



الجمهورية الجزائرية  
قراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
التعليم العالي والبحث  
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي

التبسة - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : **Filière**

**Spécialité : AUTOMATIQUE**

Par :

**Djenaoui Nouha**

**Drid Lilia**

Sujet

**Estimation d'état et diagnostic de défauts d'un  
Système physique à base d'observateur à  
entrées inconnues**

Présenté devant le jury composé de :

DJARI Abdelhamid

MCA

Président

DJEDDI Abdelghani

MCA

Rapporteur

LOUDJANI Abdelhak

MAA

Examinateur

Promotion : 2020/2021

## **Remerciements**

Avant tout Nous tenons à témoigner notre reconnaissance à DIEU tout puissant, de nous avoir donné le courage et la force de mener à terme ce travail.

Nous exprimons nos sincères gratitudee et remerciements à notre encadreur Dr DJEDDI Abdelghani pour ses conseils précieux, son aide dans le cheminement de cette étude et pour la peine qu'elle s'est donnée tout au long de ce travail afin de faire de ce document ce qu'il représente.

Nous tenons également à exprimer une reconnaissance aux membres de jury Dr DJARI Abdelhamid et Dr LOUJANI Abdelhak.

Nos remerciements s'adressent aussi à nos parents pour leur soutien moral, financier, psychologique.

Un très grand merci pour nos frères, nos sœurs, nos collègues d'études.

## **Liste des notations et abréviation**

DOS : Structure d'observateur dédié (Dedicated Observer Scheme)

GOS : Structure d'observateur Généralisé (Generalized Observer Scheme)

FDI : Détection et isolation de défaut (Faultdetection and Isolation)

UIO : Observateur à entrées inconnues (Unknown Input Observer)

# Liste des figures

Figure 1.1:Structure générale d'une procédure de diagnostic	6
Figure 1.2 : Types de défauts d'un processus physique.	7
Figure 1.3 : Les défauts actionneurs, capteurs et composants.	8
Figure 1.4:Réparation des défauts selon le comportement temporel	9
Figure 1.5 : Natures de défauts : a)défaut additif ; b) défaut multiplicatifs	9
Figure 1.6 : Etape du diagnostic à base de modèle	10
Figure 1.7 : Architecture de redondance physique et analytique	12
Figure 1.8 : Principe de diagnostic à base de modèle.	13
Figure 1.9 : Classification des méthodes de diagnostic des défauts	14
Figure 2.1 Schéma bloc général.	23
Figure 2.2 lustration de la stabilité asymptotique	26
Figure 3.1Structure simple d'observateur	35
Figure 3.2: Schéma fonctionnel de l'observateur de Luenberger	37
Figure 3.3 sortie $y_1$ de système linéaire	44
Figure 3.4 sortie $y_1$ de système linéaire	44
Figure 3.5 schéma de simulation	46
Figure 3.6 Sortie $\hat{y}_1$ d'estimation de UIO	46
Figure 3.7 erreur d'estimation	47
Figure 3.8 Sortie $y_1$ est $\hat{y}_1$	48
Figure 3.9 sortie $y_2$ est $\hat{y}_2$	48
Figure 4.1 Schéma représentant les différentes étapes du diagnostic	52
Figure 4.2 Localisation des défauts en utilisant des résidus directionnels	54
Figure 4.3 Résidus structurés	55
Figure 4.4 Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs	56
Figure 4.5 Structure d'observateur simple.	58
Figure 4.6 : Structure d'observateurs dédiés.	59
Figure 4.7 : Structure d'observateurs généralisée	62
Figure 4.8 : Localisation de défauts actionneurs	60
Figure 4.9 : Observateur DOS pour la détection de défauts d'actionneur.	61
Figure 4.10 : Observateur GOS pour la détection de défauts d'actionneur.	64
Figure 4.11 : Observateur GOS pour la détection de défauts de capteurs	64

Figure 4.11 : Observateur DOS pour la détection de défauts de capteurs.	65
Figure 4. 12 : Schématisation du système des 3 cuves	65
Figure 4.13 : Schéma de simulation du système trois cuves	71
Figure 4.14 : Evolution de la sortie, $y_1$ de système et son estimation	71
Figure 4.15 : Evolution d'erreur d'estimation entre l'observateur et sortie de système $y_1$	72
Figure 4.16 : Evolution de la sortie, $y_2$ de système et son estimation	72
Figure 4.17 : Evolution d'erreur d'estimation entre l'observateur et sortie de système $y_2$	73
Figure 4.18 : Evolution de la sortie, $y_3$ de système et son estimation	73
Figure 4.19 : Evolution d'erreur d'estimation entre l'observateur et sortie de système $y_3$	74
Figure 4.20 : Les résidus sans défauts avec seuils de confiance	75

## Liste des tableaux

Tableau 4.1 : Signature des différents défauts sur les résidus obtenus par l'approche DOS.	58
Tableau 4.2 : Signature des différents défauts sur les résidus obtenus par l'approche GOS	59
Tableau 4.3 : Paramètres de système trois cuves	67
Tableau 4.4 : Matrice des signatures instrumentales de défauts	75
Tableau 4.5 : Matrice des signatures instrumentales de défauts	76

## ملخص

يركز العمل البحثي المقدم في هذه المذكرة على تقدير متغيرات الحالة، ودراسة إعادة بناء الحالة للنظام الفيزيائي، واكتشاف الأخطاء وطرق تحديد الجزء المصاب، وتشخيص الأنظمة القائمة على النموذج الديناميكي المضطرب باستخدام المراقب. يعرض هذا العمل طريقة لتبسيط التمثيل الرياضي للأنظمة الغير خطية، في شكل نموذج خطي، لغرض تبسيط تقنيات تقدير الحالة والتشخيص للأنظمة الخطية بدل استعمال النظام غير الخطي، وبعد ذلك قمنا بتطوير ملاحظ ذو المداخل المجهولة. يتم الكشف عن الأعطال على أساس مقارنة إشارة الخطأ الناتج عن الفارق بين إشارة كل مخرج مقاسة مع الإشارة المقدرة بالملاحظ. عندما تتجاوز قيمة إشارة المخلفات عتبة الثقة، ذلك يعلمنا بظهور خلل، و للكشف عنه نستخدم بنك الملاحظات المخصص، الذي يحتوي على ملاحظات تكون مداخلها مكونة من إشارة المدخل و إشارة المخرج الموافق لترتيب الملاحظ داخل البنك. و قد اختبرنا هذه الطريقة في كشف الأخطاء و التعرف عليها عبر استعمال نظام هيدروليكي يتكون من ثلاثة خزانات متتالية، ويتم تنفيذ المراقب رقمياً في بيئة MATLAB / SIMULINK ، حيث تم التعرف على الخلل الذي تعرض له الملتقط رقم 02.

## Résumé

Les travaux de recherche présentés dans cette mémoire portent sur l'estimation d'état, et l'étude des méthodes de reconstruction d'état, de détection et de localisation de défaut. et le diagnostic des systèmes à base de model dynamique perturbés par l'utilisation d'observateur .

Nous avons linéarisé les systèmes non linéaire pour étendre les technique d'estimation d'états et de diagnostic des systèmes linéaire au système non linéaire, et après sa nous avons développé un observateur à entrées inconnues pour estimer des défauts. La détection de défauts est basée sur la

Comparaison d'un résidu ; qui représente l'erreur d'estimation de la sortie, à un seuil de Détection. L'étape de localisation est basée sur la génération préalable d'une matrice de Signatures théoriques des défauts à détecter. Nous avons testé ces méthodes sur système hydraulique constitué de trois bacs en cascade, l'observateur sont implémentés numériquement sou l'environnement MATLAB/SIMULINK, Nous présentons les résultats de simulation obtenus.

## Abstract

The research work presented in this dissertation focuses on state estimation, and the study of state reconstruction, fault detection and localization methods, and the diagnosis of dynamic model-based systems disturbed by the use of the observer. We linearized nonlinear systems to extend state estimation and diagnostic techniques from linear systems to nonlinear systems, and after that we developed an unknown input observer to estimate faults. The detection of faults is based on the Comparison of a residue; which represents the estimation error of the output, at a Detection threshold. The localization step is based on the prior generation of a matrix of theoretical signatures of the defects to be detected. We tested these methods on a hydraulic system consisting of three cascading tanks, the observer are implemented digitally in the MATLAB / SIMULINK environment. We present the simulation results obtained.

## Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 01.....	3
1 Introduction : .....	4
2 Définition.....	5
3 Classification de défauts : .....	6
4 Evolution de défauts : .....	7
5 Natures de défauts : .....	8
5.1 Défauts additifs : .....	8
5.2 Défauts multiplicatifs : .....	8
6 Procédure de diagnostic : .....	9
6.1 Détection : .....	10
6.2 Localisation : .....	9
6.3 Identification : .....	9
7 Performance d'une procédure de diagnostic : .....	10
7.1 La détectabilité : .....	10
7.2 L'isolabilité : .....	10
8 Méthodes de diagnostic : .....	10
8.1 Méthodes sans modèle mathématique : .....	11
8.1.1. Diagnostic par traitement du signal : .....	11
8.1.2 Méthodes qualitatives : .....	11
8.1.3 Redondance matérielle .....	11
8.2 Méthodes avec modèles mathématiques : .....	12
8.2.1 Estimation paramétrique : .....	12
8.2.2 Espace de parité : .....	12
8.2.3 Méthodes de diagnostic à base d'observateurs : .....	13
9. Conclusion : .....	14
Chapitre 2.....	15
1 Introduction:.....	16
2 Le système linéaire.....	16
3 Commandabilité et observabilité : .....	17
3.1 Commandabilité : .....	17
3.1 Détectabilité : .....	19
4 Stabilité des systèmes dynamiques : Stabilité de Lyapunov .....	19
5 méthode direct de Lyapunov .....	20
6 Les systèmes linéarisé : .....	23
6.1 Linéarisation du système non linéaire : .....	21

6.2 Linéarisation du système linéaire :	23
7 Conclusion :	24
1 Introduction :	27
2 Observateur d'état :	27
2.1 Structure d'un observateur :	27
2.2 Classification des observateurs :	28
2.2.1. Observateurs du système linéaire de Luenberger :	28
2.2.2 Observateur à entrées inconnues :	30
2.2.2.1 Reconstruction de l'observateur à entrées inconnues :	30
2.2.2.1.1 Principe de reconstruction de l'observateur à entrées inconnues :	30
2.2.3 Méthode de résolution par changement de variables :	34
2.2.3 Méthode de Chen & Patton [28]:	35
3 Exemple 01	42
4 Exemple 02	43
5 Conclusion	41
1 Introduction :	43
2 Notion de résidus :	43
2.1 Détection de défaut (Fault Detection - FD) :	44
2.2 Localisation de défaut (Fault Isolation - FI) :	45
3 Les résidus directionnels:	55
4 Les résidus structurés	56
5 Principe de génération de résidus à base d'observateurs :	47
6 Structuration et évaluation des résidus générés à base d'observateur	48
7 Détection des défauts par banc d'observateurs :	48
8 Structure d'observateurs simplifiés :	49
9 Structure d'observateurs dédiés (DOS):	59
9.1 Approche par observateurs dédiés :	50
10 Structure d'observateurs généralisés (GOS)	61
10.1 Approche par l'observateur généralisés (GOS)	62
11 Système FDI dans les actionneurs :	52
12 Système FDI dans les capteurs :	54
13 Diagnostic du système trois cuves	66
13.1 Présentation du système :	66
13.2 Model du système :	67
13.3 Linéarisation du système :	68
13.4 Estimation:	70
13.5 Diagnostic de défauts capteurs du système trois cuves	78
14 Conclusion	67

# Introduction générale

## Introduction générale

Au cours des deux dernières décennies, les performances des équipements industriels ont considérablement été augmentées, le gain en productivité et en qualité de production s'est tout naturellement accompagné d'un accroissement de la complexité des installations. L'intégration de calculateurs très performants dans les systèmes automatisés, a permis de développer les algorithmes sophistiqués tant au niveau de la commande qu'au niveau du traitement des données. Cependant ces algorithmes deviennent complètement inefficaces si les informations qu'ils utilisent sont erronées. Il convient donc d'implanter un système permettant de surveiller le bon fonctionnement de l'ensemble.

La surveillance est définie comme l'ensemble des actions mises en œuvre afin de détecter, de localiser et de diagnostiquer tout phénomène anormal. Ces actions sont élaborées à partir des techniques dites de DLD (Détection et Localisation de Défauts) [32].

Le but de la détection est de mettre en évidence les événements qui affectent l'évolution d'un système surveillé et de distinguer le fonctionnement normal de l'anormal. La tâche de localisation consiste à analyser les événements de façon à pouvoir déterminer le ou les composants défectueux du système (instruments de mesures, actionneurs, composants physiques).

La détection de défaut à base d'observateurs comprend deux étapes, la génération et l'évaluation des résidus. Les problèmes de génération et d'évaluation de résidus des systèmes avec la présence de perturbations ont été largement étudiés séparément.

Les méthodes à base d'observateurs consistent à générer des résidus qui sont calculés en faisant la différence entre les sorties réelles, éventuellement filtrées, et celles estimées par l'observateur. Ces méthodes s'avèrent très efficaces pour la détection et la localisation des défauts. En effet, elles ont connu un essor considérable. Notons aussi l'importance d'avoir des états reconstruits en commande par retour d'états. Un défaut dans un système peut se manifester par l'apparition d'un signal au sein du système. Citons comme exemple, la cassure de barres du rotor d'un moteur électrique crée des courants statiques. Ces grandeurs sont considérées comme des entrées inconnues.

