

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche  
Scientifique



**Université de Ghardaïa**

N° d'ordre :  
N° de série:

Faculté des Sciences et Technologie  
Département des Sciences et Technologie

**Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**LICENCE**

**Domaine : Science et Technologie**

**Filière : Génie électrique**

**Spécialité : Maintenance en instrumentation industrielle**

**THEME:**

*Méthodes de détection et de localisation des pannes dans les  
systèmes non linéaires*

**PAR :**

**Abdelghafar DABA  
Zakaria BEN HAMIDA  
Mhammed BOUSSALEM**

**Jury:**

**M<sup>r</sup>: BENCHABANE Achour**

Maitre-Assistant A Univ. Ghardaïa

**Encadreur**

**M<sup>r</sup>: LADJAL Boumediene**

Maitre-Assistant A Univ. Ghardaïa

**Examineur**

**ANNEE UNIVERSITAIRE: 2013/2014**

# Remerciements

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

*Nous remercies l'encadrement « M. Ben Chabane », pour, leur aide, leurs directives, leurs conseils précieux et surtout à la confiance qu'ils m'ont accordée.*

*Nous remercies les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.*

*Nous remercies également tous les professeurs du département des sciences et technologies pour leur aide, leur conseil et leur compréhension.*

*Nous n'oublie pas également de remercier le personnel de la bibliothèque.*

*Nous adresse mes vifs remerciements, mes amies et tous qui m'aident pour leurs encouragements chacun de son nom.*

*Nous remercies toute personne qui m'a apporté son aide, ne serait-ce que minime.*



# DEDICACES

*Louange au dieu. Il n'est point d'autre dieu que lui. Nul autre n'est digne d'adoration.*

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

*Je dédie ce travail également,*

*A mes chères frères : Med Madjid, Fouad.*

*A ma chère sœur : Souad, Nawal, Atika, Aziza et la petite fille Ikram.*

*A mes deux grand-mères et grandes père.*

*A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines.*

*A tous mes chères amis dans l'université : « Zakaria, Samir, Abdel Rahman, Mohammed, Mohammed, Jamal, Hamza, Khaled, Tahar, Ahmed, Moktar, Anzir.....et tous les étudiants à 1<sup>er</sup>, 2<sup>eme</sup> et 3<sup>eme</sup> Génie Electrique ».*

*A tous mes amis, que ce soit à In Saleh (Saïd, Yousfi, Saleh, Ahmed, Hamed.....).*

*A tous la famé DABA .*

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

*D.Abdelghafar*

# Dédicace

Dieu merci beaucoup et puis grâces de la prière et la paix soient sur sa création, soit après : j'ai dédié ce modeste travail d'abord:

A le symbole de compassion et d'amour et de patience ma chère **mère** ;

A le symbole de sacrifice, de patience et de motivation mon chère **père** ;

A mes chères **grands-parents** ;

A mon frère : Mohammed Abd el Rahman ;

A ma Chères sœurs : sara, rokia, assia, Om alfadl et rabiaa ;

A Oncles et tantes et oncles et tantes ;

Et tout la famille de Ben Hamida ;

A Chaque collègues, amis et proches et compagnons : abd elghafar , samir , abdelrahman , hamza , les deux Mohammed , les deux tahar , ahmad , khalid , djamal ,..... Etc

**Zakaria.**

# Dédicaces

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

*Je dédie ce travail également,*

*Ames deux, très chers, frères, yehya et Younes, pour leur soutien, leur aide, Leurs encouragements.*

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

*A la mémoire de mon regretté grand père.*

*A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines*

*A Monsieur choucas, mon professeur de mathématique à l'université de Ghardaïa.*

*A tous les amis de mes frères, que ce soit à Tamanrasset (ben Abdelkrim, Abdeslam...)*

*Et Ghardaïa (bacar, Adel, sidahmad, daha, farage, Mohamed,)*

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

## Table des matières

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 01 : Introduction au diagnostic .....</b>	
I.1. Intérêt et objectifs du diagnostic .....	3
I.2. Formulation du problème de diagnostic .....	3
I.2. 1. Définitions et généralités sur les défauts .....	3
I.2.2. Etapes du diagnostic des défauts .....	5
I.3. Critère de performance d'un système de diagnostic .....	6
<b>Chapitre 02 : Méthodes de diagnostic .....</b>	
II.1 Introduction .....	8
II.2 Principe de diagnostic des défauts.....	8
II.2.1 Redondances d'informations .....	8
II.2.2 Procédure de détection et d'isolation des défauts.....	9
II.3 Présentation des méthodes de diagnostic.....	10
II.3.1 Méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique .....	10
II.3.2 Méthodes de diagnostic basées sur les signaux .....	12
II.3.3 Diagnostic à base de modèle qualitatif .....	13
II.3.4 Méthodes de Classification.....	14
II.3.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle .....	14
II.4 Modélisation du système en vue du diagnostic .....	14
II.4.1 Types de défauts.....	15
II.4.2 Modélisation des défauts .....	15
II.4.3 Modélisation des perturbations .....	16
II.4.4. Comportement des défauts .....	17

---

## Table des matières

---

II.5. Génération de résidus .....	18
II.5.1.Résidus .....	18
II.5.2.Génération de résidus .....	18
II.6 Conclusion .....	20
<b>Chapitre 03 : Diagnostic à base des observateurs .....</b>	
III.1 Introduction.....	22
III.2 Observateur dédiés au diagnostic des défauts des systèmes non linéaires.....	22
III.2.1 Observateurs non linéaires .....	22
III.2.2 Observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire.....	24
III.2.3 Observateurs par modes glissants dédiés à la détection et la localisation des défauts...26	
III.3.1.Estimation Paramétrique et génération de résidus .....	35
III.3.2.Estimation d'état et désertion de résidus .....	36
III.4.Espace de parité .....	38
III.3.1.Espace de parité statique .....	38
III.3.2.Espace de parité dynamique .....	41
III.4.Conclusion .....	42
III.6. Conclusion Générale .....	44
Bibliographie .....	45

---

## Table des Figures

Figure (I, 1) : étapes du diagnostic à base de modèle.

Figure (II ,1) : Redondances d'informations.

Figure (II ,2) : Les étapes de diagnostic.

Figure (II ,3) : Méthodes de diagnostic.

Figure (II ,4) : Le principe des méthodes de classification.

Figure (II ,5) : Les différents types de défauts.

Figure (II ,6) : Génération de résidus.

Figure (II ,7) : génération de résidus à base de modèle.

Figure (III ,1) : la structure de l'observateur.

Figure (III ,2) : La structure générale de la détection de défauts.

Figure (II ,3) : Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes.

Figure (II ,4) : Estimation Paramétrique et génération de résidus.

Figure (II ,5) : Estimation d'état et désertion de résidus.

## **Résumé**

En raison de pannes et les problèmes qui peuvent survenir dans les systèmes non linéaires que nous avons dans ce travail une étude détaillée sur les méthodes de détection et d'identification de pannes ou défaut qui peuvent se produire dans ces systèmes où cela se fait à l'aide de plusieurs techniques et les différentes façons parmi les plus importantes le diagnostic par un observateur et l'estimations paramétriques, ainsi que l'espace de parité.

Mots clé : système non linéaire, panne, diagnostic, observateur, estimation.

## **Abstract**

Because of breakdowns and problems that can occur in nonlinear systems we have in this work a detailed study on the methods of detection and identification of damage which can occur in these systems where this is done by using several techniques and different ways among the most important following roads diagnosis by Observer and settings, the estimated parameters and as well as the parity space.

Keywords: nonlinear system, failure, diagnosis, observer, estimate.

## **ملخص**

نظرا للأعطال و المشاكل التي يمكن ان تحدث في الانظمة الغير خطية قمنا في هذا العمل بدراسة مفصلة عن طرق الكشف وتحديد العطل أو العطب الذي يمكن أن يحدث في هاته الأنظمة حيث يتم ذلك باستعمال عدة تقنيات وطرق مختلفة من بين واهم هاته الطرق التشخيص عن طريق استراتيجية المراقب و الاعدادات التقديرية وكذلك فضاء التكافؤ.

الكلمات المفتاحية : الأنظمة غير الخطية ، الفشل ، تقدير ، التشخيص، مراقب.

---

# Introduction Générale

### Introduction Générale

Depuis les années soixante, un fort intérêt s'est manifesté dans les milieux industriels et de Recherche pour développer des techniques permettant d'améliorer la sécurité des systèmes Automatiques ou semi automatiques. Cet intérêt s'est tout d'abord focalisé sur les grands Systèmes comme ceux de l'aérospatial, du nucléaire et de la pétrochimie. Des notions comme surveillance, diagnostic, supervision ont été précisées. Un système de surveillance doit permettre d'identifier le mode de fonctionnement d'un système en enregistrant des informations, en reconnaissant et en indiquant les anomalies de son comportement.

Les fonctions de supervision servent alors à éviter, ou lorsque ce n'est pas possible de gérer les états indésirables du procédé, à prendre les actions appropriées pour maintenir une bonne Conduite et éviter tout endommagement ou accident.

La détection et l'isolation des pannes dans les systèmes dynamiques, c'est à dire leur diagnostic, a été un sujet important de recherche dès le début de l'Automatique moderne. En effet dans beaucoup d'applications il s'agissait déjà, au delà de considérations purement économiques, d'assurer la sécurité des personnes et de préserver leur environnement. C'est notamment le cas pour beaucoup d'applications liées aux domaines de l'énergie, de l'eau, de l'air et des transports.

La diversité des approches qui ont été développées pour le diagnostic des systèmes dynamiques semble être le résultat de contextes différents associés à la nature des applications visées et aux caractéristiques propres du cahier des charges qui en résulte.

Ainsi, la nature des informations disponibles sur le système ou le type de défauts à détecter conduit à la mise en œuvre de stratégies spécifiques.

Les méthodes de diagnostic à base de modèles occupent une place importante dans la littérature. Leur utilisation, notamment dans le cadre d'applications critiques (systèmes énergétiques, systèmes de transport, industrie lourde), s'est considérablement développée. Si une vaste littérature existe dans le cas des systèmes dynamiques linéaires, en ce qui concerne les systèmes dynamiques non linéaires, peu de travaux qui mettent à profit le caractère non linéaire du système, ont été réalisés à ce jour. Depuis un peu plus de dix ans, les automaticiens ont été amenés, dans le cadre de la commande des systèmes mécaniques articulés à caractère fortement non linéaire et plus précisément dans le cadre du suivi de trajectoires, à distinguer une nouvelle classe de systèmes, les systèmes différentielle ment plats, qui finalement sont rencontrés de façon fréquente dans beaucoup de cas d'application. Ceci a conduit à la conception de nouvelles méthodes de synthèse de lois de commande non linéaires qui permettent de conférer aux sorties de tels systèmes un comportement standard au voisinage de trajectoires de référence.

## Introduction Générale

---

Il est clair que l'apparition d'une défaillance au sein d'un système différentielle ment plat commandé ou au niveau de ses chaînes de mesure ou de ses chaînes de commande, doit résulter en une modification de ce comportement. Une fois la détection de cette modification réalisée, celle-ci devrait pouvoir être mise à profit en tenant compte notamment de la propriété de platitude différentielle pour en réaliser le diagnostic.

