;%débit pompe 2
%q0=u*sn*sqrt(2*g*12)
c=0.5*(1/s)*u*sn*sqrt(2*g);
x1=0.3037;%equilibre
x2=0.2025;%equilibre
x3=0.2531;%equilibre
%definir le systeme
A=[-c/(sqrt(x1-x3)) 0 c/(sqrt(x1-x3));0 -c/(sqrt(x3-
x2))-c/sqrt(x2) c/(sqrt(x3-x2));c/(sqrt(x1-x3)) c/(sqrt(x3-
x2)) -c/(sqrt(x1-x3))-c/(sqrt(x3-x2))];
B=[1/s 0;0 1/s;0 0];
C=eye(3);
D=zeros(3,2);
%valeurs propres
eig(A);
%representation d'etat
sys=ss(A,B,C,D);
%comandability
c=ctrb(A,B);%%controlability
rank(c);%rang complet
%observability
o=obsv(A,C);%Observability
rank(o);% rang complet
%choix de poles
obpoles=[-0.5 -0.2 -0.02];
%placement des poles
L=place(A',C',obpoles);
%synthese d'observateur
Aobs=[A-L*C];
Bobs=[B L];
Cobs=eye(3);
Dobs=zeros(3,2);
%valeurs propres de l'observateur
eig(Aobs);
sysobs=ss(Aobs,Bobs,Cobs,Dobs);
```

Calcul théorique de la matrice de défauts (système à trois réservoirs pages 75-77) :

```

clear all ;close all ; clc
%initialisation
s=0.0154;
sn=0.00005;
g=9.81;
u=0.6;
q1=0.00003;
q2=0.00003;
%q0=u*sn*sqrt(2*g*12)
c=0.5*(1/s)*u*sn*sqrt(2*g);
x1=0.3037;
x2=0.2025;
x3=0.2531;

%definir le systeme
A=[-c/(sqrt(x1-x3)) 0 c/(sqrt(x1-x3));0 -c/(sqrt(x3-x2))-
c/sqrt(x2) c/(sqrt(x3-x2));c/(sqrt(x1-x3)) c/(sqrt(x3-x2)) -
c/(sqrt(x1-x3))-c/(sqrt(x3-x2))]
B=[1/s 0;0 1/s;0 0]
C=eye(3)
D=zeros(3,2)