L'objectif de notre travail porte essentiellement sur la mise en œuvre de l'observateur à entrées inconnues pour la détection et la localisation de défauts capteurs dans un système physique constitué de trois bacs. Après une étude théorique illustrée sur des exemples simples académiques, les problèmes de synthèse de l'observateur présentés seront appliqués au système physique.

Le mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur la détection et la localisation de défauts (le diagnostic), aussi bien du point de vue de la terminologie, que des principes fondamentaux sur

lesquels il repose. Les principales approches de détection seront énoncées. Les méthodes usuelles et avec modèle analytique seront évoquées.

Le deuxième chapitre expose la linéarisation des systèmes physiques. Le calcul des points de fonctionnement, avec le traitement d'un exemple académique.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons des méthodes de synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes linéaires. Nous allons montrer, à travers un exemple académique, la méthodologie de la synthèse d'un observateur à entrées inconnues.

L'objectif du quatrième chapitre est d'illustrer, à travers un système non linéaire " système à trois Cuves", la mise en œuvre des techniques de modélisation, d'estimation d'état et de diagnostic de fonctionnements à base de l'observateur présenté au cours du chapitre précédent. Ce chapitre permet d'évaluer les performances de l'approche présentée de la phase modélisation par modèle jusqu'à la phase de mise en œuvre d'une stratégie de diagnostic à base de observateurs à entrées inconnues. La méthode de localisation est basée sur la génération préalable d'une matrice de signatures théoriques des défauts à détecter. L'utilisation d'un banc de observateurs permet ensuite de constituer une matrice de signatures expérimentales. La localisation des défauts peut alors être obtenue en comparant les signatures théoriques et expérimentales.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

**Chapitre 01:**  
**Généralités sur l'estimation d'état et le diagnostic  
de défauts**

## 1. Introduction

La course à la performance, la rentabilité et la fiabilité a rendu les systèmes industriels de plus en plus complexes et sont de ce fait de plus en plus sensible aux défauts. Leurs conséquences peuvent être importantes en termes de productivité arrêt inutile d'une installation, de sécurité anomalie non détecté ou de qualité de la production (mesure incorrecte de la grandeur contrôlée).le diagnostic de defaults devient donc une tâche indispensable à la bonne conduite de ces systèmes complexes.

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom: FDI (Fault Détection and Isolation). Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur 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. Nous proposons dans ce chapitre de faire un état de l'art sur le diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. L'intérêt se portera essentiellement sur le problème de détection et d'isolation des défauts. Il est question, dans un premier temps, de donner les différents concepts et notions rencontrés dans la littérature concernant le diagnostic des défauts, car un bon diagnostic nécessite une bonne compréhension de ces notions. Le principe de base du diagnostic sera alors présenté ainsi que les différentes méthodes proposées dans ce domaine.

D'autre part, nous allons présenter la procédure générale de détection et d'isolation des défauts par les méthodes à base de modèle mathématique. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur résidu. Mais auparavant, nous allons introduire la manière avec laquelle aborder un problème FDI. Nous aborderons également les critères de performance d'un système FDI et nous nous intéresserons, plus particulièrement, au problème de robustesse [6].

## 2. Définition

### Le diagnostic :

Le diagnostic est une tâche hautement cognitive centrale dans de nombreux domaines, l'objectif visé par le diagnostic consiste à déterminer les causes d'un dysfonctionnement à partir d'observation et de symptômes constatés c'est-à-dire la détection et la localisation d'un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique.

Le diagnostic est en principe défini comme un processus à trois phases :

- Détection du mode de fonctionnement.
- Qualification du mode de fonctionnement.
- Décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement [17].

La figure représente Structure générale d'une procédure de diagnostic :

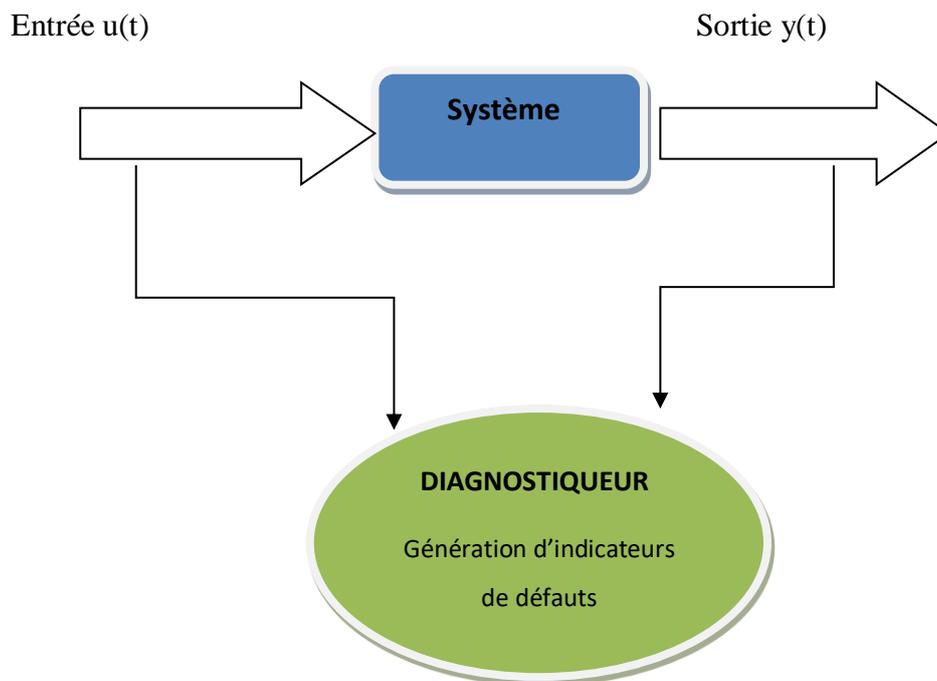


Figure 1.1- Structure générale d'une procédure de diagnostic

Un système est en fonctionnement normal lorsque ses états, ses entrées et ses sorties sont très proches de leur valeur nominale. Typiquement, il y a fonctionnement normal lorsqu'il n'y a pas d'apparition de défauts [22].

**Erreur:** tout écart entre la valeur mesurée ou calculée, et la valeur réelle [23].

**Défaut:** écart non acceptable d'au moins une caractéristique d'un système par rapport à sa valeur normale.

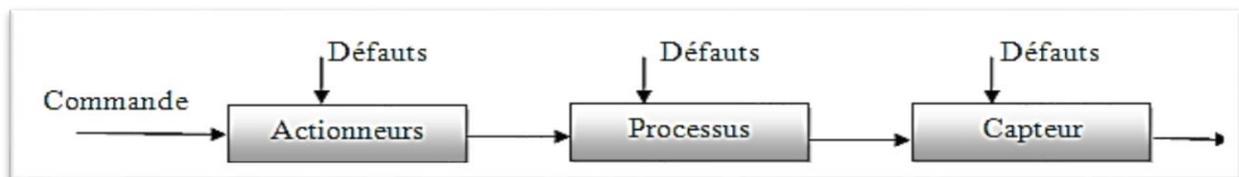
**Défaillance:** interruption permanente de la capacité d'un système à assurer une fonction requise dans des conditions opérationnelles spécifiées [25].

**Panne :** est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir fonction, le dispositif sera déclaré en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance.

- **Perturbation :** une perturbation est un signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale [20].
- **Résidu:** signal conçu comme indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales [1].

### 3. Classification de défauts

Un défaut est défini comme étant un écart non permis entre la valeur réelle d'une caractéristique du système et sa valeur nominale. Trois types de défauts sont distingués, comme illustré sur la Figure 1.2 : défaut actionneur, défaut capteur et défaut système (ou défaut composant):



La figure représente de défauts d'un processus physique:

**Figure 1.2 :** Types de défauts d'un processus physique.

#### 3.1. Défauts d'actionneurs

Un défaut actionneur est une défaillance représentant une perte totale ou partielle d'un actionneur agissant au niveau de la partie opérative et détériorant le signal d'entrée du système.

### 3.2. Défauts de capteurs

Divergence (incohérence) entre la valeur mesurée et la valeur réelle d'une variable du système. Ces défauts sont habituellement considérés comme additifs (indépendant de l'amplitude de la mesure), mais certains défauts capteur (blocage ou échec) sont mieux caractérisés comme multiplicatifs [5].

### 3.3. Défauts composants ou systèmes

Les défauts composants sont des défauts qui affectent les composants du système lui-même. Ce sont les défauts qui ne peuvent pas être classifiés ni parmi les défauts actionneurs ni parmi les défauts capteurs [21].

La figure représente les défauts actionneurs, capteurs et composants :

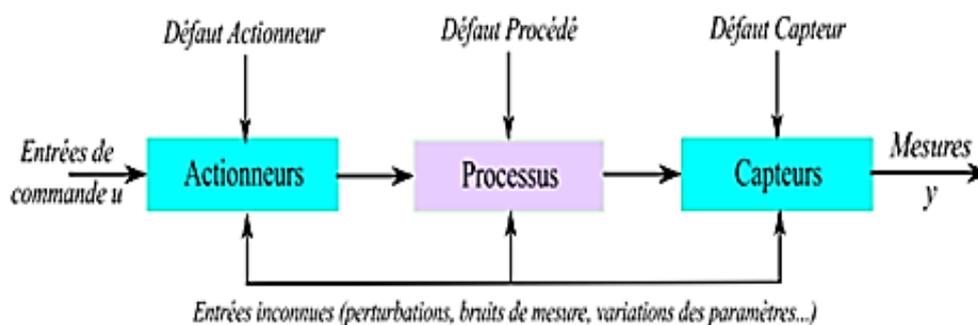


Figure 1.3 : Les défauts actionneurs, capteurs et composants.

## 4. Evolution de défauts

Les défauts sont classés également selon leurs caractéristiques temporelles (voir la figure I.4) comme brusque, progressif et intermittent. Les défauts brusques (biais) se produisent instantanément souvent à cause de dommages matériels. Habituellement ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé. Les défauts progressifs (dérives) représentent les changements lents des valeurs paramétriques. Souvent dus au vieillissement, Ils sont plus difficiles à détecter en raison de leur dynamique lente, mais sont également moins graves. Les défauts intermittents (valeurs aberrantes) sont des défauts qui apparaissent et disparaissent à plusieurs reprises, par exemple à cause d'un câblage partiellement endommagé [15].

Généralement on distingue dans la littérature trois types de défauts:

- ❖ Défaut brusque ou abrupt
- ❖ Défaut intermittent
- ❖ Défaut à dérive lente ou graduel

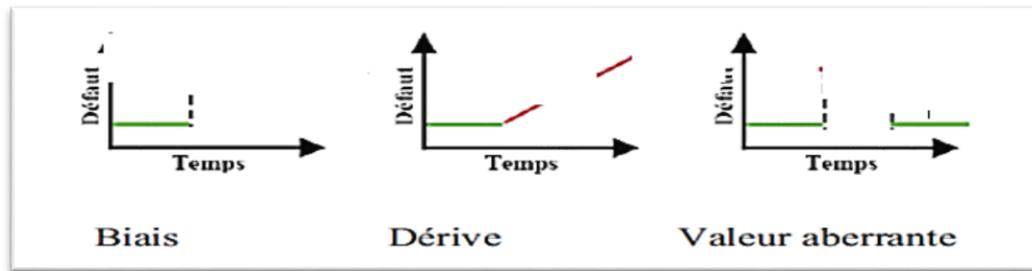


Figure 1.4: Réparation des défauts selon le comportement temporel

## 5. Natures de défauts

La modélisation de défaut est une représentation formelle de connaissance que l'on a sur le défaut possibles et de leur influence sur le système. Partant du modèle, les défauts peuvent être classés conformément à deux modèles mathématiques sont utilisés selon l'effet du défaut sur le système. Deux modèles mathématiques sont utilisés selon l'effet du défaut sur le système.

### 5.1. Défauts additifs

Ces défauts sont modélisés sous forme de termes additifs dans le modèle du système. Ils influent sur son état ou sur sa sortie. Cette modélisation est habituellement attribuée aux défauts de capteurs et d'actionneurs [22].

### 5.2. Défauts multiplicatifs

Ils correspondent à des modifications des paramètres du modèle représentant le système, ils engendrent des variations des sorties du système dont l'amplitude dépend de la valeur des entrées connu [2].

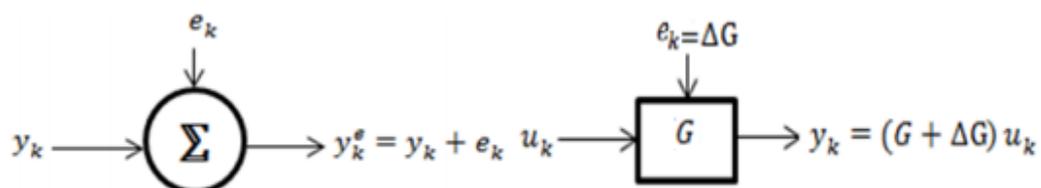


Figure 1.5 Natures de défauts : a) défaut additif ; b) défaut multiplicatifs

## 6. Procédure de diagnostic

On distingue généralement, un système de diagnostic réalise les tâches suivantes :

### 6.1. Détection

Elle permet de détecter un dysfonctionnement dans le système. Si l'on dispose d'un modèle nominal, un dysfonctionnement se caractérisera par l'éloignement des paramètres du procédé de ceux du modèle de bon fonctionnement. En présence d'un modèle de dysfonctionnement, la détection identifie clairement le défaut connu a priori [32].

### 6.2. Localisation

L'étape de localisation doit permettre, à partir des résidus détectés non nuls statistiquement, de localiser les défauts, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défectueux. La signature d'un défaut représente l'effet de celui-ci sur un ou plusieurs résidus.