# **Chapitre I**

## **Introduction au diagnostic**

## **I.1. Intérêt et objectifs du diagnostic :**

Dans le domaine de l'industrie et de la production industrielle le champ de la compétitivité repose sur plusieurs critères de performance, de robustesse et de qualité. Mais malgré toutes les assiduités pour l'établissement de ces conceptions, les défaillances de celles-ci se font fréquentes et peuvent résulter soit d'une fin de cycle de vie d'un élément et aussi de l'apparition soudaine d'une panne brusque. Alors que ces éléments de production représentent pour la plupart du temps des enjeux majeure soit à bus lucratifs (ex : chaîne de production dans une usine) ou pour assurer un service (ex : un scanner dans un hôpital), elles peuvent aussi toucher à un élément des plus important qui représente la sécurité matérielle, environnementale, et même humaine. Pour éviter des conséquences irréversibles, des méthodes de supervision et de surveillance ont été mise en place et qui repose toutes sur le diagnostic des systèmes.

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système [COM00]. Plus généralement le diagnostic apporte une contribution à la solution de détection et de localisation d'un mauvais fonctionnement.

## **I.2. Formulation du problème de diagnostic :**

### **I.2.1. Définitions et généralités sur les défauts :**

Le but du diagnostic est la détection puis la localisation de défauts, afin de bien poursuivre notre démarche de diagnostic une bonne connaissance des défauts s'impose.

#### **I.2.1.A. Anomalie, défaut, défaillance, panne :**

Par mesure de simplicité d'écriture, nous emploierons indifféremment dans la suite de ce mémoire les termes de défaillance, défaut ou panne. Néanmoins, le vocabulaire usuel de la sûreté de fonctionnement distingue ces notions :

- Anomalie : particularité non conforme à la loi naturelle ou à la logique.
- Défaut : anomalie de comportement au sein d'un système physique.
- Défaillance : anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique.
- Panne : inaptitude d'un dispositif à accomplir sa fonction.

### **I.2.1.B. Classification des défauts :**

Les défauts sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système. Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation, définissant alors des types de défauts. On peut aussi définir le défaut comme étant « une déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système des conditions acceptables ou (et) standard ».

- **Défauts actionneurs :**

Ce type de défauts représente une perte partielle ou totale de l'organe de commande il a pour conséquence une détérioration du signal d'entrée du système. Il peut en résulter aussi une perte de commandabilité du système (le système devient non commandable) ainsi la partie opérative du système perd son influence pour régir les contrôles voulus.

- **Défauts capteurs :**

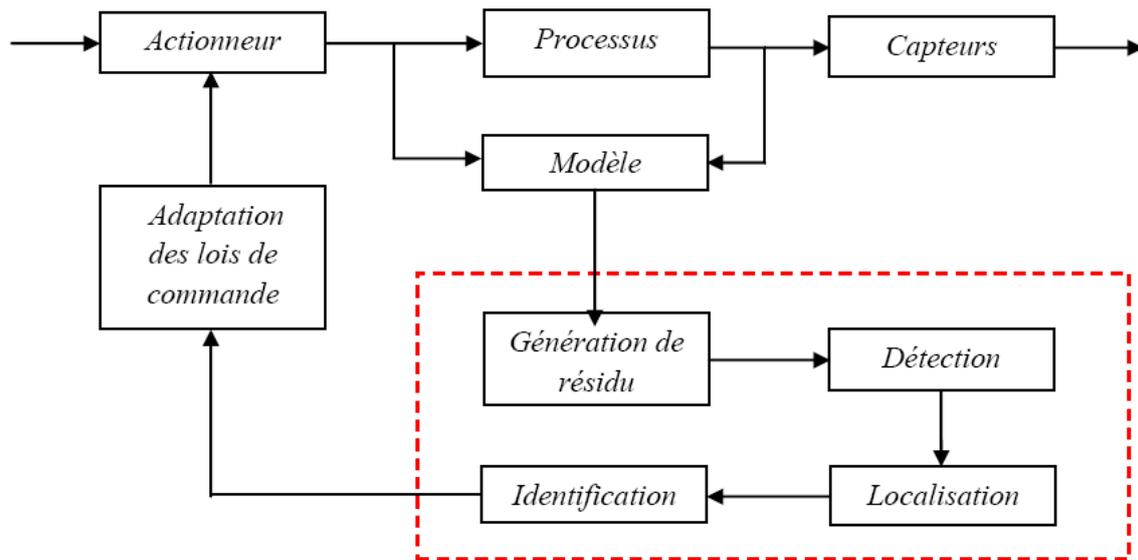
Ce type de défaut est la cause d'une mauvaise image de l'état physique du système. Un défaut capteur partiel produit un signal avec plus ou moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable mesurée [ROD05]. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture, ainsi on pourra même extraire la partie utile du signal mesuré. Tandis qu'un défaut capteur total produit une valeur qui n'est pas en rapport avec la grandeur à mesurer qui donne carrément des valeurs erronées hors de sens et d'utilité.

- **Défauts systèmes ou composants :**

Ce sont des défauts qui ont lieu dans les composants du système lui-même. Ce qui englobe tous les défauts qui ne peuvent être classés parmi les défauts de capteurs ou d'actionneurs [CHA06]. Ces défauts représentent les changements des paramètres physiques du système, par exemple la masse, les coefficients aérodynamiques, la constante de dissipation, etc. Ils ont souvent comme conséquence le changement du comportement dynamique du système commandé. Les défauts de composants système sont en général modélisés sous la forme d'un système à paramètres variables.

### **I.2.2. Etapes du diagnostic des défauts :**

Afin de diagnostiquer les défauts qui peuvent surgir dans un système plusieurs méthodes ont été développées, la **Figure I. 1** nous montre un schéma général des étapes de diagnostic des plus utilisés.



**Figure I. 1 :** étapes du diagnostic à base de modèle

On peut à l'aide de ce schéma diviser les étapes de diagnostic en [JAM03] :

□ Génération de résidus : cette première phase consiste à générer un signal résiduel reflétant la distance entre le modèle du système et son comportement observé au cours du temps.

□ Prise de décision : Cette deuxième phase consiste à implémenter un test de détection sur les résidus générés ou les variables mesurées afin de détecter et localiser la présence éventuelle d'un ou de plusieurs défauts sur la base du calcul d'un seuil de signification.

Cette deuxième étape oblige une bonne connaissance du système et l'établissement de signature propre au cas étudié. Il en résulte donc trois actions successives [THE03] :

- **La détection :**

La procédure de détection vise à déterminer l'apparition et l'instant d'occurrence d'une défaillance. Cette étape ne nécessite qu'un modèle de bon fonctionnement du système. Une panne sera détectable si au moins un résidu permet de la détecter. Lorsque le modèle permet de représenter exactement le système (aucune erreur de modélisation, connaissance de la nature des signaux inconnus agissant sur le système, ...), les résidus générés auront une dynamique uniforme et converge au tour d'une valeur fixe en général zéro tandis qu'en présence d'anomalie ont aura un changement de comportement. La détection d'une défaillance se résumera alors à déclencher une alarme lorsqu'au moins un résidu différera de zéro. En pratique, les modèles utilisés sont obtenus à partir d'hypothèses simplificatrices et

sont donc imparfaits. Les résidus (qui reflètent l'écart entre le modèle et le système) ne sont plus parfaitement égaux à zéro. Une procédure de décision doit être implantée afin de décider si la valeur différente de 0 du résidu doit générer une alarme ou non. La qualité de la détection dépend bien entendu de la procédure de décision choisie mais aussi et surtout de la "qualité" des résidus utilisés. Afin de réduire les taux de fausse alarme et de non détection, les résidus doivent être optimisés, c'est à dire rendus le plus sensible possible aux défaillances et le moins possible aux perturbations ou erreurs de modélisation.

- **La localisation :**

Lorsqu'une défaillance est détectée, une procédure de localisation est utilisée pour permettre de déterminer son origine. Cette étape nécessite d'utiliser un modèle de comportement défaillant de connaissance sur les défaillances. La procédure de localisation nécessite d'utiliser un ensemble (ou vecteur) de résidus ou de variables mesurées. Pour permettre la localisation, ce vecteur doit avoir un certain nombre de propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut.

- **L'identification :**

L'identification de défauts déterminant l'amplitude de la panne ou de la défaillance. Cette action n'est pas toujours utilisée car l'évaluation de l'amplitude de panne ne s'applique pas dans le cas d'étude de défaillance totale.

### **I.3. Critère de performance d'un système de diagnostic :**

Un système de diagnostic doit vérifier un ensemble de caractéristiques. Il doit permettre [33] :

La détectabilité :

Pouvoir détecter une défaillance particulière

La localisation :

C'est l'aptitude de la procédure de détection à distinguer (c'est à dire localiser) plusieurs fautes sous réserve que ces fautes soit détectables.

La sensibilité :

Elle caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'amplitude donnée. Elle dépend surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter.

La robustesse :

C'est l'aptitude de la procédure à détecter les fautes indépendamment des erreurs de modèle du

processus et des perturbations extérieures.

La rapidité de la détection :

Elle se définit d'elle-même ; c'est un impératif à prendre en compte lorsque le diagnostic doit être établi en temps réel.

### **Conclusion :**

Le contexte et le domaine d'application, le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver les causes d'une défaillance ou d'un défaut, il est défini par les instances internationales de normalisation comme étant un processus d'identification de la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un teste.

# Chapitre II

## **Méthodes de Diagnostic**

## II.1 Introduction :

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut.

La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI), est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ».

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom: FDI (Fault Detection and Isolation, en anglais). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible.

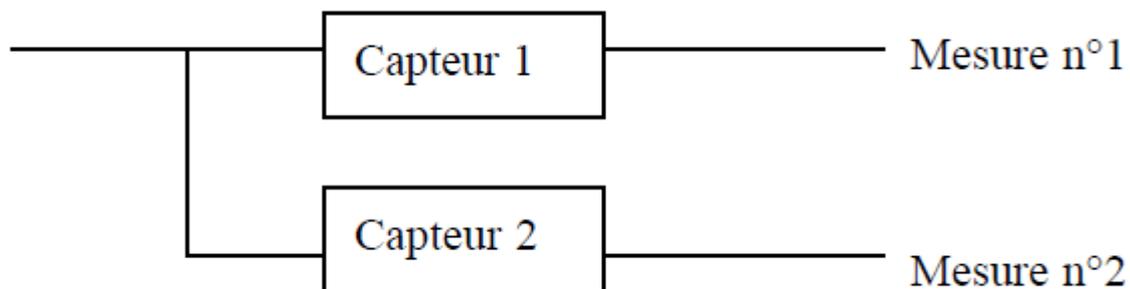
Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications [1].

## II.2 Principe de diagnostic des défauts :

### II.2.1 Redondances d'informations :

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

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



Figure(II.1) Redondances d'informations

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

- La deuxième approche est dite redondance analytique. Elle consiste à développer des algorithmes de détection et de localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système. Une équation de redondance analytique est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. Pour éviter les fausses alarmes ou les manques de détection, ces algorithmes doivent tenir compte des bruits de mesure, des perturbations ainsi que des erreurs de modélisation. Les méthodes basées sur cette approche sont plus simples, plus flexibles, moins coûteuses et plus écologiques que l'approche traditionnelle [1].