dx=[0;0;1]
fx=[1 0 0;0 0 0;0 0 0]
fy=[0 0 0;0 1 0;0 0 0]
%verifie les conditions
%1
rank(C*dx)
%2
r=C*dx
t=r'
w=inv(t*r)
L=-dx*w*t
%3
E=C+L*C
%4
N=E*B
%5
M=[-2 0 0;0 -3 0;0 0 -3]
%6
pc=(E*A)-M*E
P=pc*inv(C)
%calculs théorique
F=(M*L*fy)+(P*fy)-(E*fx)
Fprime=-L*fy
syms s
G=C*(inv((s*C)-M))*(F+(s*Fprime))-fy

```

Bibliographie

- A. Akhenak, M. C. (2003). . State estimation via multiple. *IFAC Symposium on Fault Detection*, pages 1227–1232.
- AKHENAK, A. (2004, dec). Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodèle : application au diagnostic. Lorraine, l'Institut National Polytechnique, France.
- al., J. C. (1999). *Robust Model-Based Fault Diagnosis For Dynamic Systems*. Kluwer Academic .
- Beard. (1971). failure accommodation in linear systems through self reorganization. *Phd dissertation*. Cambridge, MIT.aero.astro .
- BENALLEL, M. (s.d.). PLACEMENT DE CAPTEURS POUR LA SURVEILLANCE DES SYSTÈMES MODÉLISÉS PAR LES BOND-GRAPHS. Tlemcen, UNIVERSITE DE TLEMCCEN, Algerie.
- Boukhalfa, N. S. (s.d.). Synthèse d'observateurs non linéaires : Application au diagnostic de défauts.. Tizi-Ouzou, Automatique, Algerie.
- BOULAREM, A. (2013). Diagnostic des systemes non-lineaires représentés par multi-modele. Université de M'SILA, Automatique, Algerie.
- Brunton, S. (s.d.). *Control Bootcamp: Full-State Estimation*. Récupéré sur Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=MZJMi-6_4UU
- C. Join, J.-C. P. (January 2005). Nonlinear filter design for fault diagnosis: application to the three-tank system. *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, 55-65.
- Cherubini, A. (s.d.). *Observateur d'état 1/5*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=ZwnZMqmMmfc>
- CHING, L., RUSSELL, E., & BRAATZ, R. (s.d.). *Fault detection and diagnosis in industrial systems*.
- DING, S. (s.d.). *Fault detection and diagnosis in industrial systems*.
- DING, S. (s.d.). *Model-based fault diagnosis techniques-design schemes algorithms and tools*.
- DJEDDI, A. (2017, Février). Diagnostic des systemes non linéaires à base d'observateurs. Annaba, électronique, Algerie.

- DJEGHALI, N. (2013, Oct). Observation, Diagnostic et Commande de la Machine Asynchrone. Tizi-Ouzou, Automatique, Algerie.
- Engineers, T. W. (s.d.). *Observer design in Matlab simulink*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=Lax3etc837U>
- Granjon, Y. (s.d.). *Systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état*. Nancy: DUNOD.
- HARKET, A., & KHELFAOUI, I. (2017, Mai). Diagnostic de Défautes du Système Hydraulique Cinq Cuves. Ouargla, Automatique, Algerie.
- HEBLY, A., & DUMON, J. (2011, Oct). Observation et commande par retour d'état d'un procédé de bacs communicants. Saint-Martin d'Herès, Automatique, France.
- Johnson, C. D. (1975). Observers for linear systems with unknown and inaccessible inputs. *International Journal of Control, Vol. 21*, 825-831.
- Juan L. Mata-Machuca, R. M.-G.-S. (2012). Fault estimation using a polynomial observer: A real time application. *IFAC Symposium on Fault Detection*.
- KHEBACHE, H. (2018). Diagnostic des systèmes. Jijel, Automatique, Algerie.
- Korbicz, J., Patan, K., & Luzar, M. (2020). *Advances in diagnostics of processes and systems*. Poland: Springer.
- KRIM, O., & KHOUAS, S. (2010, juillet). Commande par modèle interne d'un système hydraulique DTS 200. Tizi-ouzou, Automatique, Algerie.
- LARROQUE, B. (2008, Sep). Observateurs de systèmes linéaires Application à la détection et localisation de fautes. Toulouse, Ecole Doctorale Systèmes, France.
- M. Hou, Y. S. (2015). Observing a Three-Tank System. *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, 478.
- MAQUIN, D., & RAGOT, J. (2000). *Diagnostic des systèmes linéaires*. Paris: Hermes.
- MERAHI, K. (2010). Estimation d'état et diagnostic de fonctionnement des systèmes non linéaires. Annaba, électronique, Algerie.
- MESKIN, N., & KHASHAYAR, K. (2011). *Fault detection and isolation*. College of Engineering Qatar University: Springer.

- Michael Basin, L. L. (2015). Finite-time-convergent fault-tolerant control for dynamical systems and its experimental verification for DTS200 three-tank system. *IET Control Theory & Applications*, 1670-1675.
- Moreno., J. (2001). Existence of unknown input observers and feedback passivity for linear systems. *IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 1*, , 3366-3371.
- observer, F. d. (s.d.). H. Aguilar Sierra, R. Martínez-Guerra, J. L. Mata-Machuca. Mexico D.F, Department of Automatic Control, CINVESTAV-IPN,, Mexico.
- P. Chalupa, J. N. (2012). Comprehensive Model of DTS200 Three Tank system in simulink. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICAL MODELS AND METHODS IN APPLIED SCIENCES*, 358-365.
- P. Kudva, N. V. (1980). Observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 25*, 1131-15.
- Peet, M. (s.d.). *MAE598 (LMIs in Control): Lecture 6, part B - The Luenberger Observer Framework*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=eSY8Fwp2dQo>
- Peng., C. S. (2002). Inverse-dynamics based state and disturbance observers for linear time-invariant systems. *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, 375-381.
- Rotella, F. (s.d.). Observation. Tarbes, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France.
- S.K.Danssanake. (2000). using unknown input observers to detect and isolate sensor faults in a turbofan engine. *Digital Avionics Systems conferences Vol.7*, 27-28.
- Saif., G. e. (1991). A Novel Approach to the Design of Unknown Input Observer. *IEEE Trans. Autom. Control* , tome 36, 632-635.
- SALLEM, F. (2013, Sep). Détection et Isolation de Défauts Actionneurs Basées sur un Modèle de l'Organe de Commande . Toulouse, Automatique, France.
- Saranli, A. (s.d.). *Luenberger Observer - II (Lectures on Feedback Control Systems)*. Récupéré sur Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=dRlvasf_qSc
- Senouci, B. B. (2018, juin). Diagnostic De Défaut Par Un Observateur Non Linéaire. Saida, Université Dr. Tahar Moulay, Algerie.

source, O. (s.d.). Récupéré sur Wikipedia:
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagnostic_\(mat%C3%A9riel\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagnostic_(mat%C3%A9riel))

STEFEN HUI, S. H. (2005). OBSERVER DESIGN FOR SYSTEMS WITH UNKNOWN INPUTS. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, 431-446.

TAHRAOUI, S. (2016, decembre). Diagnostic Des Systèmes Dynamiques à Base d'observateurs à Entrées Inconnues. Tlemecen, Automatique (modélisation et contrôle des processus), Algerie.

TAHRAOUI, S., MEGHEBBAR, A., & BOUBEKEUR, D. (2015). Fault Detection in A Five Tank Hydraulic System. *ELECTROTEHNICĂ, ELECTRONICĂ, AUTOMATICĂ*.

TAHRAOUI, S., MEGHEBBAR, A., BOUBEKEUR, D., & BOUMEDIEN, A. (s.d.). System Modeling and Faults Diagnosis of a Five Hydraulic Tanks. Tlemcen, Automatic Laboratory, Abou Bekr Belkaid University,, Algeria.

TAKROUNI HEDFI, A. (2013). Surveillance par observateurs des systèmes dynamique hybrides. Lille, Laboratoire d'Automatique et de genie informatique et signal, France.

Theilliol,, D., Noura, H., & Ponsart, J.-C. (2002). Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based. *ISA Transactions*.

TOSCANO, R. (2011). *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques*. Paris: ellipses.

Wang. (1975). Observing the states of systems with unmeasurable disturbances. *IEEE.transactions on automatic control*, 716-717-718.

X.Ding, S. (s.d.). *Model-based fault diagnosis techniques*. Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Germany: Springer.

Youcef AIT GHERBI, M. R. (s.d.). Synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes linéaires continus Application à la détection de fuite d'un système hydraulique . Tizi-ouzou, Automatique, Algerie.