La localisation suit l'étape de détection, elle attribue le défaut à un sous-système particulier (capteur, actionneur, organe de commande, processus...).

### 6.3. Identification

L'identification d'un défaut est le fait d'estimer l'amplitude et l'évolution temporelle du défaut afin d'expliquer au mieux le comportement du système. Cette partie d'identification du défaut est la dernière phase de la procédure de diagnostic [17].

L'objectif de cette procédure consiste à déterminer (identifier) la caractéristique précise de la défaillance [16].

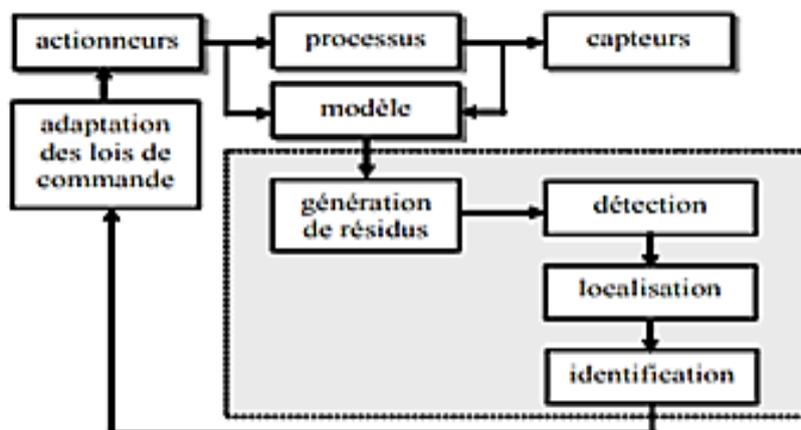


Figure 1.6 : étapes du diagnostic à base de modèle

## 7. Performance d'une procédure de diagnostic

IL s'agit ici de présenter les principaux critères permettant d'évaluer les performances d'un système de diagnostic. De manière générale, on relève : la détectabilité, l'isolabilité, la sensibilité, la robustesse, le coût économique et la durée de développement [32].

### 7.1. Détectabilité :

La détectabilité d'un défaut va décrire l'évolution de la validité de la propriété normale. Dire qu'un défaut est détectable signifie intuitivement qu'il est possible de le détecter : c'est-à-dire qu'il est possible de dire que le comportement observable du système n'est pas normal. Remarquons que suivant cette idée, la détectabilité ne peut donc concerner que les « vrais » défauts, les défauts autres que le cas normal [34].

### 7.2. Isolabilité :

Est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. Une défaillance engendre bien souvent de nouvelles défaillances (Fig.1.6) et il devient dès lors difficile de retrouver l'organe défaillant. La propriété d'isolabilité est liée à la procédure de détection elle-même [33].

### 7.3. Sensibilité :

Caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. Elle dépend non seulement de la structure des résidus mais aussi du rapport  $\Delta$  'amplitude du bruit de mesure avec celle du défaut [15].

### 7.4. Robustesse :

Est l'insensibilité du système de diagnostic aux bruits, erreurs de modélisation, et aux autres incertitudes (sensibilité du résidu aux défauts et insensibilité vis-à-vis des perturbations) [21].

## 8. Méthodes de diagnostic

L'objectif est de déterminer la méthode la plus appropriée pour la résolution de notre problème de détection et diagnostic, ainsi que, positionner la classe des méthodes de diagnostic qui nous intéresse parmi les différentes méthodes de la littérature [11].

## 8.1. Méthodes sans modèle mathématique

### 8.1.1. Diagnostic par traitement du signal

L'analyse d'un signal est une source d'informations. En effet la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée au défaut. Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'autocorrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale [2].

### 8.1.2. Méthodes qualitatives

Les méthodes à base de modèles qualitatifs permettent de représenter le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non seulement mathématiques mais aussi de type symbolique. Les modèles qualitatifs doivent représenter de manière qualitative des systèmes continus, discrets et/ou hybrides pour que le diagnostic soit capable de détecter les déviations du fonctionnement normal, localiser la défaillance et en déterminer la ou les causes [33].

### 8.1.3. Redondance matérielle

Le moyen le plus direct pour obtenir une information fiable sur une même variable est de disposer de plusieurs capteurs la mesurant simultanément. Une redondance à trois permettra notamment d'isoler un capteur défaillant. La redondance physique souffre d'un désavantage majeur : doubler ou tripler le nombre de capteurs revient à augmenter considérablement son coût et à affronter des problèmes d'encombrement liés à l'installation et à la maintenance de ces capteurs. L'ajout de capteurs supplémentaires permettra aussi d'avoir des informations additionnelles à mettre à profit dans le cadre de la redondance analytique [32].

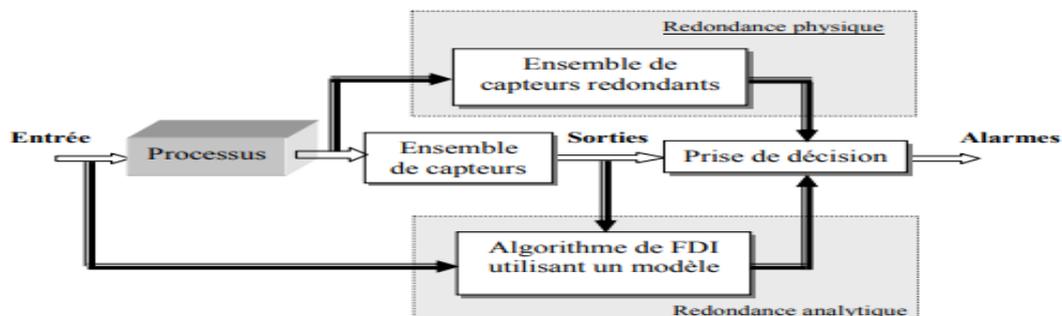


Figure 1.7: Architecture de redondance physique et analytique

## 8.2. Méthodes avec modèles mathématiques

Les méthodes de diagnostic quantitatives ou 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 de procédé réel. Le problème FDI à base de modèle mathématique a attiré l'attention de nombreux chercheurs, tels que Willskey, Isermann, ...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.
- ❖ La figure suivante représente Principe de diagnostic à base de modèle [2].

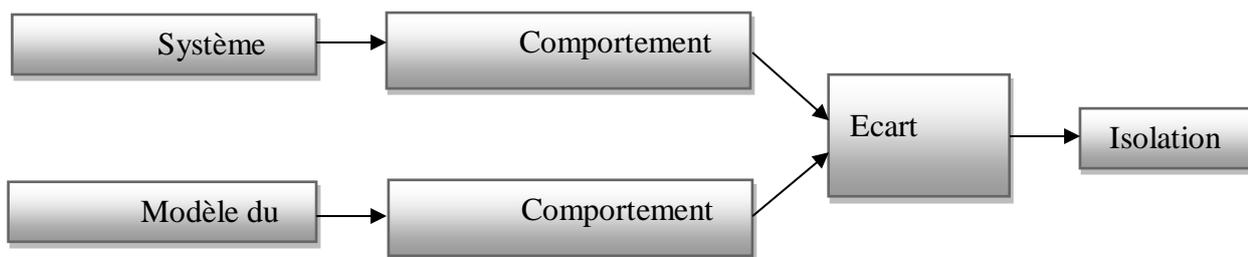


Figure 1.8 : Principe de diagnostic à base de modèle

### 8.2.1. Estimation paramétrique

L'idée principale de cette approche consiste à générer un vecteur de résidus en estimant une combinaison ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables (par exemple, les signaux d'entrée et de sortie). Les résidus sont alors générés au travers de la différence entre les sorties estimées et les sorties réelles et/ou mesurées. L'observateur revient finalement à un modèle parallèle au système avec une contre-réaction qui pondère l'écart de sortie.

### 8.2.2. Espace de parité

Les méthodologies utilisant l'espace de parité ont connu un essor important dû à la simplicité de leur conception. Il s'agit d'écrire les relations algébriques liant les entrées et les sorties du système, en éliminant toutes les autres variables [33].

Deux types de relations analytiques se distinguent :

1. La redondance statique : qui est un ensemble de relations algébriques entre les mesures fournies par les différents capteurs.
2. La redondance dynamique : qui est un ensemble d'équations différentielles ou récurrentes entre les sorties et les entrées du système [21].

### 8.2.3. Méthodes de diagnostic à base d'observateurs

Les approches à base d'observateurs ou de filtres, bien connues du monde de l'automatique à des fins de commande en boucle fermée, sont les plus couramment utilisées et les premiers travaux datent des années 70 [34].

La figure représente Classification des méthodes de diagnostic des défauts :

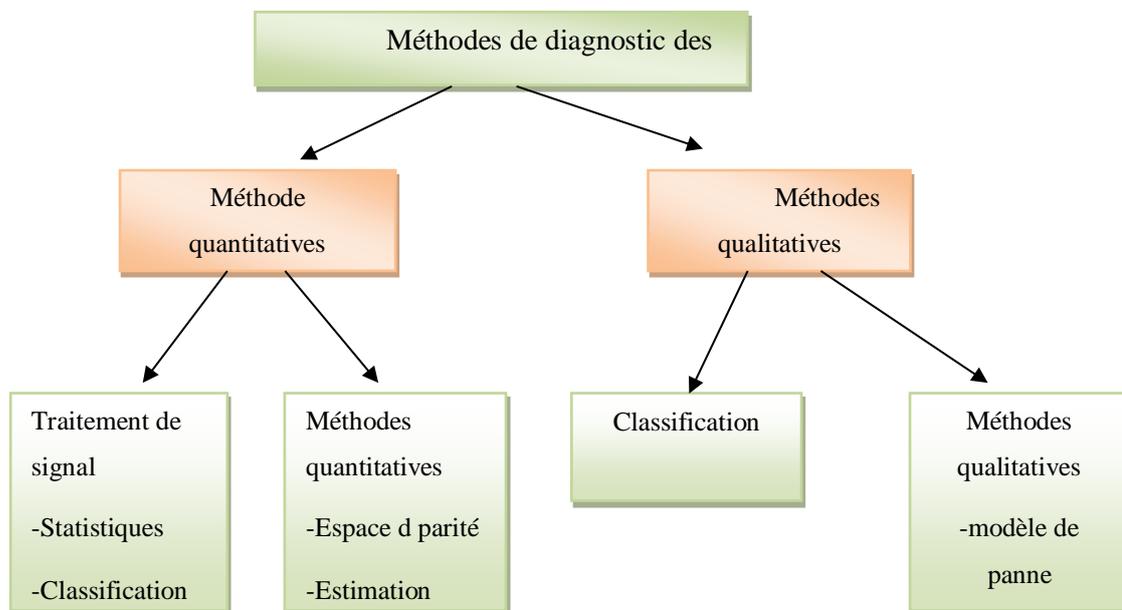


Figure 1.9 : Classification des méthodes de diagnostic des défauts

## 9. Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif de présenter une revue de littérature non exhaustive sur le diagnostic de défauts et les différentes méthodes proposées dans ce domaine. Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs classifications, nous avons distingué, essentiellement, entre les méthodes analytiques ou quantitatives (estimation d'état, estimation paramétrique, équation de parité) qui sont basées sur l'existence de modèles mathématiques et les méthodes symboliques ou qualitatives (intelligence artificielle, logique floue, réseaux de neurones, ...etc.) qui sont utilisées dans le cas où la modélisation mathématique du système serait complexe ou inexistante. Notre intérêt a porté sur l'étude des méthodes à base de modèle mathématique. Nous avons présenté la procédure de détection et l'isolation de défauts par celles-ci. Cette dernière passe par deux étapes essentielles : la génération et l'évaluation du vecteur des résidus.

## **Chapitre 02 : Linéarisation des systèmes physiques**

## 1. Introduction

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : après avoir décrit les deux familles des modèles, à savoir linéaires et non linéaires, avec quelques caractéristiques des systèmes. Nous présentons quelques notions mathématiques qui seront utiles pour la linéarisation.

Enfin, nous décrivons en détails les étapes principales pour la conception de la commande par linéarisation au sens entrée/sortie des systèmes non linéaire.

## 2. Le système linéaire

Un système linéaire est un objet du monde matériel qui peut être décrit par des équations linéaires (équations linéaires différentielles ou aux différences), ou encore qui obéit au principe de superposition [14].

D'une manière générale un système physique peut être représenté, par un ensemble d'équations différentielles du premier ordre [36].

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

Dans le cas d'un système stationnaire, les matrices A, B, C et D sont indépendantes du temps.

Ce cas seul sera examiné par la suite.

- $x(t)$  est appelée vecteur d'état du système de dimension  $n$ .
- $u(t)$  est appelée vecteur d'entrée ou vecteur de commande du système de dimension  $\ell$ .
- $y(t)$  est appelée vecteur de sortie du système de dimension  $m$ .
- A est appelée matrice d'état du système de dimension  $n \times n$ .
- B est appelée matrice d'entrée ou de commande du système de dimension  $n \times \ell$ .
- C est appelée matrice de sortie du système de dimension  $m \times n$ .
- D est appelée matrice la matrice de transmission directe du système de dimension  $m \times \ell$ .

Cela signifie que, d'une manière générale, on peut exprimer l'évolution du système d'équations (1-2) et (1-3), modélisée par un vecteur constitué des dérivées premières des composantes du vecteur d'état de dimension  $n$ , en fonction du vecteur d'état du système. Avec un vecteur de commande de dimension  $\ell$  et un vecteur de sortie de dimension  $m$  [13].