### II.2.2 Procédure de détection et d'isolation des défauts :

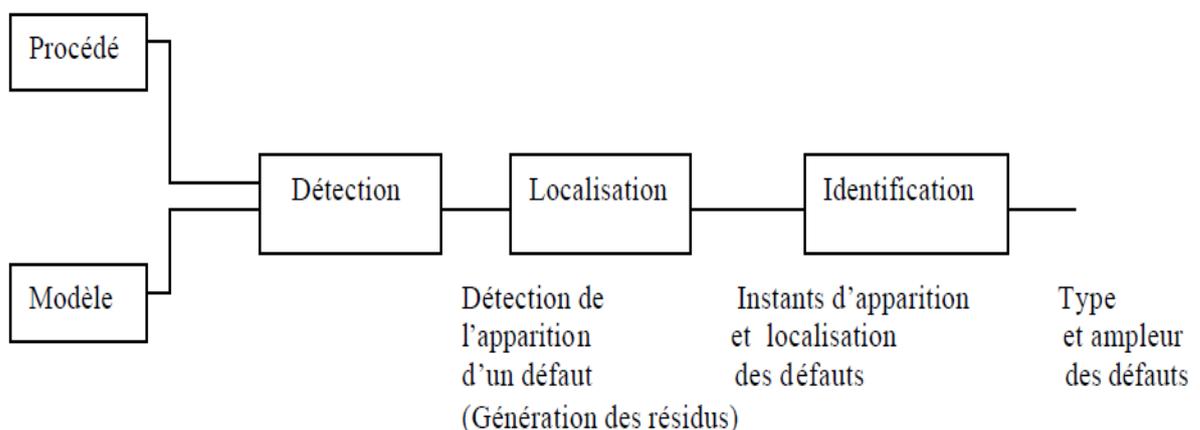
La procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes Essentielles

**a. La détection:** C'est l'étape qui décide si le système est soumis à un défaut ou pas Elle consiste dans la plus part des cas à générer le vecteur résidu, qui est nul en fonctionnement normal et est comparé en ligne aux signatures de pannes.la détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.

**b. La localisation :** Cette étape permet de localiser le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie.

**c. L'identification :** L'ampleur et le type des défauts sont estimés dans cette phase.

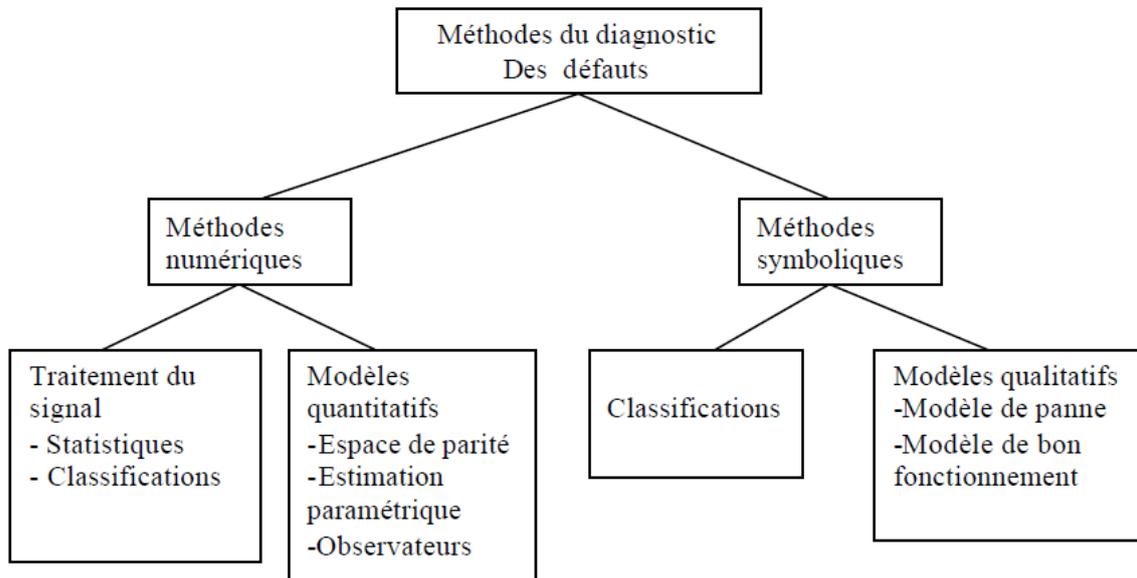
Ces étapes sont résumées sur la figure suivante :



Figure(II.2) Les étapes de diagnostic

### II.3 Présentation des méthodes de diagnostic :

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



Figure(II.3) méthodes de diagnostic

Selon que l'on dispose, ou pas, d'un modèle mathématique représentatif du système, les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes. Dans le premier cas, on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme ou à l'intelligence artificielle. Les méthodes les plus familières aux automaticiens sont les méthodes basées sur l'utilisation de modèles mathématiques. Celles-ci utilisent la redondance existant entre les différentes variables mesurées en termes de relations statiques ou dynamiques.

Dans l'étude qui suit, il sera question de présenter les différentes méthodes de détection et d'isolation des défauts. L'intérêt portera surtout sur les méthodes à base de modèle mathématique [1].

#### II.3.1 Méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique :

Les méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique reposent sur la connaissance approfondie du procédé sous la forme d'un modèle numérique représentatif, qui fournit des grandeurs caractéristiques du procédé. Ces dernières sont constamment comparées aux grandeurs

issues du procédé réel. Le problème FDI à base de modèle mathématique a attiré l'attention de nombreux chercheurs, tels que Willskey, Isermann, Frank, Patton ...etc. Les méthodes proposées, dans ce contexte, peuvent être regroupées en trois catégories:

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

Bien que ces approches soient différentes, leur but est le même; il consiste à générer un vecteur caractéristique : le résidu, qui est sensiblement nul en absence de défauts et non nul en leur présence. Ainsi, le problème de diagnostic des défauts par ces méthodes peut se reformuler sous la forme d'un problème de génération de résidus. Ces derniers devant justifier de certaines propriétés. C'est ce que l'on retrouve dans la littérature sous le nom du Problème Fondamental de Génération de Résidus : "FPRG", (Fondamental Problème of Résiduel Génération) [1].

### **II.3.1.1 Méthodes des équations de parité :**

Initialement, les méthodes des équations de parité utilisaient des schémas dits de redondance parallèle. Pour ces structures, le nombre de mesures est plus grand que le nombre de variables et les résidus sont directement issus de la comparaison de mesures redondantes.

Cette approche a été ensuite généralisée pour l'utilisation de la redondance temporelle. Par dualité, cette redondance est également appelée redondance série.

Le terme parité a été emprunté au vocabulaire employé par les systèmes logiques où la génération des bits de parité permet la détection des erreurs.

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

### **II.3.1.2 Méthodes d'estimation paramétrique :**

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

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

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

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

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de paramètres, dont il est possible de citer : l'estimation par projection orthogonale, l'estimation Bayésienne, l'estimation au sens du maximum de vraisemblance ou encore l'estimation au sens des moindres carrés [1].

### **II.3.1.3 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs :**

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

De très nombreux travaux ont été développés concernant la synthèse d'observateurs pour le diagnostic des systèmes physiques. Les travaux de Clark vers la fin des années 70, constituent les premiers pas dans ce domaine.

D'autres études ont été effectuées par la suite par Basseville, Frank, Al, Massoumnia, Patton, Ding...etc [1].

### **II.3.2 Méthodes de diagnostic basées sur les signaux :**

L'observation directe des grandeurs mesurées en ligne est intuitivement la première solution qu'il est possible de mettre en œuvre lorsque l'on cherche à évaluer l'état d'un procédé. Les débuts de l'utilisation des signaux pour le diagnostic remontent donc aux débuts de l'application de capteurs sur des procédés.

#### **II.3.2.1 Redondance matérielle :**

La redondance matérielle est une méthode généralement employée dans des installations critiques tels qu'en aérospatiale et en nucléaire. L'utilisation de plusieurs capteurs en vue d'obtenir la même information sur une variable permet en effet d'en détecter les déviations par

rapport à un état nominal. Cependant, cette redondance est très pénalisante en ce qui concerne le poids, la puissance consommée, le volume et les couts de maintenance.

### **II.3.2.2 Comparaison à des seuils :**

Cette méthode est la plus utilisée en industrie. Elle consiste à comparer les mesures des variables et de leurs propriétés telles que les moyennes à des seuils préétablis : seuil de sécurité et seuil d'alarme.

Les seuils de sécurité permettent de détecter le petit changement dans le comportement des variables et de prendre des mesures correctives à l'avance afin d'éviter des conséquences plus dramatique. Quant aux seuil d'alarme, ils déclenchent une séquence de repli pour mettre de danger le matériel et les vies humaines. Cependant, cette méthode n'est pas assez robustes face aux bruits de mesures et aux variations des modes opératoires.

### **II.3.2.3 Capteurs spécifiques :**

Des capteurs spécifiques peuvent être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant.

Par exemple, les capteurs de fin de course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de déplacement de seuil sont largement employés dans les installations industrielles. Ils ont l'avantage d'être simples et robustes. Ils sont de plus très utiles pour des solutions de supervision basées sur des événements discrets tel que les réseaux de Pétri. Leurs limites résident dans le fait même de leur nature discrète [1].

### **II.3.3 Diagnostic à base de modèle qualitatif :**

Il est souvent difficile de développer des modèles mathématiques permettant de représenter la dynamique du système de manière exacte. D'autre part, il est plus aisé de manipuler des descriptions générales des systèmes. C'est dans ce contexte que des approches de diagnostic de défauts, basées sur des connaissances sur le système réel, ont été développées.

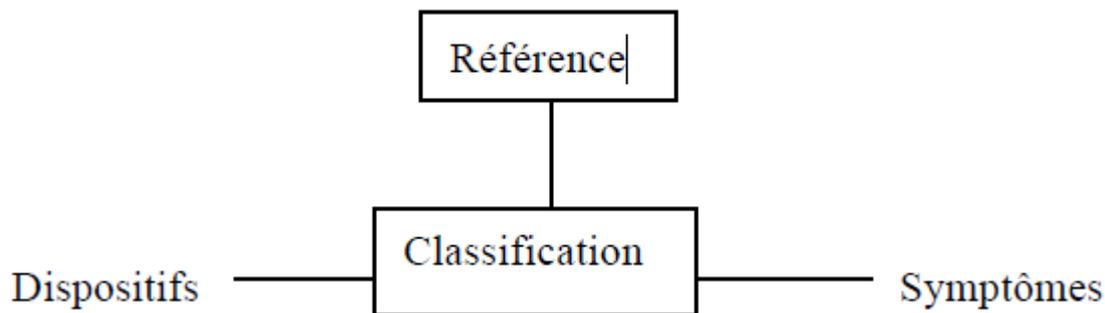
Ces méthodes sont dites qualitatives ou encore heuristiques. L'information heuristique peut être exprimée de plusieurs manières, telles que l'utilisation de termes linguistiques (petit, grand, moyen...) ou les observations de l'opérateur humain ou encore l'arbre de défaillance, qui représente les connexions entre les symptômes et les défauts.

D'autres approches de méthodes qualitatives ont été proposées telles que l'utilisation des systèmes experts et des chaînes de Markov.

### II.3.4 Méthodes de Classification :

Le rôle d'un système de diagnostic est d'identifier le défaut le plus probable qui a engendré l'apparition d'un symptôme. Ce dernier se traduit par la différence entre des dispositifs en fonctionnement et les mêmes dispositifs fonctionnant sans défaillance.

La relation entre les dispositifs et les symptômes passe par une procédure d'apprentissage expérimentale. Elle est sauvegardée de façon à avoir une base de données. Le principe des méthodes de classification est illustré sur la figure (II.4).



Figure(II.4) Le principe des méthodes de classification

Parmi les approches de classification, il est possible de citer : la classification Bayesienne, la classification géométrique, l'approche par logique floue et l'approche à base de réseaux de neurones [1].

### II.3.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle :

L'intégration des connaissances symboliques et quantitatives, en utilisant un système Euro-flou, constitue un nouvel axe de recherche dans le domaine de la détection et de la localisation des défauts. De tels systèmes combinent entre l'habileté des réseaux de neurones et la représentation explicite de la logique floue, ce qui constitue un avantage considérable pour la résolution du problème FDI, en particulier, pour les systèmes non linéaires [1].