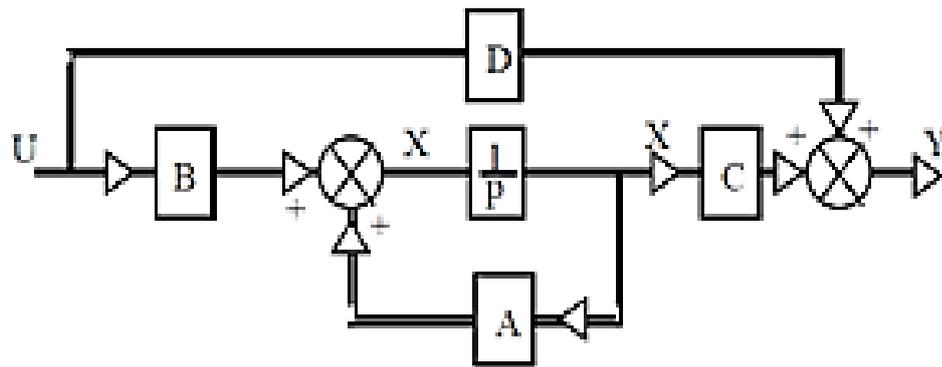


Figure 2.1 : Schéma bloc général.

### 3. Commandabilité et observabilité

La commandabilité et l'observabilité d'un système ne dépendent pas de la représentation choisie qui, rappelons-le une fois de plus, n'est pas unique. Si un système est commandable et/ou observable, il s'agit de propriétés intrinsèques au système qui ne sont pas remises en cause par la forme du modèle. Il ne faut donc pas confondre les formes compagnes avec des représentations sous lesquelles il faut impérativement placer le système pour qu'il possède telle ou telle caractéristique. En revanche, il est important de connaître ces formes remarquables car elles facilitent, sous certaines conditions, la mise en œuvre des systèmes. Les concepts de commandabilité et d'observabilité sont des concepts fondamentaux pour l'étude des systèmes. Ils décrivent respectivement comment les états d'un système sont influencés par les entrées et quelle information les sorties mesurées donnent sur les états du système. De plus, ces concepts (commandabilité et observabilité) sont utilisés pour avoir la possibilité du passage d'un système espace d'état vers un système fonction de transfert, puisque la représentation de fonction de transfert est validée seulement si elle remplit les conditions de la contrôlabilité et de l'observabilité des systèmes sous forme d'espace d'état [5].

#### 3.1. Commandabilité

La notion de commandabilité des systèmes singuliers est une généralisation de la commandabilité des systèmes usuels en tenant compte de la partie impulsionnelle de la réponse. Ainsi, le système est commandable si l'espace d'état est atteignable [37].

### 3.1.1. Définition : (commandabilité vers l'origine)

Le système  $\Sigma(A, B)$  est complètement commandable si, pour tout vecteur  $x_1$  et tout intervalle de temps  $t_1 < t < t_2$ , il existe une fonction de commande  $Ux_1(t)$  continue et définie pour  $t_1 \leq t \leq t_2$ , telle que la solution du système  $\Sigma(A, B)$ , pour  $u(t) = Ux_1(t)$  et  $x(t_1) = x_1$  satisfasse  $x(t_2) = 0$ . En d'autres termes, le système  $\Sigma(A, B)$  est complètement commandable s'il peut être amené, en un temps fini, d'un état quelconque  $x(t_1)$ , à l'instant  $t_1$ , à un autre état quelconque  $x(t_2)$ , à l'instant  $t_2$ , avec une commande appropriée. La notion d'accessibilité est fortement liée à la notion de commandabilité en état dans le cas des systèmes linéaires stationnaires continus [38].

**3.1.2. Définition :** Le système (2.1) est dit non commandable si pour toute condition initiale  $x_0 \in \mathbb{R}^n$ ,  $\tau \in \mathbb{R}$  et  $x_s \in \mathbb{R}^n$ , il existe toujours une commande admissible  $U(t) \in C_p^{h-1}$  telle que  $x_\tau(t) = I_\tau(x_s, t)$ . Avec  $I_\tau(x_s, t)$  contenant tous les termes impulsifs possibles dans  $x(t)$  à l'instant  $\tau$  où [11] :

$$I_\tau(x_s, t) = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{2\tau}(x_s, t) \end{bmatrix}, \text{ et } I_{2\tau}(x_s, t) = \sum_{i=1}^{h-1} \delta^{i-1}(t - \tau) N^i x_s \quad (2.2)$$

**Théorème 01 :** La paire de matrices  $(A, B)$  (ou le système (2.1)) est commandable si et seulement si

$$\text{rang}(Qc) = n$$

$$\text{Avec } Qc = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (2.3)$$

**3.2. Observabilité :** Dans la littérature, il est démontré qu'un observateur existe si et seulement si la réalisation d'état du système en question est observable. En effet, l'observabilité d'un système exprime la possibilité de reconstruire l'état à partir de la seule connaissance des signaux d'entrées et de sorties [10].

**3.2.1. Définition :** Un état est observable en  $t_0$  s'il est possible de déterminer  $x_i(t_0)$  connaissant  $y(t)/[t_0, t_f]$ . Si cette propriété est vraie complètement observable [23].

**Théorème 01 :**

Le système décrit par (1.1) est complètement observable si et seulement si le rang(O) = n

$$\text{Avec} \quad Obs = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

**3.3. Déteçtabilité :**

L'observabilité est une propriété du système. Il est souvent suffisant d'utiliser la propriété de déteçtabilité. Cette dernière propriété peut se définir de plusieurs façons équivalentes, un système est dit déteçtable si :

- Ses pôles non observables sont stables.
- Il existe une matrice de gain d'observateur d'état L tel que la matrice (A – LC) soit Hurwitz[5].

**4. Stabilité des systèmes dynamiques**

**Définition 1 :** (Stabilité au sens de Lyapunov)

Soit  $x_e$  un point d'équilibre du système (1.7) et  $D \subset \mathbb{R}^n$  contenant  $x_e$ . S'il existe une fonction V de classe  $C^1$  telle que

$$v(0) = 0 \text{ et } v(x) > 0 \text{ dans } D/\{0\} \quad (2.5)$$

$$\dot{v}(x) \leq 0 \text{ dans } D$$

Alors  $x_e = 0$  est stable. De plus, si

$$\dot{v}(x) < 0 \text{ dans } D/\{0\} \quad (2.6)$$

Alors  $x_e = 0$  est asymptotiquement stable.

Maintenant, décrivons simplement et rapidement cette méthode pour une EDO linéaire temps invariant. Ensuite, nous l'expliquerons pour l'étude de stabilité d'une équation de transport linéaire. Enfin, nous détaillerons le cas d'un système couplant les deux équations. Pour chacun de ces cas, nous rappellerons les conditions de stabilité et nous discuterons de leur capacité à bien caractériser le comportement du système [27].

**Définition 2 :** (Stabilité asymptotique) :

Le point d'équilibre  $x_e$  est asymptotiquement stable s'il est stable et attractif.

Outre la stabilité, la stabilité asymptotique exige l'existence d'un voisinage du point d'équilibre, tel que pour toute condition initiale appartenant à ce voisinage, l'état  $x(t)$  converge vers  $x_e$  lorsque le temps tend vers l'infini

La figure représente lustration de la stabilité asymptotique:

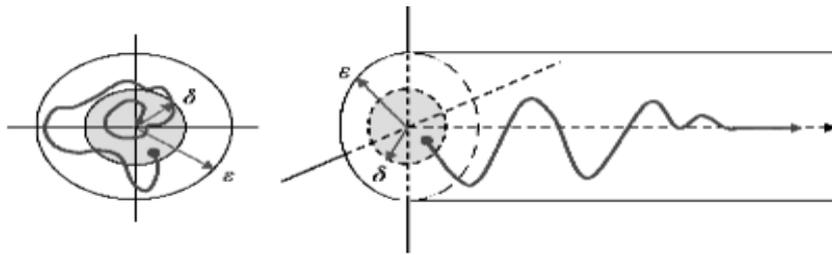


Figure 2.2 : lustration de la stabilité asymptotique

Cependant, la définition de la stabilité asymptotique ne donne pas une idée sur la rapidité de convergence de la trajectoire  $x(t)$  vers le point d'équilibre  $x_e$ . D'où la notion de stabilité exponentielle [31].

**Définition 3:** (Attractivité) [25].

L'équilibre  $x_e = 0$  est attractif lorsqu'il y a convergence de l'état  $x$  vers l'état  $x$  au bout d'un temps infini, les conditions initiales  $x_0$   $x$  étant bornées, soit :

$$\exists \delta_0(t_0) \forall t_0 \geq 0 / \|x_0\| < \delta_0(t_0) \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} x(t, x_0, t_0) = 0 \quad (2.7)$$

Lorsque  $\delta_0(t_0) = +\infty$

On dit que l'équilibre  $x_e = 0$  est globalement attractif.

**Définition 4 :** (stabilité asymptotique).

On dit que l'origine  $x = 0$

- Un point d'équilibre asymptotiquement stable, s'il est stable est attractif
- Un point d'équilibre globalement asymptotiquement stable s'il est stable est globalement attractif [9].

## 5. Méthode directe de Lyapunov

La méthode de Lyapunov est basée sur l'aspect physique fondamental de l'énergie. Si l'énergie totale d'un système, linéaire ou non-linéaire, est continûment dissipée (on parle de système dissipatif), alors le système doit converger obligatoirement vers un point d'équilibre.

Alors, la philosophie de Lyapunov, pour étudier la stabilité d'un système, est d'analyser la variation d'une seule fonction scalaire (appelée la fonction de Lyapunov) dépendant de l'énergie totale du système. C'est à dire, on va définir cette fonction de Lyapunov décroissante le long des trajectoires du système à l'intérieur du domaine d'attraction.

### Définition 1 : (Fonction propre définie positive)

S'il existe  $V: M \rightarrow \mathbb{R}$  définie positive et propre (c'est à dire l'image réciproque d'un compact de  $\mathbb{R}^+$  est un compact de  $M$  tel que  $F.V(x) < 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n \setminus \{x_0\}$  et  $F.V(x) = 0$  alors  $x_0$  est un point d'équilibre globalement asymptotiquement stable pour le système (1.1).

Nous avons aussi le résultat suivant connu sous le nom du théorème inverse [12].

### Définition 2 : (Fonction de Lyapunov)

On considère le system (2.1) :

$\dot{x} = f(t, x(t))$  Soit  $D$  un voisinage de 0 et  $V: \mathbb{R}^+ \times D \rightarrow \mathbb{R}$  une fonction continue et différentiable.

- On dit que  $V$  est une fonction de Lyapunov si elle vérifie les deux propriétés suivantes [13] :

- $V$  est définie positive.
- $\dot{V}(t, x) \leq 0$  pour tout  $t \in \mathbb{R}^+, x \in D$

### Exemple 1 :

On considère l'équation suivante :

$$\ddot{x} - \xi \dot{x} x^2 + x = 0 \quad (2.8)$$

Avec fonction de Lyapunov :

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} x_2^2 \quad (2.9)$$

Le système possède un point d'équilibre :

$$(x_1, x_2) = (0, 0)$$

Tout d'abord, on transforme l'équation (2.1) en modèle d'état.

On prend :

$$\begin{cases} x_1 = x \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{x} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{x} = \xi x_1^2 x_2 - x_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \xi x_1^2 x_2 - x_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\bullet \quad V(0, 0) = 0 \quad (2.11)$$

$$\bullet \quad V(x_1, x_2) > 0 \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \bullet \quad \dot{V}(x_1, x_2) &= x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2 & (2.13) \\ &= x_1(x_2) + x_2(\xi x_1^2 x_2 - x_1) \\ &= \xi x_1^2 x_2 \end{aligned}$$

Pour que le système linéarisé soit stable,  $\xi$  doit être strictement négatif.

## 6. Les systèmes linéarisés

### 6.1. Système non linéaire

Considérons un processus décrit par les équations non linéaires :

$$\varphi(\dot{x}(t), x(t), u(t)) = 0 \quad (2.14)$$

$$\omega(y(t), x(t), u(t)) = 0$$

où  $u(t)$ ,  $y(t)$  et  $x(t)$  représentent respectivement les variables d'entrée, de sortie et les variables internes du processus. Linéariser ce système consiste à en chercher un modèle qui localement vérifie la propriété de linéarité :

$$\text{si} \quad u_1(t) \text{ donne } y_1(t) \text{ et } u_2(t) \text{ donne } y_2(t)$$

Alors

$$\text{si} \quad \lambda u_1(t) + \mu u_2(t) \text{ donne } \lambda y_1(t) + \mu y_2(t)$$

Pour y parvenir, nous allons considérer le système autour d'un équilibre, qui peut être constant ou pas et cela avec un point de fonctionnement. Le modèle linéaire obtenu ne sera donc pas entre les variables initiales mais entre les écarts de ces variables [35].

## 6.2. Linéarisation du système non linéaire

Malgré les différents travaux réalisés dans le cadre de diagnostic des systèmes non-linéaires, mais lors de leur mise en place pratique, ces méthodes ont un coût assez prohibitif. Souvent les méthodes linéaires ou linéarisés sont préférées.

La linéarisation du système non-linéaire passe par l'écriture du développement limiter d'ordre 1 du système. Ainsi l'écriture d'un système non-linéaire sous une forme linéarisée va être définie par le système(2.12) en définissant les matrices  $A(t), B(t), C(t), D(t)$  de la façon suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{A}(t) = \left. \frac{\partial \Phi(x,u,t)}{\partial x(t)} \right|_{x_0, u_0, t_0} \\ \mathbf{C}(t) = \left. \frac{\partial \Psi(x,u,t)}{\partial x(t)} \right|_{x_0, u_0, t_0} \end{cases}, \begin{cases} \mathbf{B}(t) = \left. \frac{\partial \Phi(x,u,t)}{\partial x(t)} \right|_{x_0, u_0, t_0} \\ \mathbf{D}(t) = \left. \frac{\partial \Phi(x,u,t)}{\partial x(t)} \right|_{x_0, u_0, t_0} \end{cases} \quad (2.15)$$

Où le symbole  $\partial$  désigne la notion de dérivée partielle  $x_0, u_0$  et  $t$  respectivement l'état, la commande et l'instant où la linéarisation est appliquée.

Il existe plusieurs méthodes de linéarisation, parmi lesquelles on cite:

- linéarisation sur un point,
- linéarisation sur plusieurs points,
- linéarisation tangente.
- approche multi-modèles,

Chacune de ces méthodes de linéarisation à des avantages et des inconvénients, et le choix de l'une d'entre elle est liée au cahier de charge du système à linéariser ainsi qu'à son application [33].

### 6.2.1. Autour d'un point de fonctionnement

Soit  $y = (x, z)$  une fonction non linéaire algébrique alors autour du point d'équilibre  $(x_e, y_e, z_e)$

Défini par :

$$y_e = f(x_e, z_e)$$

On a la série de Taylor :

$$y = f(x_e, z_e) + \left[ \frac{\delta f(x, z)}{\delta x} \right]_{x_e, z_e} (x - x_e) + \left[ \frac{\delta f(x, z)}{\delta z} \right]_{x_e, z_e} (z - z_e) \quad (2.15)$$

Tronquée après les termes du premier ordre, on a entre les variables d'écart :

$$\delta x = x - x_e \quad (2.16)$$

$$\delta y = y - y_e \quad (2.17)$$

$$\delta z = z - z_e \quad (2.18)$$

La loi linéarisée [35] :

$$\delta y = \left[ \frac{\delta f(x, z)}{\delta x} \right]_{x_e, z_e} \delta x + \left[ \frac{\delta f(x, z)}{\delta z} \right]_{x_e, z_e} \delta z \quad (2.19)$$

Nous allons appliquer ce principe sur le système (1), Considérons un point d'équilibre constant du système (1.78) que l'on note  $E = (x_e, y_e, z_e)$  est défini par  $\dot{x}_e = 0$  et Ce point d'équilibre est défini par :

$$\varphi(0, x_e, u_e) = 0 \quad (2.20)$$

$$\omega(y_e, x_e, u_e) = 0 \quad (2.21)$$

L'utilisation de variables d'écart:

$$\delta_x = x - x_e \quad (2.22)$$

$$\delta_y = y - y_e \quad (2.23)$$

$$\delta_u = u - u_e \quad (2.24)$$

Et un développement limité au premier ordre de (1) donne :

$$\varphi(\dot{x}(t), x(t), u(t)) = \varphi(0, x_e, u_e) + \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E \delta \dot{x}(t) + \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \mu} \right]_E \delta x(t) + \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \tau} \right]_E \delta y(t) \quad (2.25)$$

$$\omega(y(t), x(t), u(t)) = \varphi(y_e, x_e, u_e) + \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E \delta y(t) + \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \mu} \right]_E \delta x(t) + \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \tau} \right]_E \delta y(t) \quad (2.26)$$

Comme :  $\delta \dot{x}(t) = \frac{\partial \delta x(t)}{\partial t}$  lorsque  $\left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E$  et  $\left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu)}{\delta \mu} \right]_E$

sont régulières, on obtient l'équation linéarisée autour du point de fonctionnement :

$$\dot{x}(t) = A\delta x(t) + B\delta u(t) \quad (2.27)$$

$$\delta y(t) = C\delta x(t) + D\delta u(t)$$

Avec :

$$A = - \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E^{-1} \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \mu} \right]_E, B = - \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E^{-1} \left[ \frac{\delta \varphi(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \tau} \right]_E \quad (2.28)$$

$$C = - \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E^{-1} \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \mu} \right]_E, D = - \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \sigma} \right]_E^{-1} \left[ \frac{\delta \omega(\sigma, \mu, \tau)}{\delta \tau} \right]_E$$

Cette relation est appelée équation d'état car elle ne fait apparaître que des dérivées d'ordre 1.

### Exemple :

Considérons le système proie-prédateurs de Lotka-Volterra,

$$S = \begin{cases} \dot{x} = (1 - z)x \\ \dot{z} = (x - 1)z \end{cases} \quad (2.29)$$

Rappelons que  $\begin{pmatrix} x_e \\ z_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

est un point d'équilibre Autour de ce dernier. On utilisant l'équation (2.29), on obtient ce qui suit :

$$y = f(x_e, z_e) + \left[ \frac{\partial f(x, z)}{\partial x} \right]_{x_e, z_e} (x - x_e) + \left[ \frac{\partial f(x, z)}{\partial z} \right]_{x_e, z_e} (z - z_e) \quad (2.30)$$

$$= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 - z_e & -x_e \\ z_e & -1 + x_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_e \\ z - z_e \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - 1 \\ z - 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -z + 1 \\ x - 1 \end{pmatrix}$$

## 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement quelques éléments de base sur la représentation des systèmes dynamiques non linéaires et la méthodologie à suivre pour linéariser ces modèles. On a vu aussi que la linéarisation d'un système non linéaire autour d'un point de fonctionnement.

Cette dernière partie a donné une explication bien détaillée de Linéarisation entrée sortie.

# **Chapitre 03:**

## **Observateur à entrées inconnues**

## 1. Introduction

La disponibilité des toutes les variables d'états pour la mesure directe est rarement vérifiée dans la pratique. Il existe dans la plupart des cas un vrai besoin d'une observation fiable des variables non mesurées, particulièrement quand elles sont employées pour la synthèse de lois de commande ou pour la surveillance des processus. En effet, l'état d'un système peut correspondre à une grandeur physique que l'on ne peut pas toujours mesurer directement ; l'élaboration d'une loi de commande ou la détermination d'une défaillance d'un composant d'un système passent souvent par l'accès à la valeur d'un ou plusieurs de ses états. Pour cela, il s'avère nécessaire de concevoir un système auxiliaire appelé, observateur, qui se charge de reconstruire les états non mesurables en exploitant les informations disponibles, à savoir le modèle dynamique du système, ses sorties mesurées et éventuellement ses entrées.

Dans cette section nous allons présenter quelques méthodes de synthèse d'observateurs pour les systèmes linéaires. Mais auparavant, nous allons parler d'un concept important dans le domaine de la reconstruction d'état, qui est celui de l'observabilité [24].

## 2. Observateur d'état

**Définition01 :** (Observateur)

On appelle un observateur du système dynamique (1.1) tout système dynamique auxiliaire sous la forme suivante [23] :

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{f}(\hat{x}(t), u(t), y(t))$$

**Définition02 :** Un observateur ou reconstituteur d'état est un système dynamique qui permet d'obtenir une estimation de la valeur courante de l'état non mesuré d'un système à partir des informations antérieures sur les entrées et la sortie de ce dernier [31].

### 2.1. Structure d'un observateur

Dans cette structure le banc est constitué d'un seul observateur. Il est synthétisé de façon à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraires, elles seront exactes [6].

La figure représente Structure simple d'observateur :

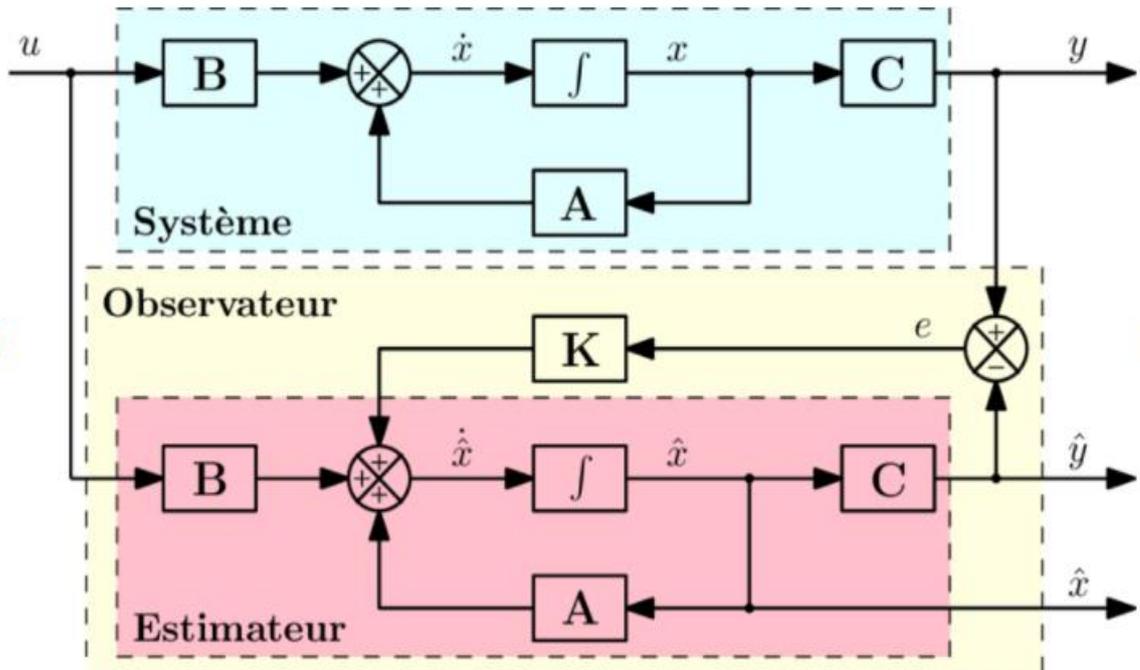


Figure 3.1 Structure simple d'observateur

## 2.2. Classification des observateurs

Il existe de nombreuses techniques d'observation. Elles sont différents en fonction de la nature du système considéré linéaire ou non linéaire [14].

### 2.2.1. Observateurs du système linéaire de Luenberger

Soit le système linéaire stationnaire suivant :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1)$$

$$\hat{y}(t) = Cx(t)$$

La théorie de l'observateur de Luenberger repose essentiellement sur des techniques déplacements de pôles. On se place dans le cas déterministe, ou les bruit  $w$  et  $v$  sont nuls, Luenberger propose l'observateur dynamique suivant pour le système :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + (y(t) - \hat{y}(t))k \quad (3.2)$$

$$y(t) = C\hat{x}(t) + v(t)$$

Ou  $k \in R^{n \times p}$  est le gain de l'observateur.

Le schéma bloc de l'observateur est illustré par la figure (3.1). L'erreur d'estimation est donnée par [10] :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.3)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation :

$$\dot{e}(t) = (A - kC)e(t) \quad [6] \quad (3.4)$$

En utilisant une technique de placement des pôles, il suffit alors de choisir le gain  $K$  de l'observateur de tel sort que les valeurs propres de la matrice  $A - kC$  soient dans le demi-plan complexe gauche.

Pour ce type d'observateur, une grande liberté est laissée au choix des valeurs propres, mais en pratique on choisit une dynamique d'erreurs plus rapide que celle du processus.

Il faut noter qu'en présence des bruits  $w, v$  la dynamique de l'erreur est :

$$\dot{e}(t) = (A - kC)e(t) + Lw(t) - kv(t) \quad (3.5)$$

Cette erreur est donc sensible aux bruits par l'intermédiaire des deux fonctions de transfert

$$(sI - A + kC)^{-1}L(-sI + A - kC)^{-1}k \quad [7]. \quad (3.6)$$

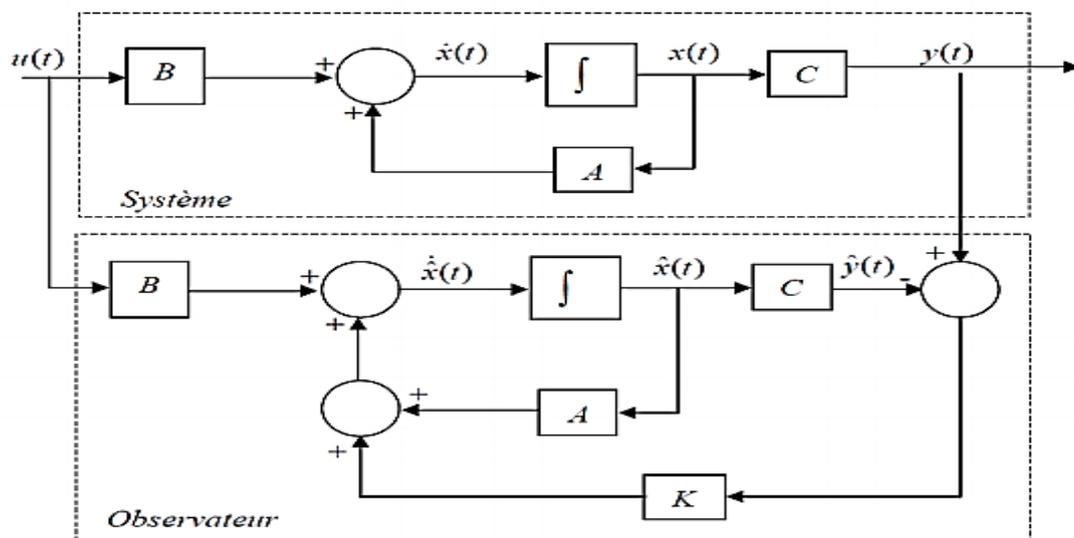


Figure 3.2: Schéma fonctionnel de l'observateur de Luenberger

### 2.2.2. Observateur à entrées inconnues

La théorie d'observateur à entrées inconnues est applicable à la classe des systèmes linéaires (3.1). Seulement cette fois, les entrées inconnues interviennent dans le modèle du système [14].