### II.4 Modélisation du système en vue du diagnostic :

Modéliser le système en vue du diagnostic diffère de la modélisation de ce dernier pour des objectifs de commande. En effet, il est primordial de mettre en évidence les effets des défauts et des perturbations pour le diagnostic par les méthodes à base de modèle mathématique. Ceci se

justifie par la nécessité de différencier entre les défauts et surtout d'assurer l'insensibilité des résidus (dans la mesure du possible) vis-à-vis des perturbations.

Nous allons présenter les différents types de défauts rencontrés dans les systèmes de commande, la manière de les modéliser ainsi que leur comportement [1].

#### II.4.1 Types de défauts :

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

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

La figure (II.5) illustre ces différents types de défauts [1] :

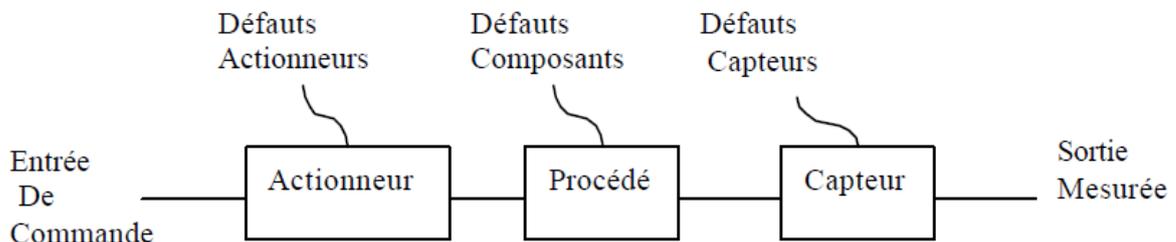


Figure (II.5) Les différents types de défauts

#### II.4.2 Modélisation des défauts :

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

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

Où  $x(t)$  représente le vecteur d'état,  $u(t)$  le vecteur de commande et  $y(t)$  le vecteur de sortie du système, tels que :

$$x \in R^n, u \in R^m \text{ et } y \in R^p$$

$A, B, C$  et  $D$  sont des matrices de dimensions respectives  $n \times n, n \times m, p \times n$  et  $p \times m$ . Alors :

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

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

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(Hf_p + f_a(t)) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où  $f_a(t)$ ,  $f_p(t)$  et  $f_c(t)$  représentent respectivement les défauts d'actionneurs, les défauts composants et les défauts des capteurs, tels que :

$$f_a(t) \in R^{m \times 1}, f_p(t) \in R^{c \times 1} \text{ et } f_c(t) \in R^{p \times 1}$$

La matrice  $H$  est dite matrice de distribution de  $f_p(t)$  [1].

### II.4.3 Modélisation des perturbations :

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

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Hf_p(t) + B(u(t) + f_a(t)) + Ed_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + f_c(t) + d_c(t) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

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

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

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

Ou

$$[B \ H \ 0_{n \times p}], E_d = [E \ 0_{n \times p}], F_f = [0_{p \times m} \ 0_{p \times c} \ I_{p \times p}], F_d = [0_{p \times d} \ I_{p \times p}]$$

$$d(t) = [d_a \ d_c]^T \in R^q \text{ et } f(t) = [f_a \ f_c \ f_p]^T \in R^s$$

Les matrices  $I_{p \times p}$  et  $0_{n \times p}$  sont respectivement la matrice identité de dimension  $p \times p$  et la matrice nulle de dimension  $n \times p$ .

Généralement, dans les problèmes de détection et de localisation des défauts à base d'observateurs, c'est cette dernière modélisation qui est prise en compte. Cependant, il faut signaler que selon le contexte, les objectifs du diagnostic, les techniques utilisées et bien d'autres critères, ce modèle peut différer de façon à s'adapter aux exigences. Par exemple, pour résoudre le problème de détection et de localisation des défauts, il est possible de décomposer le vecteur défaut en des défauts que l'on désire détecter et qui constitueront alors le vecteur  $f(t)$  et les défauts que l'on ne veut pas détecter et que l'on regroupera dans le vecteur  $d(t)$ . Pour être exploitable, au vu des objectifs de diagnostic fixés, le modèle doit traduire au mieux le comportement du système. Cependant, la précision d'un modèle est généralement obtenue au détriment de sa simplicité. Le choix entre :

- Les modèles linéaires pour lesquels de nombreuses méthodes de traitement sont connues mais possédant une plage de fonctionnement limitée.
- Les modèles non linéaires d'utilisation complexe mais possédant un domaine de validité étendu. Est difficile à effectuer [1].

#### II.4.4. Comportement des défauts :

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

- **Le biais** correspond à un saut brutal du signal défaut. C'est généralement le cas des capteurs dont un composant élémentaire est défaillant. Ce défaut affecte le système d'une manière permanente et peut occasionner de graves dégâts [1].

### II.5. Génération de résidus :

#### II.5.1. Résidus :

Normalement, la vérification de cohérence des mesures disponibles qui fait appel à la redondance analytique est réalisée en comparant les signaux mesurés avec leurs estimations issues des modèles. La différence résultant pour un signal est appelé signal résiduel. Par

exemple :  $r_i = y_i - \hat{y}_i$ ,  $i \in K$ , ou  $r_i$  désigne le  $i^{th}$  résiduel,  $y_i$  désigne la  $i^{th}$  mesure de la sortie du système,  $\hat{y}_i$  désigne la  $i^{th}$  d'estimation de la sortie du système. Ici  $K$  est le nombre de sorties pour lesquelles on dispose de résidus.

Les résidus doivent être proches de zéro ou s'y ramener dans les cas sans faute ( $r_i \approx 0$ ) et ils doivent être très différents de zéro après l'apparition d'un défaut ( $|r_i| > s_i > 0$ , ou  $s_i \in R^*$  désigne le seuil). Par conséquent, les résidus doivent être caractéristiques des fautes.

Selon le nombre de résidus et leur nature, il pourra être possible de détecter et d'isoler les défauts qui se produisent. La plupart des méthodes de FDI à base de modèles présentent deux étapes séquentielles afin de réaliser la fonction FDI: la Génération de résidus, puis l'Evaluation des résidus [2].

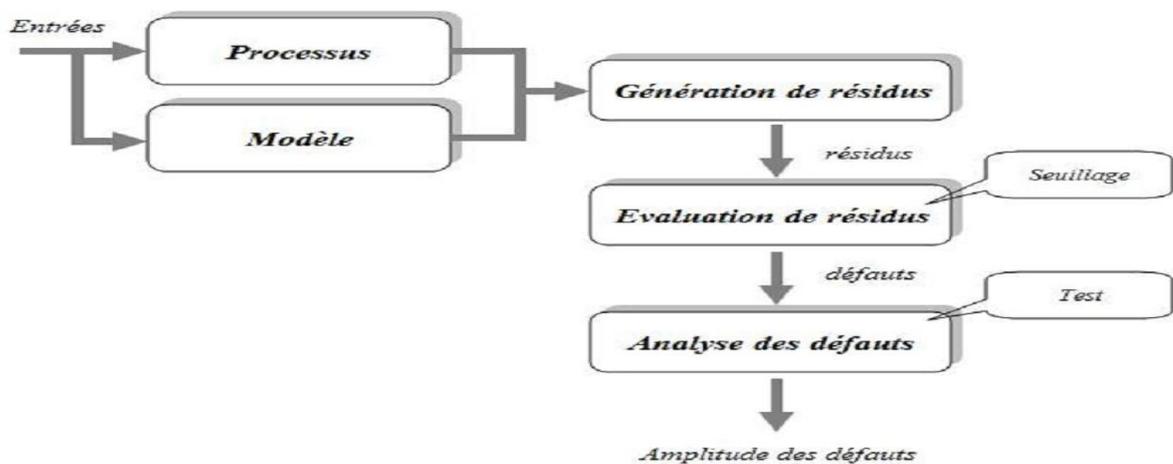


Figure (II.6) Génération de résidus

### II.5.2 Génération de résidus :

La génération de résidus pour la FDI à base de modèles s'appuie sur l'exploitation des redondances analytiques disponibles. Dans la plupart des approches de redondance analytique, le fonctionnement du système est représenté par un ensemble d'équations différentielles. L'objectif est de générer des résidus structurés pour appliquer le FDI. Une façon courante de générer des résidus est d'estimer le vecteur de sortie  $y$  du système ou un Vecteur  $\theta$  de paramètres du système. Les estimations de  $\hat{y}$  et  $\hat{\theta}$  sont comparées aux valeurs mesurées ( $y$ ) ou aux valeurs nominales ( $\theta_{nom}$ ). Ceci conduit aux résidus suivants :

$$r_y = y - \hat{y} \quad \text{et} \quad r_\theta = \theta_{nom} - \hat{\theta}$$

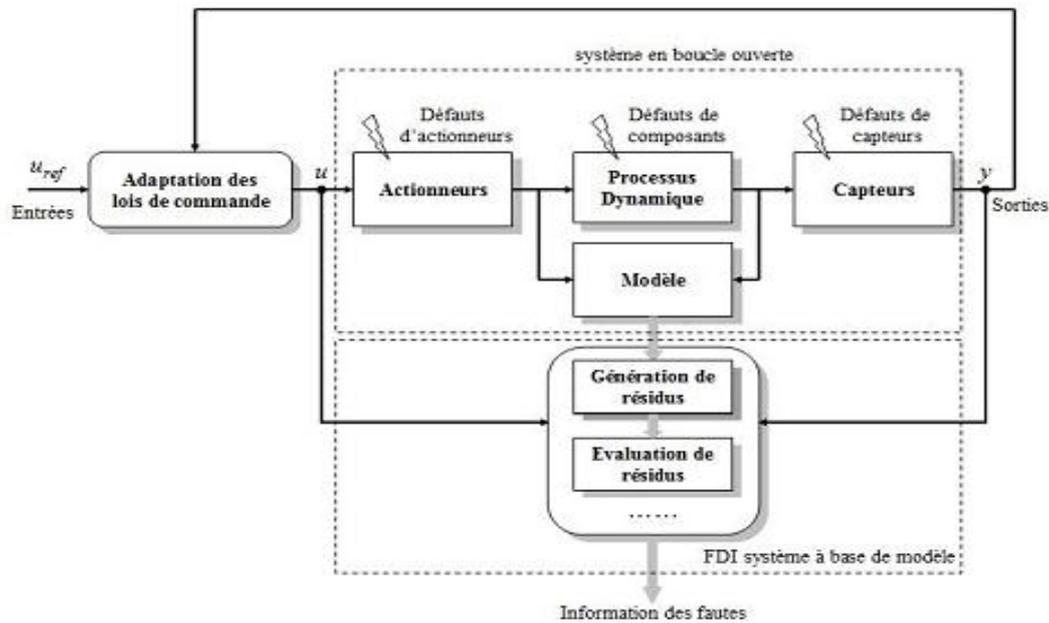


Figure (II.7) génération de résidus à base de modèle

L'idée principale de la génération de résidus à base de modèle est présentée sur la Figure (II.7)

Qui montre le processus observé et ses différentes parties :

- L'adaptation des lois de commande assure la performance requise de l'installation basée sur la valeur de référence du signal d'entrée  $u_{ref}$ .
- Les trois parties compte tenu du processus lui-même: actionneurs, processus dynamique et capteurs.
- FDI système à base de modèle.

Il est considéré ici que les pannes affectent aussi bien les actionneurs, que le processus dynamique ou que les capteurs. Le FDI système dispose de deux entrées principales: les entrées de commande  $u$  du système et la sortie mesurée  $y$  du système. L'approche FDI s'applique d'abord au système en boucle ouverte.

La tâche principale de la fonction FDI est de choisir un résidu structuré permettant de détecter et d'isoler les pannes jugées significatives pour la sécurité ou l'économie du système.