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

Ou  $d \in R^q$  est une entrée inconnue, on suppose que la matrice E est de plein rang colonne et que la paire (A, C) est observable.

$$C = (I_p \quad 0 \quad \dots \quad 0) \quad (3.8)$$

$$E = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}$$

$$\text{Rang}(E) = p$$

#### 2.2.2.1. Reconstruction de l'observateur à entrées inconnues

La reconstruction de l'état d'un système dynamique linéaire dont une partie des entrées n'est pas mesurable a un grand intérêt dans la pratique. Dans de telles circonstances, un observateur conventionnel, qui exige la connaissance de toutes les entrées, ne peut pas être utilisé directement. L'observateur à entrées inconnues (UIO) a été développé pour estimer l'état d'un système, en dépit de l'existence des entrées inconnues ou des perturbations en les éliminant dans les équations d'état [29].

##### 2.2.2.1.1. Principe de reconstruction de l'observateur à entrées inconnues :

L'observateur à entrées inconnues peut être représenté comme suit :

$$\begin{cases} \dot{Z}(t) = NZ(t) + Mu(t) + Ly(t) \\ \hat{x}(t) = Z(t) - Ey(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

$Z(t) \in \mathcal{R}^n$  est une variable interne à l'observateur,  $\hat{x} \in \mathcal{R}^n$  est l'estimation du vecteur d'état.  $N \in \mathcal{R}^{n \times n}$ ,  $M \in \mathcal{R}^{n \times u}$ ,  $E \in \mathcal{R}^{n \times p}$ ,  $L \in \mathcal{R}^{n \times p}$  sont des matrices à déterminer de telle sorte que l'erreur d'observation soit asymptotiquement nulle.

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

$$\begin{aligned}\dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ &= (I + EC)\dot{x} - \dot{z}\end{aligned}\quad (3.10)$$

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

$$\dot{e} = (I + EC)(Ax + Bu + Rf) - (Nz - Ly) \quad (3.12)$$

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

$$\dot{e} = (I + EC)(Ax + Bu + Rf) - (N\hat{x} - Mu + (LC + NEC)x) \quad (3.13)$$

En posant

$$P = I + EC \quad (3.14)$$

On obtient

$$\dot{e} = Ne + (PB - M)u + PRF + (PA - NP - LC)x \quad (3.15)$$

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

*N est une matrice stable (matrice de Hurwitz)*

$$PR = (I + EC)R = 0 \quad (3.16)$$

$$M = PB = (I + EC)B$$

$$LC = PA - NP \quad (3.12)$$

Sous ces conditions :

$$\dot{e} = Ne \quad (3.13)$$

Nous allons maintenant étudier les conditions de détermination des matrices N, E et L.

**– Détermination de la matrice E**

La matrice E est déterminée à partir de la deuxième équation de (3.13). On a  $(I + EC)R = 0$ .

On peut en déduire que  $ECR = -R$ . Une solution numérique possible (non unique) peut s'écrire en utilisant l'expression de la pseudo-inverse de la matrice CR, de rang plein ligne :

$$(CR)^+ = (CR)^T [(CR)(CR)^T]^{-1} \quad (3.14)$$

$$E = -R(CR)^+ + Y(I - (CR)(CR)^+)$$

Où Y est une matrice arbitraire.

**-Détermination de la matrice P**

La matrice P peut s'exprimer à partir de l'équation (3.14) et en utilisant le résultat précédent

$$P = I + (-R(CR)^+ + Y((CR)(CR)^+))C \quad (3.15)$$

$$= I + YC - (I + YC)R(CR)^+C$$

$$= (I + YC)[I - R(CR)^T [(CR)(CR)^T]^{-1}C]$$

**– Détermination de la matrice M**

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

$$M = (I + YC)[I - R(CR)^T [(CR)(CR)^T]^{-1}C]B \quad (3.16)$$

**– Détermination de la matrice L**

La matrice L est déterminée à partir de la dernière relation de (3.17)

$$NP + LC - PA = 0 \quad (3.18)$$

En utilisant l'expression de P (3.18),

$$N(I + EC) + LC - PA = 0 \quad (3.19)$$

Il est possible de procéder au développement suivant :

$$N = PA - NEC - LC \quad (3.20)$$

$$PA - (NE + L)C$$

$$PA - KC$$

Posons la variable K telle que :

$$K = NE + L \quad (3.21)$$

Nous remplaçons N par son expression (3.21) dans l'équation (3.22) et nous trouvons :

$$K = (PA - KC)E + L \quad (3.22)$$

Ce qui donne l'expression de la matrice L :

$$L = K(I + CE) - PAE \quad (3.23)$$

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

#### – Détermination de la matrice la matrice N

Pour que l'erreur d'observation soit asymptotiquement stable, la matrice N doit être choisie judicieusement (3.23). Conformément au théorème de Lyapunov la convergence de l'observateur est garantie s'il existe une fonction  $V(e)$  telle que

$$\forall e \neq 0 \begin{cases} V(e) > 0 \\ \dot{V}(e) < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

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

$$\forall e \neq 0 \begin{cases} X > 0 \\ N^T X + X N < 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

Comme  $N = P A - K C$  (équation (2.31) devient :

$$(PA - KC)^T X + X(PA - KC) < 0 [27] \quad (3.26)$$

### 2.2.2. Méthode de résolution par changement de variables

Des méthodes de résolution ont été proposées pour résoudre l'inégalité matricielles non linéaires et en particulier bilinéaires [29].

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

$$W = XK \quad (3.27)$$

Pour obtenir l'inégalité suivante :

$$(PA)^T X + X(PA) - (C^T W^T + WC) < 0 \quad (3.28)$$

La solution du problème initial est obtenue en deux étapes. On résout tout d'abord l'inégalité matricielle linéaire (2.15) par rapport aux inconnues  $X$  et  $W$ . On déduit ensuite la valeur du gain  $K$  par la formule :

$$K = X^{-1}W [29] \quad (3.29)$$

### 2.2.3. Placement de pôles

Dans cette section on va améliorer les performances de l'observateur Proportionnel intégral, notamment en ce qui concerne la vitesse de convergence vers zéro de l'erreur d'estimation. La dynamique de l'observateur proposé est choisie de telle manière qu'elle soit sensiblement plus rapide que celle du multi-modèle. Alors, on définit dans le plan complexe la région  $\mathfrak{D}(\alpha, r)$  comme l'intersection entre un disque, de centre  $(0, 0)$  et de rayons  $r$ , et du demi-plan gauche limité par une droite d'abscisse  $-\alpha$ , nous énonçons le corollaire suivant:

#### Théorème 1:

Les erreurs d'estimation d'état et d'entrées inconnues convergent asymptotiquement vers zéro avec un placement des pôles dans une région  $\mathfrak{D}$  du plan complexe, s'il existe une matrice symétrique et définie positive  $P \in \mathfrak{R}^{(n+l) \times (n+l)}$  est une matrice  $M^a \in \mathfrak{R}^{(n+l) \times (m)}$  tel que les LMIs suivantes soient vérifiées:[23].

$$\{A_i^a\}^T P + P A_i^a = C^a \{M^a\}^T = M^a C^a + 2\alpha P < 0 \quad (3.30)$$

$$\begin{array}{cc} -rP & P A_i^a - M^a C^a \\ \{A_i^a\}^T P - C^a \{M^a\}^T & -rp \end{array} < 0 \quad (3.31)$$

### 2.2.4. Méthode de Chen & Patton:

Pour le système (II.12) on dit qu'un observateur est à entrées inconnues si l'erreur d'estimation tend vers zéro en présence d'entrées inconnues. Sa structure est donnée par [22, 28]:

$$\begin{cases} \dot{Z}(t) = FZ(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x} = Z(t) + Hy(t) \end{cases} \quad (3.32)$$

On  $Z(t) \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur d'état de l'observateur et  $\hat{x} \in \mathfrak{R}^n$  est le vecteur d'état estimé du système, les matrices F, T, K et H qui seront déterminées pour stabiliser l'observateur et

Découpler les entrées inconnues. En posant  $K = K_1 + K_2$ , la dérivée de l'erreur d'estimation par rapport au temps sera donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= (A - HCA - K_1C)e(t) - (F - (A - HCA - K_1C)z(t) - (T - (I - HC))Bu(t) \\ &\quad - (I - HC)Ed(t) - [K_2 - (A - HCA - K_1C)H]y(t) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Ainsi les conditions permettant le découplage de l'entrée inconnue sont :

$$\begin{aligned} (HC - I)E &= 0 \\ T &= I - HC \\ F &= A - HCA - K_1C \\ K_2 &= FH \\ K &= K_1 + K_2 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Si ces conditions sont satisfaites alors l'erreur dynamique sera :

$$\dot{e}(t) = Fe(t) \quad (3.34)$$

Afin que l'erreur d'estimation tende asymptotiquement vers zéro, les valeurs propres de F doivent être à partie réelle négative. Les conditions nécessaires et suffisantes pour l'existence d'un tel observateur pour un système décrit par l'équation (3.12) sont [13]:

- 1)  $Rang(CE) = Rang(E)$
- 2)  $(C, A_l)$  est stable,  $A_l = A - E[(CE)^T(CE)]^{-1}(CE)^TCA$  (3.35)

La première condition signifie que le nombre de lignes linéairement indépendantes de la matrice C ne doit pas être inférieur au nombre de colonnes linéairement indépendantes de la matrice E, c'est-à-dire, le nombre de mesures indépendantes doit être supérieur ou égal au nombre d'entrées inconnues à découpler [24].

### 3. Exemple 01:

Considérons un système dynamique linéaire à entrées inconnues modélisé de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y = Cx(t) \end{cases} \quad (3.36)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.2 & 0.1 & 0.01 \\ 0.1 & -0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & -0.5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 1 \quad 1]$$

On notera que la matrice E est de plein rang colonne et que la paire (A, C) est observable. L'observateur d'état qui reconstruit complètement le vecteur d'état du système (3.36) est le suivant :

$$\begin{aligned} \dot{Z}(t) &= NZ(t) + MBu(t) + Ly(t) \\ \hat{x} &= Z(t) - Ey(t) \end{aligned} \quad (3.37)$$

En utilisant la deuxième méthode de résolution (changement de variables) [29] :

$$\begin{aligned} E &= -R(CR)^T((CR)(CR)^T)^{-1} \\ P &= I - R(CR)^T((CR)(CR)^T)^{-1}C \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$G = PB$$

$$N = PA - KC$$

$$L = K - NE$$

$$(PA)X^T + X(PA) - (C^T W^T + WC) < 0 \quad (3.39)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.66 & -0.33 & -0.33 \\ -0.33 & 0.66 & -0.33 \\ -0.33 & -0.33 & 0.66 \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} -0.33 \\ -0.33 \\ -0.33 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} -0.41 & -0.08 & -0.01 \\ 0.23 & -0.03 & 0.33 \\ 0.003 & -0.06 & -0.5 \end{bmatrix} K = \begin{bmatrix} 0.35 \\ -0.34 \\ 0.35 \end{bmatrix} G = \begin{bmatrix} -0.33 \\ -0.16 \\ 0.16 \end{bmatrix} K = \begin{bmatrix} 0.18 \\ -0.16 \\ 0.16 \end{bmatrix}$$

### 5. Exemple 02 :

Considérons un système dynamique linéaire à entrées inconnues modélise de la façon suivante :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (3.40)$$

$$y = Cx(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} B = [0 \quad 1 \quad 0] C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Les figures (3.3), (3.4) représentent respectivement les sorties  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  :

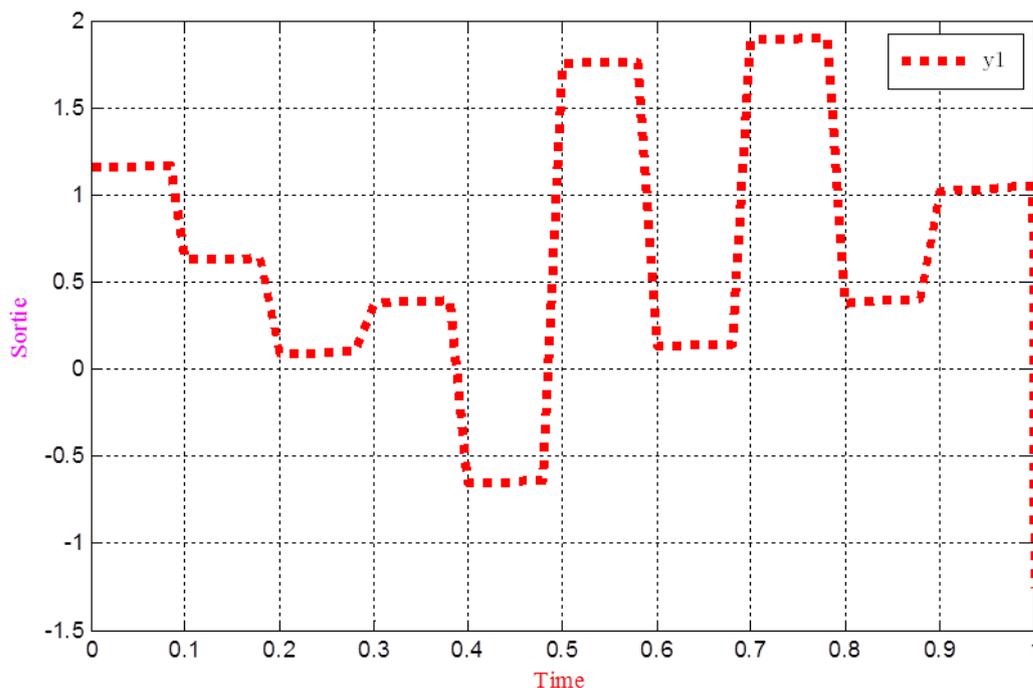


Figure 3.3 : Evolution de la sortie y1 de système linéaire

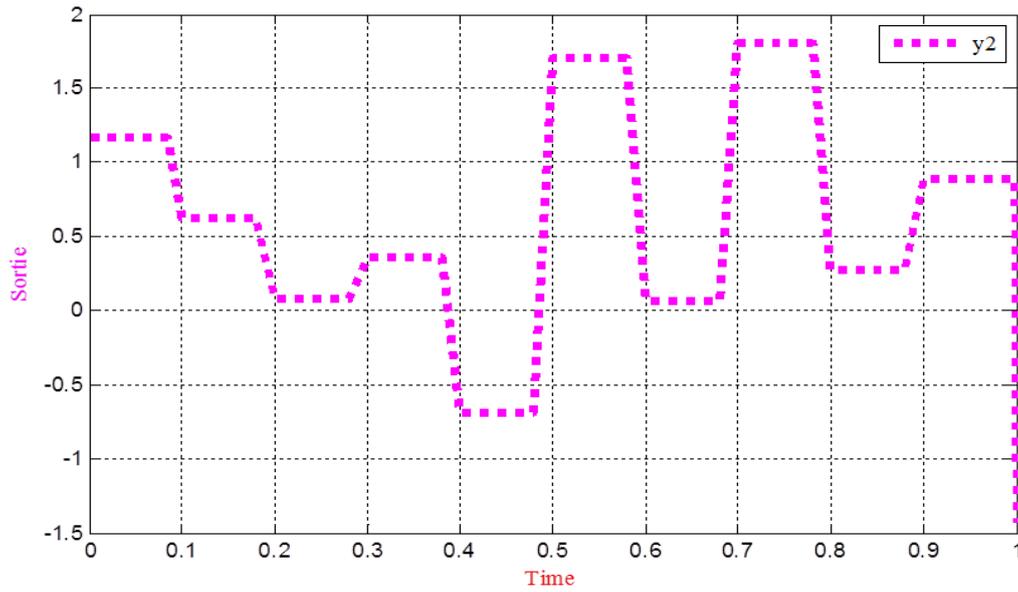


Figure 3.4 : Evolution de la sortie y2 de système linéaire

On notera que la matrice  $E$  est de plein rang colonne et que la paire  $(A, C)$  est observable.

L'observateur d'état qui reconstruit complètement le vecteur d'état du système (3.6) est le suivant :

$$\dot{Z}(t) = FZ(t) + TBu(t) + Ky(t) \quad (3.41)$$

$$\hat{x} = Z(t) + Hy(t)$$

On utilisant l'équation (2-23) pour calcul les matrices de l'observateur (UIO) on obtient :

$$H = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.5000 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.5000 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}, \quad A1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.5000 & 0.5000 \\ -1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & -1.0000 & -1.0000 \end{bmatrix}, \quad VP_A = \begin{bmatrix} -1.0000 \\ -0.5000 + 0.8660i \\ -0.5000 - 0.8660i \end{bmatrix}$$

$$P = [-5 \quad -4 \quad -7], \quad K11 = \begin{bmatrix} 8.1526 & 32.8802 & -11.2464 \\ -1.8861 & -22.1215 & 8.7334 \end{bmatrix}$$

$$K1 = \begin{bmatrix} 8.1526 & -1.8861 \\ 32.8802 & -22.1215 \\ -11.2464 & 8.7334 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -6.2666 & 0.5000 & 2.3861 \\ -11.7586 & 0 & 22.1215 \\ 2.5130 & -1.0000 & -9.7334 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 5.0193 & -5.0193 \\ 27.0009 & -28.0009 \\ -9.9899 & 9.9899 \end{bmatrix}, \quad K2 = \begin{bmatrix} -3.1333 & -3.1333 \\ -5.8793 & -5.8793 \\ 1.2565 & 1.2565 \end{bmatrix}$$

Le schéma bloc sur Simulink est donné dans les Figure (3.5) :

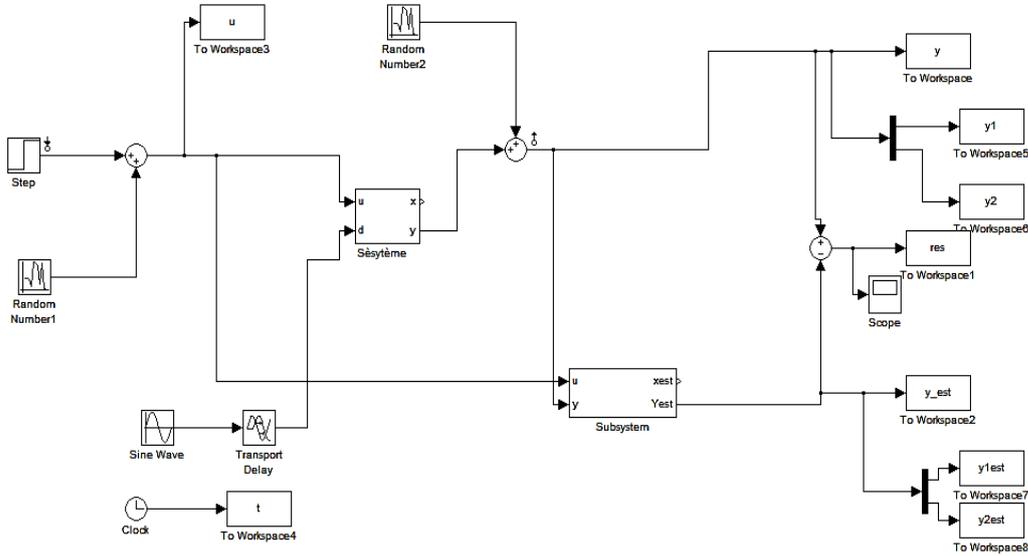


Figure 3.5. : Schéma de simulation

Les figures (3.5), (3.6) représentent respectivement les sorties d'estimation par l'observateur (UIO) :

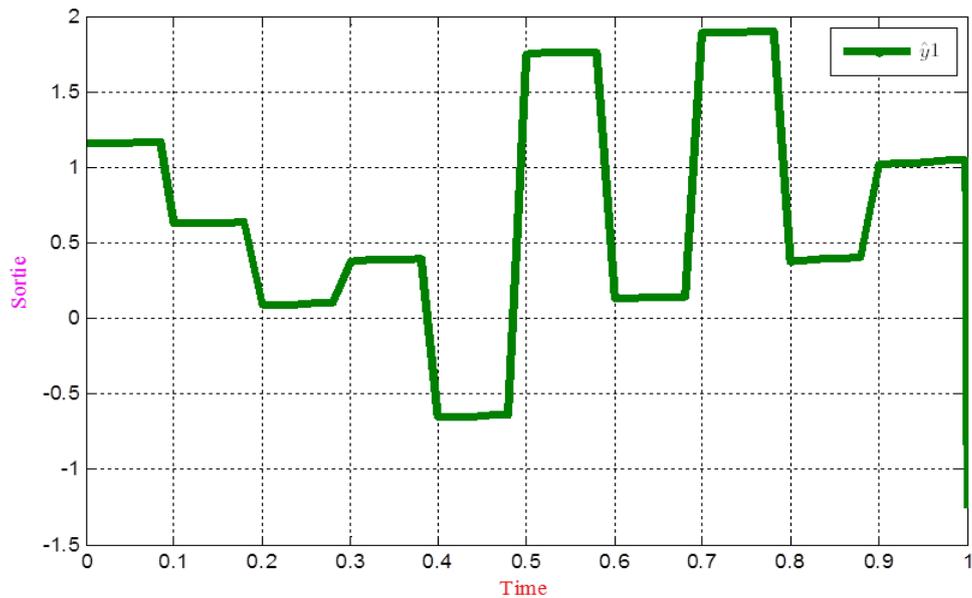


Figure 3.6 : Sortie  $\hat{y}_1$  d'estimation de UIO

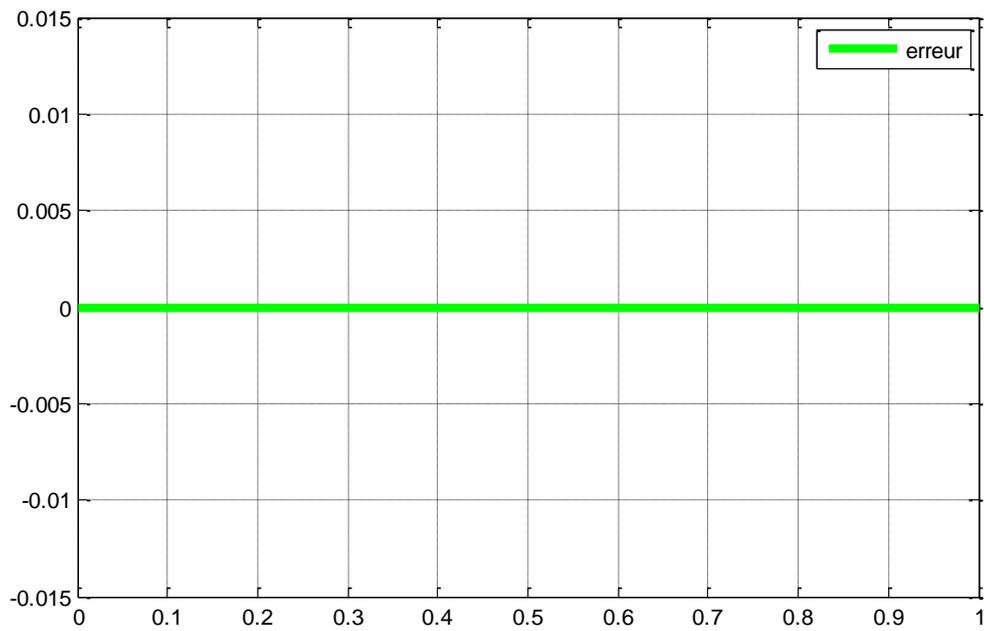
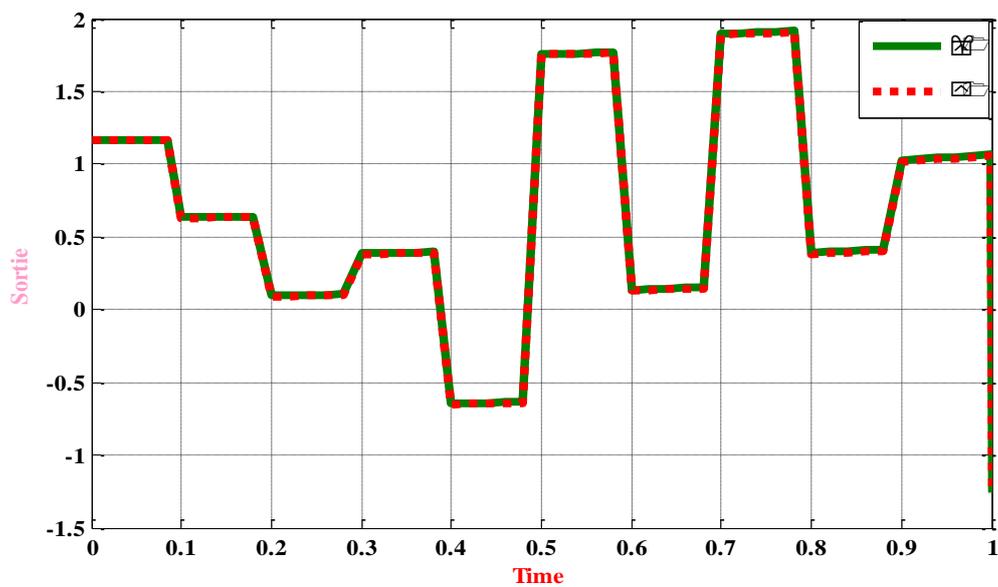


Figure 3.7 : Evolution d'erreur d'estimation

Les figures (3.5), (3.6) représentent respectivement les sorties  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  et leurs estimations par l'observateur  $\hat{y}_1(t)$  et  $\hat{y}_2$  :

Figure 3.8 : Evolution de la Sortie  $y_1$  et son estimation  $\hat{y}_1$

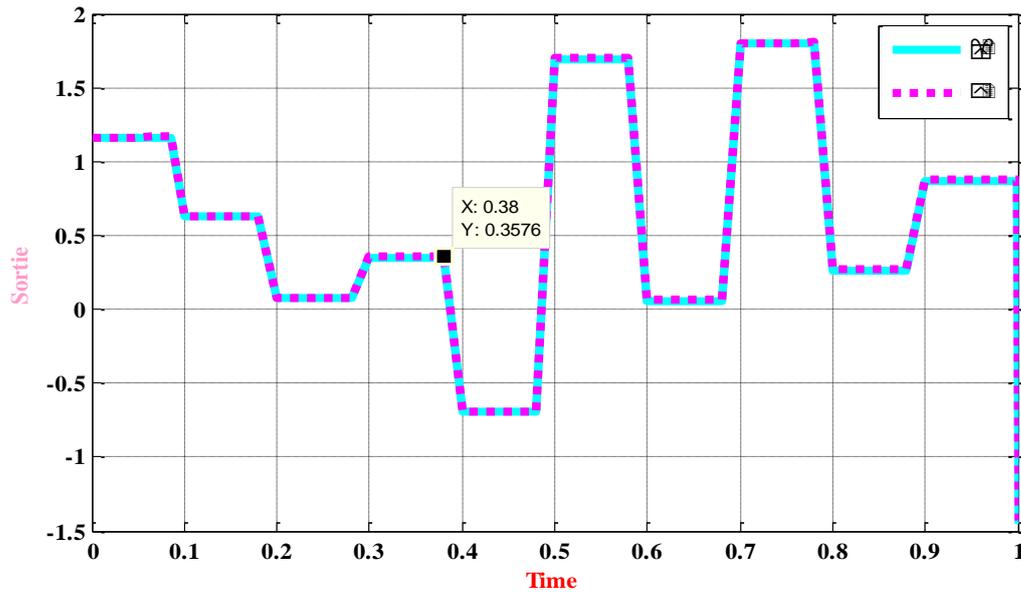


Figure 3.9 : Evolution de la Sortie  $y_1$  et son estimation  $\hat{y}_1$

Montre les mesures du système ' $y_1, y_2$ ' et les sorties d'estimation par l'observateur UIO''  $\hat{y}_1(t), \hat{y}_2(t)$ ' avec les erreurs d'estimation. On remarque que les erreurs sont statistiquement nulles, ce qui signifie une bonne qualité d'estimation.