La première étape dans la mise en œuvre d'un système de surveillance à base de modèles consiste à générer des indicateurs de défauts. Ils contiennent des informations sur les anomalies ou dysfonctionnements du système à surveiller. Le principe est de mesurer les écarts entre les mesures des signaux du procédé, capteurs ou actionneurs, et la valeur théorique fournie par le modèle dans des conditions de fonctionnement nominal. La qualité de la génération de résidus

est un élément essentiel pour garantir les performances d'un système de diagnostic. En effet, de la structure (composition et précision) du système de résidus engendré dépendra la robustesse de la détection et de la localisation.

Frank [FRANK 98] a distingué trois approches pour la génération de résidus:

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

Evaluation des résidus :

Cette évaluation consiste à vérifier leur aptitude à contribuer à la réponse à des questions telles que : Est-ce que des pannes sont présentes ? et Si oui, quelles sont les pannes qui sont présentes ? La deuxième question conduit à distinguer les pannes uniques et les pannes multiples. Dans le cas de pannes multiples il est difficile de mener à bien le diagnostic car souvent les pannes multiples ont soit des conséquences partiellement identiques, soit au contraire se compensent les unes les autres. Pour cette raison, il est important de définir une structure efficace de résidus. Les résidus doivent être générés de telle sorte que pour chaque faute un ensemble différent de résidus est affecté. Pour des fautes multiples, il doit être garanti que la superposition des effets de la faute qui en résulte ne conduit pas à une mauvaise décision [2].

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de diagnostic connues de la communauté de diagnostic car originales. L'objectif des travaux récents est de développer des techniques de diagnostic robustes aux incertitudes et aux erreurs de modélisation.

Certaines méthodes sont basées sur la prise en considération des incertitudes par des seuils (méthodes passives) et d'autres sont basées sur le découplage des perturbations (méthodes actives).

Le problème général des méthodes passives est la surestimation des seuils qui engendre des non-détections de certains défauts dont l'effet sur les résidus est faible. En outre, le problème de découplage des perturbations peut engendrer le découplage de certains défauts. Quand aux méthodes de filtrage, elles sont aussi très utilisées ces dernières années pour le diagnostic robuste en essayant de minimiser les effets des incertitudes sur les résidus et en même temps maximiser les effets des défauts sur ceux-ci.

# **Chapitre III**

**Diagnostic à base des observateurs**

### III.1 Introduction :

En pratique, les systèmes physiques sont non linéaires, ainsi le problème de détection et de localisation des défauts par les méthodes à base d'observateurs est relativement complexe.

Deux approches peuvent être distinguées. La première consiste à appliquer les méthodes développées pour le cas linéaire après linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement. Cependant, ceci peut engendrer de fausses alarmes et des détections erronées dues aux erreurs de linéarisation. La deuxième approche consiste à utiliser des observateurs non linéaires.

Néanmoins, ceci nécessite une connaissance exacte des paramètres et de la structure du modèle. Ainsi, de par la diversité du caractère non linéaire des processus, il n'est pas évident de déterminer un générateur de résidus général applicable pour tout système.

Actuellement, il est possible de surmonter ces contraintes à l'aide d'observateurs robustes, Tels que les observateurs par modes glissants.

Dans ce chapitre, il sera question, dans un premier temps, de présenter quelques observateurs dédiés au diagnostic des défauts des systèmes non linéaires. Un intérêt particulier sera consacré aux observateurs par modes glissants. Ces derniers sont dotés de propriétés de robustesse particulièrement intéressantes pour la résolution du problème FPRG.

D'autre part, nous proposerons une méthode de génération de résidus robustes: il s'agit d'un observateur de défauts, associé à un observateur d'état par modes glissants [1].

### III.2 Observateurs dédiés au diagnostic des défauts des systèmes non linéaires :

#### III.2.1 Observateurs non linéaires :

##### ➤ Structure de l'observateur

Soit le système non linéaire défini par les équations suivantes:

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

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

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

Où  $g$  est une fonction analytique définie de  $R^p \rightarrow R^n$ . Elle est déterminée de manière à assurer la convergence asymptotique de l'erreur d'estimation des états  $e = x - \hat{x}$  (III.3)

La dynamique de cette erreur est donnée par :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = f(x, u) - f(\hat{x}, u) - g(y) + g(\hat{y}) \quad (\text{III.4})$$

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

$$f(x, u) = f(\hat{x} + e, u) = f(\hat{x}, u) + D_{\hat{x}}(f)e, \text{ tel que: } D_{\hat{x}}(f) = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x^T} \right|_{x=\hat{x}} \quad (\text{III.5})$$

$$g(y) = g(\hat{y}) + D_{\hat{y}}(g)Ce, \text{ avec } D_{\hat{y}}(g) = \left. \frac{\partial g(y)}{\partial y^T} \right|_{y=\hat{y}} \quad (\text{III.6})$$

Ainsi, l'équation (III.3) devient:

$$\dot{e} = (D_{\hat{x}}(f) - D_{\hat{y}}(g)c)e \quad (\text{III.7})$$

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

$$g(y) = R(\hat{x}, u)y \quad (\text{III.8})$$

$$R(\hat{x}, y) = P^{-1}F(\hat{x}, u)C^TQ \quad (\text{III.9})$$

$P$  est une matrice définie positive, telle que  $V(e) = \frac{1}{2}e^T P e$  définit une fonction de Lyapunov.  $F(\hat{x}, u)$  et  $Q$  sont des matrices carrées de dimensions respectives  $n \times n$  et  $p \times p$  vérifiant les conditions suivantes :

$$\|PD_{\hat{x}}(f)\| < \|F(\hat{x}, u)\| \text{ et } \|F(\hat{x}, u)\| < \|C^TQC - I\| \text{ est semi définie positive}$$

Où le symbole désigne la norme euclidienne.

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

$$F(\hat{x}, u) = \text{diag}(\phi_i(\hat{x}, u)), \text{ avec } \phi_i(\hat{x}, u) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n |\alpha_{ij}(\hat{x}, u) + \alpha_{ji}(\hat{x}, u)| \quad (\text{III.10})$$

Le symbole « *diag* » définit une matrice diagonale, dont les éléments diagonaux sont  $\phi_i$ ,

$(\hat{x}, u)$  et les  $\alpha_{ij}$  sont les éléments de  $PD_{\hat{x}}(f)$  L'observateur non linéaire, ainsi obtenu, est défini par l'équation suivante :

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + P^{-1}F(\hat{x}, u)C^TQ(y - C\hat{x}) \quad (\text{III.11})$$

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

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

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

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) + F_a \\ y = Cx + F_c \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Où  $F_a \in R^n$  est un vecteur représentant les défauts paramétriques et/ou actionneurs.

Le vecteur  $F_c \in R^p$  modélise les défauts du type capteur. La dynamique de l'erreur d'estimation est alors donnée par :

$$\dot{e} = [D_{\hat{x}} - R(\hat{x}, u)C]e - R(\hat{x}, u)F_c + F_a \quad (\text{III.13})$$

Le résidu, dans ce cas, peut être défini par l'erreur d'estimation de la sortie, puisqu'en absence de défauts, cette dernière est nulle, alors qu'en leur présence, elle diffère de zéro [1].

### III.2.2 Observateurs à entrées inconnues avec découplage non linéaire :

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

$$\dot{x} = A(x, u) + E_d(x)d(t) + E_f(x)f(t) \quad (\text{III.14})$$

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

➤ **Génération de l'état découplé :**

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

$$\dot{z} = \frac{\delta T(x)}{\delta x} \left( A(x, u) + E_d(t)d(t) + E_f(x)f(t) \right) \quad (\text{III.15})$$

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

$$\frac{\delta T(x)}{\delta x} E_d(x) = 0 \quad (\text{III.16})$$

Sous certaines conditions, il existe  $n - q$  solutions indépendantes du système (III.16), tel que  $T(x)$  soit un difféomorphisme et  $\text{rang}(E(x)) = q, \forall x \in R^n$ . Afin d'obtenir un modèle représentatif du procédé, il est nécessaire d'augmenter l'état découplé  $z$  par les sorties  $y^*$  vérifiant la relation:

$$x = \Psi_0(z, y^*) \quad (\text{III.17})$$

Où  $y^* = \Phi^*(y)$  représente une transformation linéaire ou non du vecteur de sortie.

Les conditions d'existence de  $\Psi_0(z, y^*)$  sont rappelées dans [HEN99]. Ainsi, le modèle d'état du Système peut être réécrit, en considérant l'état découplé  $z$ , comme suit :

$$\begin{cases} \dot{z} = \frac{\partial T(x)}{\partial x} (A(x, u) + E_f(x)f) \Big|_{x=\Psi_0(z, y^*)} \\ y = h(x) \Big|_{x=\Psi_0(z, y^*)} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

### ➤ Synthèse de l'observateur :

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

L'observateur est défini par le système d'équations :

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

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

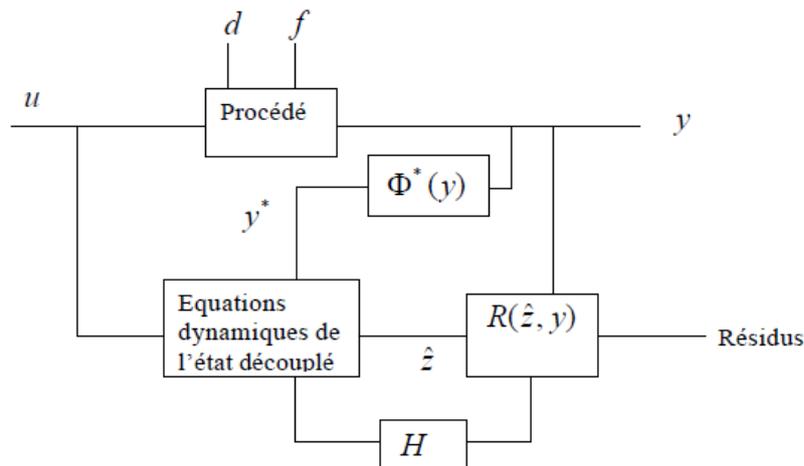


Figure (III.1) la structure de l'observateur

Cette approche est performante pour la détection et la localisation des défauts en présence de perturbations, dont l'effet sur le système, est connu. Néanmoins, elle nécessite des conditions particulières qui limitent son utilisation [1].

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

#### III.2.3.1 Introduction :

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

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

estimés à l'aide de la surface équivalente pendant le régime de glissement. Dans ce contexte, une autre méthode de détection et de reconstruction des défauts a été proposée par Tan et Edwards.

Dans ce paragraphe, il est question, tout d'abord, d'introduire l'idée de conception d'observateurs par modes glissants pour la détection et la localisation des défauts, pour les systèmes linéaires, à travers l'approche proposée par Edwards, Spurgeon et Patton.

Nous présenterons ensuite des observateurs par modes glissants utilisés pour le diagnostic des systèmes non linéaires. Enfin, nous proposerons une méthode de génération de résidus robustes, pour les systèmes linéaires et non linéaires, en utilisant un observateur de défauts associé à un observateur d'état par modes glissants.

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

Soit le système linéaire défini par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_f f_a(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

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

#### ➤ Synthèse de l'observateur par modes glissants :

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

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu - G_1 e_y + G_2 \quad (\text{III.21})$$

Où  $G_1$  et  $G_2$  représentent les gains de l'observateur de dimension  $p \times n$ .  $S$  est une fonction discontinue et  $e_y = Cx - y$ . Supposons, dans un premier temps, le cas où seuls des défauts actionneurs agissent sur le système et que ces derniers vérifient :

$$\|f_a(t)\| \leq \rho(t, y, u) \quad (\text{III.22})$$

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

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

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

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

Tel que :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \\ \dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + E_{f2}f_a \\ y = x_2 \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

$A_{11} \in R^{(n-p)(n-p)}$  est une matrice stable,  $E_{f2} \in R^{q \times q}$  est non singulière. Une méthode de synthèse de l'observateur (III.23) a été proposée dans [EDW00]. Ce dernier se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u - A_{12}e_y \\ \dot{\hat{x}}_2 = A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u - (A_{22} - A_{22}^s)e_y + s \\ \hat{y} = \hat{x}_2 \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Où la matrice  $A_{22}^s$  est une matrice stable, et  $e_y = x_2 - \hat{x}_2$  est l'erreur d'estimation de la sortie.

La fonction discontinue  $S$  est proposée sous la forme suivante :

$$S = \begin{cases} -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\|} & \text{si } e_y \neq 0 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

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

$$P_0 A_{22}^s + (A_{22}^s)^T P_0 = -I \quad (\text{III.26})$$

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

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{11}e_1 \\ \dot{e}_y = A_{21}e_1 + A_{22}^s e_y + S - E_{f2}f_a \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

Le système (III.27) est stable. Un régime de glissement s'instaure en forçant( $e_y$ ) à zéro.

Les gains de l'observateur (III.27) sont donc donnés par:

$$G_1 = T^{-1} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} - A_{22}^s \end{bmatrix} \text{ et } G_n = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

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

Supposons qu'un observateur, tel que défini par les équations (III.26), a été synthétisé et que le régime de glissement est établi. Durant le régime de glissement, nous avons:

$$e_y = 0 \text{ et } \dot{e}_y = 0 \quad (\text{III.29})$$

Il s'en suit que :

$$0 = A_{21}e_1 - E_{f2}f_a + S_{eq} \quad (\text{III.30})$$

Où  $S_{eq}$  est la surface équivalente qui représente l'effort nécessaire pour maintenir le régime de glissement. En utilisant le fait que  $A_{11}$  soit stable et donc  $\dot{e}_1(f) \rightarrow 0$  alors:

$$S_{eq} \rightarrow E_{f2}f_a \quad (\text{III.31})$$

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

$$S_\delta = -\rho(t, y, u) \|E_{f2}\| \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\| + \delta} \quad (\text{III.32})$$

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

$$f_a(t) \approx -\rho(t; y; u) \|E_{f2}\| (E_{f2}^T E_{f2})^{-1} E_{f2}^T \frac{P_0 e_y}{\|P_0 e_y\| + \delta} \quad (\text{III.33})$$

➤ **Reconstruction des défauts capteurs :**

Supposons, à présent, que le système (III.33) soit soumis à des défauts capteurs seulement:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + f_c(t) \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

Où  $f_a(t) \in R^P$  représente le vecteur des défauts capteurs. Dans ce cas :  $y_c e = e - f_2$  et la dynamique de l'erreur d'estimation devient alors:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = A_{11}e_1 + A_{12}f_c \\ \dot{e}_y = A_{21}e_1 + A_{22}^s e_y - \dot{f}_c + A_{22}f_c + S \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

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

$$0 = A_{21}e_1 - \dot{f}_c + A_{22}f_c + S_{eq} \quad (\text{III.36})$$

En supposant que le défaut est lentement variable, alors,  $S_{eq} \approx -(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})f_c$ . De la même manière que précédemment, il est possible de calculer la surface équivalente à partir de l'expression (III.35) et par conséquent, si  $(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})f_c$  est non singulière, le défaut capteur peut être reconstruit à l'aide de l'équation (III.36).

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

$$\dot{z}_f = -A_f z_f + A_f S_{eq} \quad (\text{III.37})$$

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

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{z}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ -A_f A_{21} & -A_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ -A_f A_{22} \end{bmatrix} f_c \quad (\text{III.38})$$

En écrivant  $Z_f$  sous la forme  $z_f = [0 \quad I_p] \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix}$  Alors nous aboutissons au système défini par:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{z}_f \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} + F_0 f_c \\ z_f = C_0 \begin{bmatrix} e_1 \\ z_f \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

$$\text{ou } A_0 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_f A_{21} & A_f \end{bmatrix}, F_0 = \begin{bmatrix} A_{12} \\ -A_f A_{22} \end{bmatrix}, C_0 = [0 \quad I_p] \quad (\text{III.40})$$

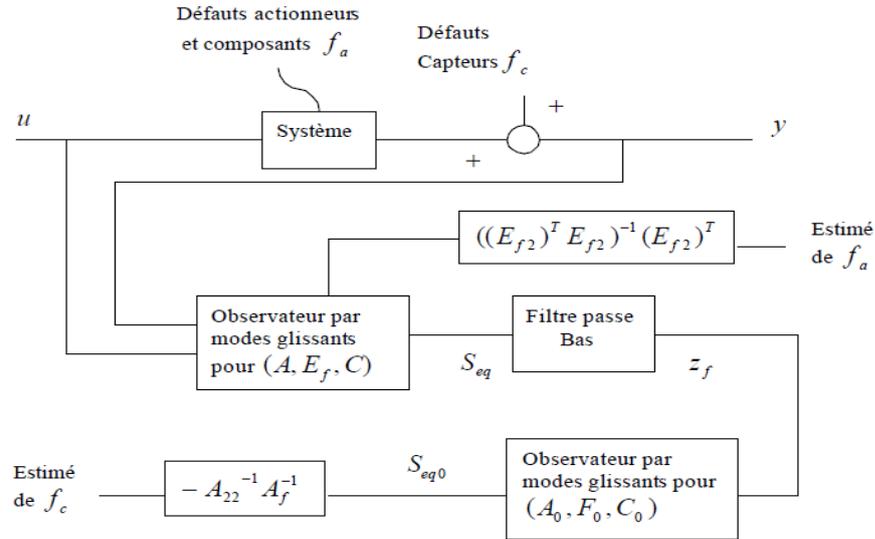
Ainsi, le système obtenu ressemble au système (III.21). Il est donc possible de synthétiser un observateur par modes glissants comme précédemment.

Cette méthode est dite méthode du « second observateur ». La condition nécessaire pour l'existence de cet observateur est que la matrice  $(A_{11} - A_{12}(A_{22})^{-1}A_{21})$  soit stable et  $A_{22}$  inversible. L'estimé de  $f_c$  est donné Par :

$$\hat{f}_c = -A_{22}^{-1}A_f^{-1}S_{eq0} \quad (\text{III.41})$$

Où  $S_{eq0}$  représente la surface équivalente du second observateur.

La structure générale de la détection de défauts par cette méthode est représentée sur la figure suivante :



Figure(III.2) La structure générale de la détection de défauts

### III.2.3.3 Observateurs par modes glissants de Walkat-Zak pour les systèmes non linéaires :

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

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + f(x, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (III.42)$$

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

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + f(\hat{x}, u) + L(y - C\hat{x}) + s(\hat{x}, y) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (III.43)$$

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

$$S = \begin{cases} \frac{p^{-1}C^T C_e}{\|C_e\|} & \|C_e\| > \varepsilon \\ \frac{p^{-1}C^T C_e}{\varepsilon} & \|C_e\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (III.44)$$

$e = x - \hat{x}$  représente l'erreur d'estimation des états et  $\varepsilon$  est la borne supérieure des incertitudes.

$P$  est une matrice définie positive, elle est solution de l'équation de Riccati suivante :

$$(A - LC)^T P + P(A - LC) + \lambda_f PP + I = -Q \quad (\text{III.45})$$

$Q$  est une matrice définie positive,  $\lambda_f$  représente la constante de Lipchitz de  $f$ , telle que :

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq \lambda_f \|x_1 - x_2\| \quad \forall x_1, x_2 \in X \quad (\text{III.46})$$

Différentes approches ont été proposées pour l'application de cet observateur pour des fins de diagnostic [1].

### III.2.3.4 Observateurs par modes glissants étape par étape :

Soit le système défini par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x) + g(x)u + E_d(x)d + E_f(x)f \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

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

#### ➤ Conception de l'observateur de perturbations :

En ce qui concerne les concepts géométrie différentielle, il est possible de se référer à l'annexe (A). Sous certaines conditions et en appliquant le théorème de Frobenius, il est possible de décomposer le système précédent en deux sous systèmes :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \tilde{A}_1(z) + \tilde{g}_1(z)U + \tilde{E}_{d1}(z)d + \tilde{E}_{f1}(z)f \\ y_1 = \tilde{h}_1(z) = [h_1(x) \dots \dots h_{n-k}(x)]^T \end{cases} \quad (\text{III.48})$$

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = \tilde{A}_2(z_2) + \tilde{g}_2(z_2)U + \tilde{E}_{d2}(z_2)d \\ y_2 = \tilde{h}_2(z_2) = [\tilde{h}_{21}(x) \dots \dots \tilde{h}_{2k}(x)]^T \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

$$\text{ou: } z_1 = [z_{11} \dots \dots z_{1d}]^T, z_2 = [z_{2(d+1)} \dots \dots z_{2n}]^T$$

Le deuxième sous système est sensible à l'entrée inconnue et insensible au défaut, il va permettre d'estimer la perturbation. Pour cela, il a été proposé dans [FLO04] l'utilisation des observateurs par modes glissants afin d'exploiter leur propriété, assurant une estimation en un temps fini, plus particulièrement, l'observateur triangulaire. Un changement de variable de la forme suivante est effectué :

$$\xi = \theta(z_2) = [\tilde{h}_2(z_2) \dots \dots L_{\tilde{A}_2}^{n-d-1} h_2(z_2)] \quad (\text{III.50})$$

Sous certaines conditions, le sous système (III.51) devient :

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \bar{A}_2(\xi) + \bar{F}_2(\xi) + \bar{g}_2(\xi)u + \bar{E}_{d2}(\xi)d \\ y_2 = \xi_1 \end{cases} \quad (\text{III.51})$$

$$\bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{E}_{d2}(\xi) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ E_{d2}(\xi) \end{bmatrix} \quad E_{d2}(\xi) = dL_{\bar{A}_2}^{n-d}\tilde{h}_2(z_2)\tilde{E}_{d2} \quad (\text{III.52})$$

$$\bar{F}_2(\xi) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \tilde{f}_2(\xi) \end{bmatrix} \quad \tilde{f}_2(\xi) = L_{\bar{A}_2}^{n-d}\tilde{h}_2(z_2) \text{ et } \tilde{g}_2(\xi) = \begin{bmatrix} g_{2,1}(\xi_1) \\ g_{2,2}(\xi_1, \xi_2) \\ \vdots \\ g_{2,(n-d-1)}(\xi_1, \dots, \xi_{n-d-1}) \\ g_{2,(n-d)}(\xi) \end{bmatrix} \quad (\text{III.53})$$

$$\bar{g}_{2,j}(\xi_1, \dots, \xi_j) = L_{g_2}L_{f_2}^{j-1}\tilde{h}_2 \quad j = 1, \dots, n-d \quad (\text{III.54})$$

Soit l'observateur, par modes glissants, étape à étape, permettant l'estimation de l'état donné par les équations :

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 + \bar{g}_{2,1}(\xi_1)u + \lambda_1 \text{sign}_1(\xi_1 - \hat{\xi}_1) \\ \dot{\xi}_2 = \xi_3 + \bar{g}_{2,2}(\xi_1, \xi_2)u + \lambda_2 \text{sign}_2(\xi_2 - \hat{\xi}_2) \\ \vdots \\ \dot{\xi}_{n-d-1} = \xi_{n-d} + \bar{g}_{2,n-d}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n-d-1})u + \lambda_{n-d-1} \text{sign}_{n-d-1}(\xi_{n-d-1} - \hat{\xi}_{n-d-1}) \\ \dot{\xi}_{n-d} = \tilde{f}_2(\xi_1, \dots, \xi_{n-d}) + \bar{g}_{2,n-d}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n-d})u + \lambda_{n-d} \text{sign}_{n-d}(\xi_{n-d} - \hat{\xi}_{n-d}) \\ \hat{\xi}_2 = \hat{\xi}_1 \end{cases} \quad (\text{III.55})$$

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

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

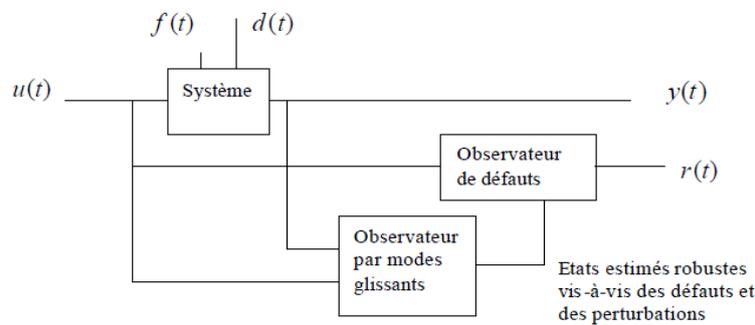
La valeur de  $\lambda_{n-b} \text{sign}(e_{n-b})_{eq}$  peut être obtenue par un filtre passe bas, ou par certaines approximations continues de la fonction signe, telle que celle donnée par l'équation (III.34).

► **Détection des défauts** : Sachant une estimation de l'entrée inconnue  $d$  et en se rapportant au premier sous système, donné par les équations (III.52), il est possible désormais de détecter la présence du défaut  $f$ , par les méthodes FDI connues [1].

### III.2.3.5 Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes :

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

La figure suivante illustre le principe de cette méthode :



Figure(III.3) Observateurs de défauts associés aux observateurs robustes

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

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

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

### III.3.1. Estimation Paramétrique et génération de résidus :

Ces méthodes ont pour principe d'estimer la valeur de certains paramètres du modèle et d'en détecter les écarts par rapport à des valeurs nominales. On entend par *paramètre* certaines constantes physiques du système (masse, coefficient de viscosité,...) ou une agrégation de plusieurs paramètres physiques. Dans ce deuxième cas, une correspondance unique doit exister entre les paramètres du modèle et les paramètres du système.

Les premières mises en œuvre de cette approche sont l'œuvre d'Isermann [Isermann, 1991]

[Iserman, 1993] qui a défini cinq étapes dans la détection des défaillances [Isermann, 1984] :

- modélisation mathématique du système selon des équations du type :

$$\underline{y}(t) = f(\underline{u}(t), \underline{\theta}) \quad (\text{III.58})$$

Dans lesquelles  $u(t)$  représente les commandes du système et  $\theta$  les paramètres du modèle.

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

$$\underline{\theta} = g(\underline{p}) \quad (\text{III.59})$$

Estimation  $\hat{\theta}$  des paramètres du modèle des mesures des entrées et des sorties du système

$$: \quad \hat{\underline{\theta}} = h(\underline{y}(1), \dots, \underline{y}(t), \underline{u}(1), \dots, \underline{u}(t)) \quad (\text{III.60})$$

- estimation  $\hat{p}$  des paramètres du système par inversion exacte ou approchée (moindres carrés, pseudo inverse) :

$$\hat{\underline{p}} = g^{-1}(\hat{\underline{\theta}}(t)) \quad (\text{III.61})$$

Le vecteur des résidus est obtenu en faisant la différence entre les paramètres estimés et les valeurs nominales, soit à partir des paramètres physiques, soit à partir des paramètres du modèle :

$$\underline{r}(t) = \underline{\theta}^0 - \hat{\underline{\theta}}(t) \quad (\text{III.62})$$

$$\underline{r}(t) = \underline{p}^0 - \hat{\underline{p}}(t) \quad (\text{III.63})$$

Où  $\underline{\theta}^0$  et  $\underline{p}^0$  et  $p_0$  sont des valeurs nominales.

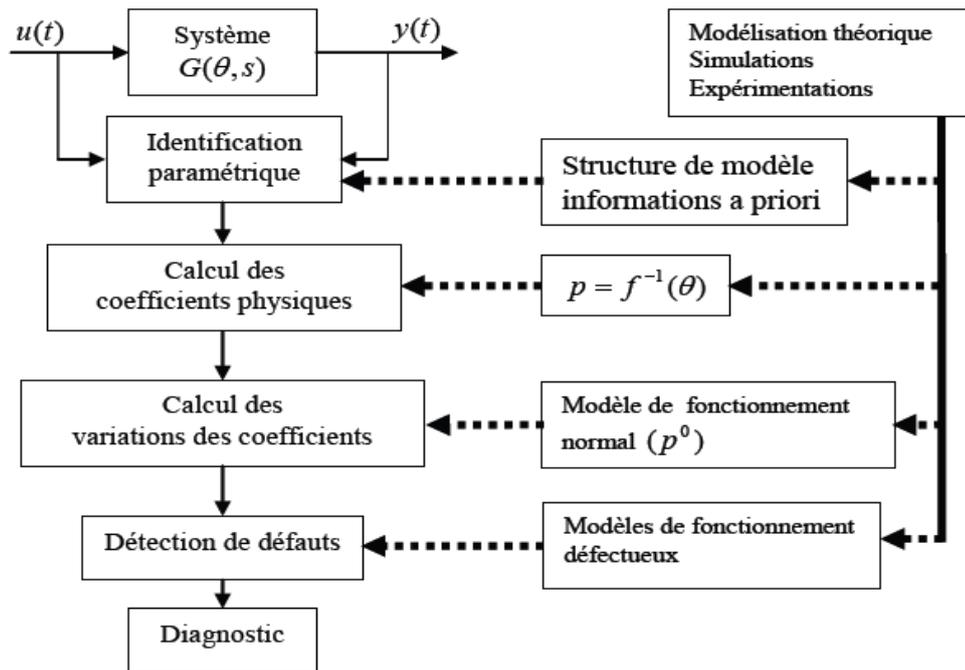
Lorsque les valeurs nominales ne sont pas connues, une approche possible consiste à construire le vecteur résidu à partir des différences entre les estimations des paramètres à des instants successifs. On aura par exemple :

$$\underline{r}(t) = \hat{\underline{\theta}}(t) - \hat{\underline{\theta}}(t - k) \quad (\text{III.64})$$

Ou

$$\underline{r}(t) = \hat{\underline{p}}(t) - \hat{\underline{p}}(t - k) \quad (\text{III.65})$$

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

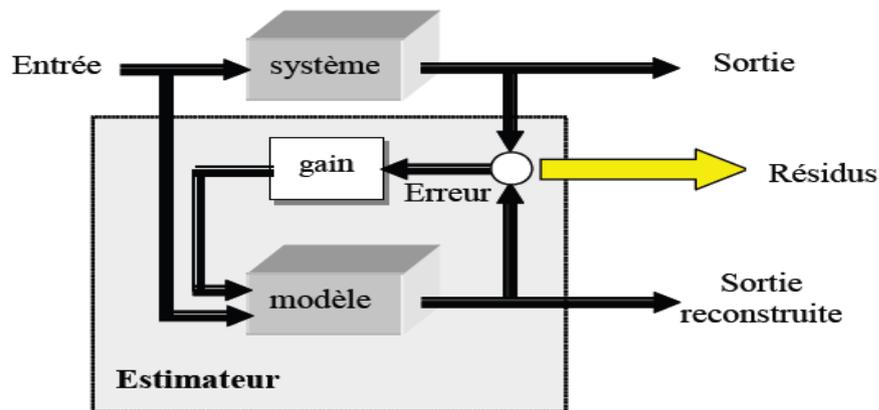


Figure(III.4) Estimation Paramétrique et génération de résidus

On dispose de nombreuses méthodes d'estimation des valeurs de paramètres : estimation par projection orthogonale, par estimation Bayésienne, estimation au sens du maximum de vraisemblance et estimation au sens des moindres carrés par exemple [3].

### III.3.2. Estimation d'état et génération de résidus :

Les méthodes basées sur l'estimation d'état ont pour principe de reconstruire l'état du système à partir des mesures de ses entrées et de ses sorties. Ce sont des méthodes de génération de résidus indirectes en ce sens qu'elles calculent l'erreur d'estimation de la sortie. L'estimation de l'état peut être effectuée à l'aide d'observateurs, dans le cas déterministe ou de filtres dans le cas stochastique (filtre de Kalman [Willsky, 1976] ou de filtres détecteurs de défauts [Massoumnia, 1986]). Les deux méthodes présentent des analogies dans leur formulation et peuvent être synthétisées par la figure (III.4), la différence provenant du mode de calcul des paramètres de l'estimateur en fonction du contexte retenu (cas continu ou discret, déterministe ou stochastique).



Figure(III.5) Estimation d'état et désertion de résidus

La théorie des observateurs est utilisée pour des systèmes linéaires ou non linéaires [Garcia, 1997] d'ordre plein s'ils estiment l'intégralité du vecteur d'état (le système doit être complètement observable), d'ordre réduit dans le cas contraire, dans le domaine fréquentiel (observateurs généralisés) ou temporel (observateurs de Luenberger). Frank et Wünnenberg ont défini une classe d'observateurs dit observateurs à entrées inconnues tels que les sorties du système sont indépendantes des incertitudes structurées auxquelles il est soumis [Frank, 1989].

Les travaux de Ding [Ding, 1994] ont permis de proposer une approche unifiée de ces méthodes à base d'observateurs.

Les différentes méthodes de génération basées sur les observateurs conduisent à la génération de deux types de résidus: les résidus structurés et les résidus directionnels. Pour le premier type de résidus, la propagation d'un défaut affecte seulement une partie des composantes du vecteur de résidus tandis que pour le second type de résidus, la présence d'un défaut entraîne l'ensemble du vecteur résidu dans une direction préfixée.

Les méthodes à base d'observateurs présentent des analogies de formulation. Il en est de même pour les méthodes de génération de résidus. Les travaux de Frank et Wünnenberg ont permis de montrer que la génération de résidus par l'approche d'espace de parité correspond en fait à la mise en œuvre d'une certaine classe d'observateurs.

De même, il existe des relations de dualité entre les méthodes de calcul des résidus par l'approche basée sur les espaces de parité et par les méthodes à base d'estimation paramétrique. Staroswiecki et al. ont démontré que, sous certaines hypothèses, les résidus obtenus par une approche d'estimation paramétrique peuvent être vus comme une transformation non linéaire des résidus dans l'espace de parité.

Le choix de la méthode de génération de résidus va dépendre du type de modèle disponible pour représenter le processus mais aussi du type de défauts que l'on veut détecter (défauts additifs ou multiplicatifs, défauts multiples ou non). Isermann a présenté une analyse comparative des avantages et des conditions d'application des différentes méthodes citées ici [3].

### III.3.Espace de parité :

Une relation de redondance analytique est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. La génération de ces relations permet de déterminer des résidus statistiquement nuls en l'absence de défauts et évoluent lorsqu'un défaut apparaît.

L'espace de parité est l'approche la plus classique pour générer ces relations. Ces relations de parité utilisent :

- la redondance directe au moyen de relations algébriques statiques liant les différents signaux.

Ou

- la redondance temporelle issue de l'utilisation de relations.

#### III.3.1.Espace de parité statique :

La redondance matérielle est un moyen efficace pour éprouver le fonctionnement des appareils de mesure. Le nombre de mesures est en général supérieur au nombre de variables à mesurer. Cette redondance permet de détecter les défauts de capteurs.

- Exemple :

Si on considère l'exemple suivant :

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} x(k) \quad (\text{III.66})$$

5 mesures  $y_i$  couplées de 3 grandeurs  $x_i$  permettent de générer des relations de redondance :

$$\begin{aligned} -y_1(k) + 2y_3(k) - y_4(k) &= 0 \\ -2y_1(k) + 4y_3(k) - y_5(k) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.67})$$

Ces équations sont vérifiées en l'absence de défauts.

- **Remarque** : la forme des équations de redondance n'est pas unique. D'autres équations de redondance (ne faisant pas apparaître les mêmes variables) peuvent être écrites par combinaison linéaire des équations précédentes. Ceci permet de structurer les résidus et de faciliter l'isolation des défauts.

Dans les équations précédentes, si on élimine  $y_1(k)$ , on obtient :

$$-y_5(k) + 2y_4(k) = 0 \quad (\text{III.68})$$

Nous remarquons que l'élimination de  $y_1(k)$  entraîne l'élimination de  $y_3(k)$ . Il est donc impossible de différencier les défauts sur ces deux mesures (Pb d'isolation).

Par ailleurs, un défaut sur  $y_2(k)$  ne sera pas détectable car cette mesure n'intervient dans aucune des équations de redondance.

- **Cas général** :  $y(k) = Cx(k) + \varepsilon(k) + Ff(k)$  (III.69)

$y$  est le vecteur de mesures de dimension  $(m, 1)$

$x$  est le vecteur des variables à mesurer de dimension  $(n, 1)$

$f$  est le vecteur de défauts pouvant affecter les capteurs de dimension  $(p, 1)$

$\varepsilon$  est le vecteur de bruits de mesures de dimension  $(m, 1)$

$C$  est la matrice qui caractérise le système de mesure de dimension  $(m, n)$

$F$  est la matrice qui illustre la direction des défauts de dimension  $(m, p)$

Pour se placer dans une situation de redondance, il est supposé ici que  $m > n$ .

Les colonnes de la matrice  $C$  définissent un sous-espace vectoriel de dimension  $n$  dans l'espace de mesures  $R^m$ . Le sous-espace vectoriel orthogonal à l'espace engendré par  $C$  est appelé espace de parité

L'objectif est d'analyser la consistance des mesures et de détecter la présence des défauts. On cherche alors à établir des relations entre les mesures qui sont indépendantes des grandeurs inconnues mais qui restent sensibles aux défauts.

Un vecteur de parité  $p(k)$  est défini comme étant une projection du vecteur des mesures  $y(k)$

$$p(k) = Wy(k) \quad \text{Permet de calculer le vecteur de parité}$$

$W$  est une matrice de projection. Son orthogonalité avec la matrice  $C$  entraîne :

$$p(k) = W\varepsilon(k) + Wf(k) \quad \text{Explique l'influence des erreurs de mesure et des défauts}$$

Dans le cas idéal, le vecteur de parité est nul. L'équation qui traduit l'ensemble des redondances liant les mesures devient :

$$W y(k) = 0 \quad (\text{III.70})$$

Si  $WF$  est une matrice régulière, l'équation  $p(k) = W\varepsilon(k) + WFf(k)$  permet de détecter les défauts  $f(k)$ .

Nécessité d'étudier avec soin le rang de la matrice  $WF$ . Une colonne nulle de cette matrice empêche la détection de certains défauts.

Dans le cas où on cherche à détecter certains défauts et ne pas s'intéresser à d'autres, on écrit l'équation des mesures sous la forme :

$$y(k) = Cx(k) + \varepsilon(k) + F^+ f^+(k) + F^- f^-(k) \quad (\text{III.71})$$

❖  $[F^+ f^+(k) : \text{Défauts auxquels on veut être sensible}]$

❖  $[F^- f^-(k) : \text{Défauts auxquels on veut être insensible}]$

On cherche alors une matrice  $W$  orthogonale à l'espace engendré par les colonnes de  $C$  et de  $F^-$

$$W(C \ F^-) = 0$$

On obtient ainsi :

$$p(k) = W\varepsilon(k) + WF^+ f^+(k) \quad (\text{III.72})$$

Ce vecteur de parité est donc sensible aux défauts à détecter, à condition d'étudier convenablement le rang de la matrice  $WF^+$

Dans le cas où l'équation  $W(C \ F^-) = 0$  n'a pas de solution, une solution approchée sera envisagée en satisfaisant au mieux la condition d'orthogonalité. Le problème peut être formulé sous forme d'optimisation multicritères :

$$\begin{cases} \min_W \|W(C \ F^-) = 0\| \\ \max_W \|WF^+\| \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \begin{cases} \min_W \|WF^-\| \\ \max_W \|WF^+\| \\ WC = 0 \end{cases} \quad (\text{III.73})$$

La résolution de ces problèmes d'optimisation multicritères n'est pas toujours aisée. Une solution peut être obtenue en reformulant le problème à l'aide d'un seul critère en accordant plus de poids à l'un ou l'autre des critères précédents.

Si l'on souhaite un découplage parfait par rapport à l'état, deux problèmes peuvent être envisagés :

Premier problème :

$$\begin{cases} \omega^T C = 0 \\ \min_{\omega} \frac{\|\omega^T F^-\|^2}{\|\omega^T F^+\|^2} \end{cases} \quad (\text{III.74})$$

Pour ce problème, il peut être montré que  $\omega$  est solution de :  $(QA - \lambda QB)\omega = 0$  (III. 75)

$$\text{Ou :} \quad A = F^-(F^-)^T \quad B = F^+(F^+)^T \quad Q = I - C(C^T C)^{-1}C^T$$

Deuxième problème :

$$\begin{cases} \omega^T C = 0 \\ \min_{\omega} (\|\omega^T F^-\|^2 - k^2 \|\omega^T F^+\|^2) \end{cases} \quad (\text{III.76})$$

Dans ce cas,  $\omega$  doit satisfaire :  $(QH - (-\lambda QB)\omega) = 0$  (III.77)

$$\text{Avec } H = A - k^2 B$$

La structure de l'équation (III.65) (respectivement (III.77)) montre que  $\omega$  est vecteur propre généralisé de la paire  $(QA, QB)$  (respectivement  $(QH, QB)$ ). Il peut également être montré que  $\lambda$  est la plus petite valeur propre associée à ce vecteur propre.

### III.3.2.Espace de parité dynamique :

#### III.3.2.1.Définition :

Espace de parité dynamique : est l'ensemble d'équation différentielle entré les sorties des captures et l'entrée du système (Redondance dynamique) [4].

#### III.3.2.2.Principe de génération d'équations de redondance :

On considère le modèle d'état discret d'un système d'ordre  $n$  :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + E_1 f(k) \\ y(k) = Cx(k) + E_2 f(k) \end{cases} \quad (\text{III.78})$$

Sur un horizon donné  $[k, k+s]$ , les équations du système peuvent être regroupées sous la forme :

$$Y(k, s) - G(s)U(k, s) = H(s)x(k) + E(s)F(k, s) \quad (\text{III. 79})$$

$$\text{Pour } Z=Y, U \text{ ou } F \quad Z(k, s) = \begin{bmatrix} z(k) \\ z(k+1) \\ \vdots \\ z(k+s) \end{bmatrix} \quad H(s) = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^s \end{bmatrix}$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ CB & 0 & \dots & 0 & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ CA^{s-1}B & CAB^{s-2}B & \dots & CB & 0 \end{bmatrix} E(s) = \begin{bmatrix} E_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ CE_1 & E_2 & \dots & 0 & 0 \\ CAE_1 & CE_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & E_2 & 0 \\ CA^{s-1}E_1 & CA^{s-2}E_1 & \dots & CE_1 & E_2 \end{bmatrix}$$

La génération des équations de redondance liant Y et U consiste à éliminer les états  $x$  dans l'équation (III. 67). Ceci revient à multiplier cette équation par une matrice de parité  $\Omega$  orthogonale à la matrice H (l'existence de  $\Omega$  dépend du rang de la matrice H) :

$$\Omega H(s) = 0$$

Le vecteur de parité est donné sous forme externe (en fonction des données connues) :

$$P(k) = \Omega (Y(k, s) - G(s)U(k, s)) \quad (\text{III.80})$$

Ou sous forme interne en fonction des défauts :

$$P(k) = \Omega E(s)F(k, s)$$

Ce vecteur de parité a une valeur moyenne nulle en l'absence de défauts.

Lorsqu'un défaut (de capteur ou d'actionneur) apparaît, ce vecteur de parité devient non nul et s'oriente vers une direction privilégiée en fonction du défaut.

Il est souvent plus judicieux de rechercher des équations de redondance en prenant les sorties une par une (relations d'auto-redondance), puis les relations de redondance entre différentes sorties (relations d'inter-redondance).

Cette structure peut être utilisée pour faciliter l'isolation des défauts affectant les capteurs ou les actionneurs.

### III.4.Conclusion :

Le diagnostic à l'aide des méthodes à base de modèle est divisée en deux grandes étapes.

La première étape consiste à générer les résidus à partir de la détermination des relations de redondance analytique. La deuxième étape a pour but de décider l'état de fonctionnement du système.

Les performances du système de surveillance dépendent de la qualité du modèle. Les incertitudes issues aussi bien des capteurs que des paramètres ne sont pas tenues en compte.

L'obtention des modèles est d'autant plus difficile dans le cas des systèmes en génies des

procédés en raison de leur caractère non stationnaire (introduisant des incertitudes et des erreurs de modélisation). Dans le cas où le modèle analytique n'est pas disponible, on construit d'autres types de connaissances sur la base des signaux ou des règles issues des procédés ou des experts.

Dans le paragraphe suivant, nous allons voir d'autres méthodes de surveillance dites sans modèle qu'on appelle méthode à base de signal, capables de décider l'état de fonctionnement des processus à partir juste des signaux de sortie.

# Conclusion Générale

### Conclusion Générale

Ce travail de mémoire se rapporte sur le diagnostic par observateurs des systèmes non linéaires. L'objectif de ces travaux est la détection et localisation du défaut dans les systèmes non linéaires et observables les défauts.

Nous avons dans un premier temps rappelé du diagnostic et des observateurs, en général. Le diagnostic de défauts permet d'anticiper la survenue d'une panne.

Les observateurs sont généralement utilisés pour la commande d'un système. Ils peuvent aussi servir au diagnostic de défaut. Dans ce cas, les signaux estimés fournis par l'observateur.

L'observateur doit permettre de détecter les défauts tout en étant robuste pour la commande.

Nous avons, dans un premier temps, présenté la procédure de détection et d'isolation des défauts à base de modèle mathématique qui revient à un problème de génération de résidus. Notre intérêt a porté essentiellement sur les méthodes à base d'observateurs.

Nous avons mis en évidence, le principe de ces dernières et nous avons introduit une technique récente et qui s'avère intéressante. Celle-ci est basée sur des concepts géométriques.

# **Bibliographie**

### Bibliographie

[1] : Projet de fin d'études « contribution aux méthodes de diagnostic à base d'observateurs et A la commande tolérante aux défauts application à la machine asynchrone et au robot SCARA » ; juin 2004.

[2] : Doctorat de l'université de Toulouse : « Détection et isolation de panne basées de Différentielle application aux engins atmosphériques » ; 2010-ZHANG.

[3] : Mémoire -de- magister « contribution au diagnostic de panne pour les systèmes différentielle Ment plats » ; décembre 2007 ; thèse-las.

[4] : Coure de 3<sup>eme</sup> année Génie électrique.

FDI : détection et isolation des défauts (Fault Detection and Isolation).

FPRG : problème fondamental de génération des résidus (Fundamental Problem of Residual Generation).

[CHA06]M.CHADLI,Stabilité et commande de système décnits par multimodales, thèse de doctorat, institut national polytechnique de lorraine, 2006.

[JAM03]H.JAMOULI, Génération de résidus directionnels le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts, thèse de doctorat, université Henri Poincaré, France, 2003.

---