## 6. Conclusion

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

## **Chapitre 04 : Estimation d'état du système trois Cuves**

## 1. Introduction

La détection et l'identification des pannes dans les systèmes dynamiques, c'est à dire leur diagnostic, a été un sujet important de recherche dès les débuts de l'Automatique moderne basée sur le calcul numérique. Ainsi de nombreuses approches ont été développées. Les différentes approches du diagnostic des systèmes dynamiques semblent être souvent le résultat de contextes différents notamment en ce qui concerne les applications visées et le cahier des charges qui en résulte. Ainsi, la nature des informations disponibles sur le système ou le type de défauts à détecter conduisent à la mise en œuvre de stratégies spécifiques [22].

## 2. Notion de résidus

La détection de défaut passe par la génération d'un indicateur de défaut, couramment appelé résidu. Un résidu est un signal indicateur de défauts. Il reflète la cohérence des données mesurées vis-à-vis du modèle comportemental du système. Un générateur de résidu  $Q(s)$  est un système qui filtre les entrées  $U(s)$  et sorties  $Y(s)$  du système à surveiller et génère un signal appelé résidu (Nyberg and Nielsen, 1997).

$$R(s) = \begin{pmatrix} Y(s) \\ U(s) \end{pmatrix}$$

Généralement, lorsqu'un modèle est utilisé, seulement deux caractéristiques statistiques sont prises en compte pour caractériser le résidu : sa moyenne et/ou son écart type. En pratique, on génère des résidus ayant une moyenne nulle en fonctionnement normal et différents de zéro en fonctionnement défaillant. De façon plus générale, on cherche toujours à calculer un vecteur de résidus  $r(t)$  ayant les propriétés suivantes :  $r(t) = 0$  quand  $f(t) = 0$ .

- $r(t) \neq 0$  quand  $f(t) \neq 0$  pour la détection du défaut.
- $r_i(t) \neq 0$  et  $r_j = 0$  pour  $i \neq j$  quand  $f_i(t) \neq 0$  et  $f_j(t) = 0$  pour la localisation du défaut  $f_i(t)$ .
- $\lim_{t \rightarrow \infty} (f_i(t) - r_i(t)) = 0$  pour l'identification du défaut  $f_i(t)$ .

Trois méthodes principales sont utilisées pour mettre en œuvre un générateur de résidu.

## 2.1. Détection de défaut

Un seuil trop petit entraînera des fausses alarmes. La problématique est donc de trouver un seuil optimal qui constituera le compromis idéal entre le taux de fausses alarmes et le taux de non-détection. L'évaluation des résidus consiste donc à optimiser le problème de seuillage des résidus. L'approche classique consiste à établir des fonctions de décision selon la nature des résidus

Décision selon la nature des résidus :

- Si l'on cherche à déterminer la présence de bruits, on choisira l'analyse par tests statistiques.
- Si l'on considère la sensibilité des résidus aux défauts, l'évaluation des résidus  $r$  deviendra tel que : un problème de seuillage, i.e. la détermination d'un vecteur de seuils  $i_\varepsilon$  tel que :

$$\exists i : r_i(t) \geq i_\varepsilon$$

Pour un système en défaut,

$$\forall i : r_i(t) < i_\varepsilon$$

Pour un système sans défaut.

La figure suivante représente le schéma représentant les différentes étapes du diagnostic :

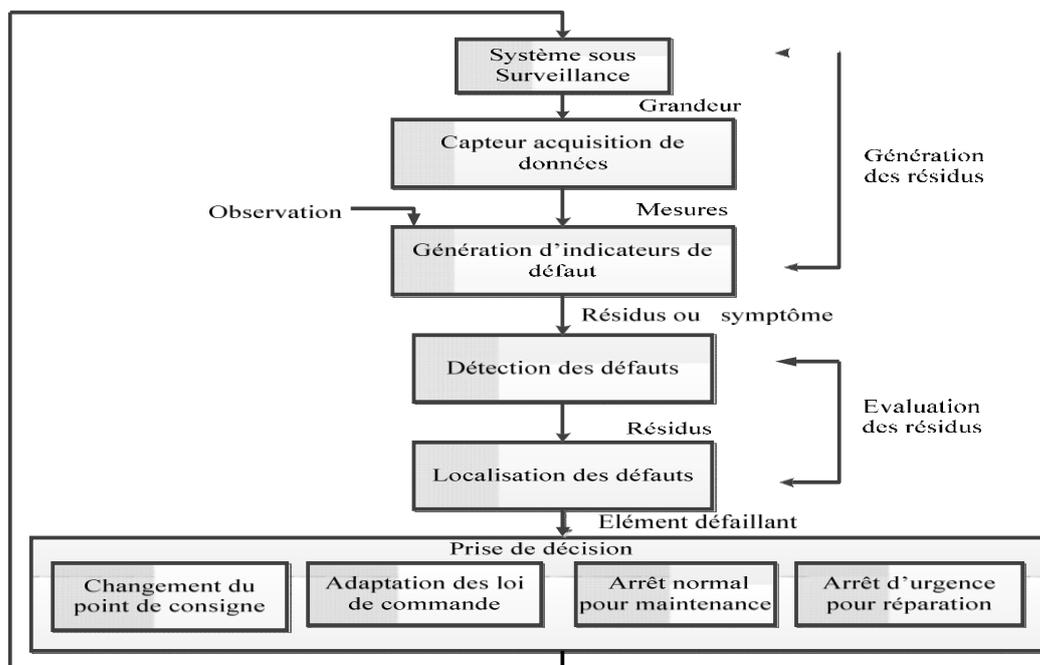


Figure 4 .1: Schéma représentant les différentes étapes du diagnostic

## 2.2. Localisation de défauts

Après la détection d'un défaut dans le système, il est important de pouvoir situer exactement le composant affecté. Cette étape s'appelle localisation ou isolation de défaut. Elle s'appuie fréquemment sur la génération de résidus de manière à ce qu'un ensemble de ces résidus soit sensible à certains défauts et insensible aux autres défauts. La génération des résidus sensibles à des combinaisons des défauts et une logique de décision adaptée, permet de localiser les défauts : Les résidus structurés et les résidus de directions privilégiées.

- Les résidus structurés sont construits de manière à être sensibles à un sous-ensemble de défauts et insensibles aux autres. Considérons par exemple un vecteur de résidus

$$r(t) \in R_{nr}$$

$$f(t) \in R_{nr}$$

En suivant cette démarche, un ensemble de résidus est généré de façon à considérer toutes les combinaisons possibles permettant la localisation de chaque défaut. Les sensibilités des résidus (résidus dépassant ou non le seuil de détection) sont répertoriées dans une table binaire appelée table de signatures théoriques. Si un résidu est sensible à un défaut, un 1 est mis dans la case correspondante dans la table, et s'il est insensible, un 0 est mis dans cette case. Après l'élaboration de la table de signatures théoriques, les résidus générés sont comparés à chaque instant à cette table afin de déclencher l'alarme correspondant à l'apparition d'un défaut sur l'élément affecté du système.

- Les résidus directionnels sont construits de manière à ce que le vecteur des résidus  $r(t)$  s'oriente selon une certaine direction dans l'espace des résidus, en présence de défauts.

Par exemple, le vecteur de résidus  $r_i(t)$  en réponse à un défaut  $f_i(t)$  s'oriente vers une direction particulière:

Où  $l$  est un vecteur constant appelé signature directionnelle du défaut  $f_i(t)$  et  $r_i(t)$  est une fonction scalaire qui dépend du défaut  $f_i(t)$ . Dans cette approche, la localisation est réalisée par la comparaison des directions des résidus à des signatures directionnelles théoriques obtenues a priori. L'inconvénient de cette méthode est que la localisation n'est possible que pour de grandes variations des projections car la comparaison consiste à étudier la proximité du vecteur de résidus à chaque instant aux vecteurs représentant les signatures théoriques [4].

Lorsqu'une défaillance est détectée, une procédure de localisation est utilisée pour permettre de déterminer son origine.

La procédure de localisation nécessite d'utiliser un ensemble (ou vecteur) de résidus. Pour permettre la localisation, le vecteur de résidus doit avoir un certain nombre de propriétés permettre de caractériser de manière unique chaque faute. Deux méthodes peuvent être utilisées [23] :

- La construction de **résidus directionnels**.
- La construction de **résidus structurés**.

### 3. Résidus directionnels:

L'idée de cette approche est de générer un résidu sous forme d'un vecteur. En réponse à un défaut donné, le vecteur résidu est orienté suivant une direction privilégiée de l'espace de résidus. Le vecteur de résidu  $r(t)$ , en réaction à un défaut  $f_i(t)$  s'exploite sous la forme :

$$r(t/f_i) = (\gamma_i(t)\rho_i \quad i \in \{1, 2, 3 \dots \dots \dots, n\} \quad (4.1)$$

Où  $\rho_i(t)$  est un vecteur nommé signature directionnelle du défaut  $i$  dans l'espace des résidus et  $\gamma_i(t)$  est une fonction scalaire qui dépend de l'amplitude de la dynamique du défaut [Gertler, 1998]. Ainsi, la localisation du défaut se réduit à la détermination de la signature la plus proche de la signature réelle obtenue par le calcul des vecteurs de résidus. La figure (4, 1) illustre l'exemple d'un problème de localisation de défauts en utilisant des résidus directionnels. Les vecteurs en trait plein représentent les signatures réelles du résidu à des instants différents. Les trois vecteurs en trait pointillé représentent les signatures directionnelles théoriques

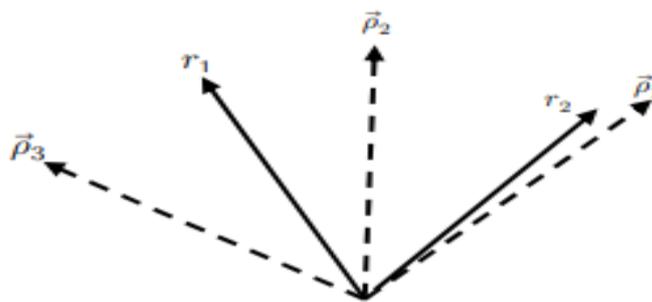


Figure 4.2: Localisation des défauts en utilisant des résidus directionnels

La signature réelle de  $r_2$  est très proche de la signature théorique du défaut 1. Cependant,  $r_2$  ne coïncide pas exactement avec  $\rho_1$  à cause des perturbations. Implicitement, l'influence des perturbations est considérée petite devant celle des défauts. Par contre, le résidu  $r_1$  est plus difficile à évaluer en étant aussi proche de  $\rho_1$  et  $\rho_3$  [16].

#### 4. Résidus structurés:

##### Définition 1 :

La structure d'un résidu  $r_i$  par rapport à un ensemble  $(\mathcal{F})$  de dimension  $\eta_f$  est le mot binaire  $M_{r_i}$  composé de  $\eta_f$  bits  $M_{ij}$  positionnés de la manière suivante :

$$M_{ij} = 1 \text{ si le résidu } r_i \text{ est affecté par le } j^{\text{ième}} \text{ élément de } \{\mathcal{F}\}$$

$$M_{ij} = 0 \text{ si le résidu } r_i \text{ est non affecté par le } j^{\text{ième}} \text{ élément de } \{\mathcal{F}\}$$

##### Définition 2 :

Affecté que par les défaillances  $\varphi_1$  et s'il robuste aux autres.

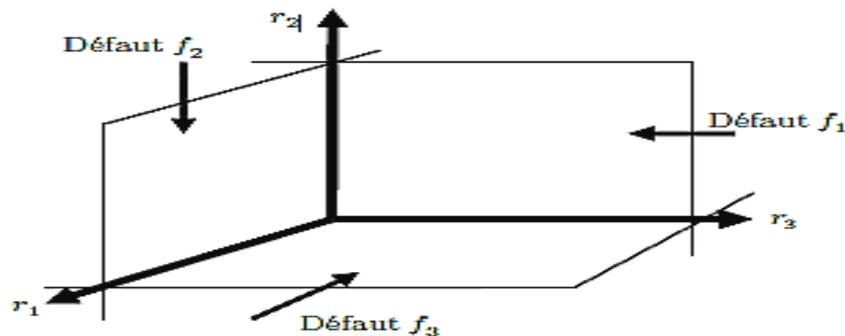


Figure 4.3: Résidus structurés.

#### 4. Principe de génération de résidus à base d'observateurs

Le principe de génération de résidu à base d'observateur consiste à estimer une partie ou l'ensemble des grandeurs mesurables du système à surveiller. Le résidu est calculé alors en faisant la différence, éventuellement filtrée, entre les sorties réelles et celles estimées. L'observateur revient alors à un modèle parallèle au système avec une contre réaction qui pondère l'écart de sortie. Ce principe est illustré sur la figure 2.3 Cette approche offre des propriétés très intéressantes car elle donne lieu à des résidus très flexibles et la souplesse, dans le choix des paramètres, permet de s'affranchir de certaines entrées inconnues, améliorant ainsi les caractéristiques des résidus telles que leur robustesse vis à vis des perturbations et leur sensibilité aux défauts [5].

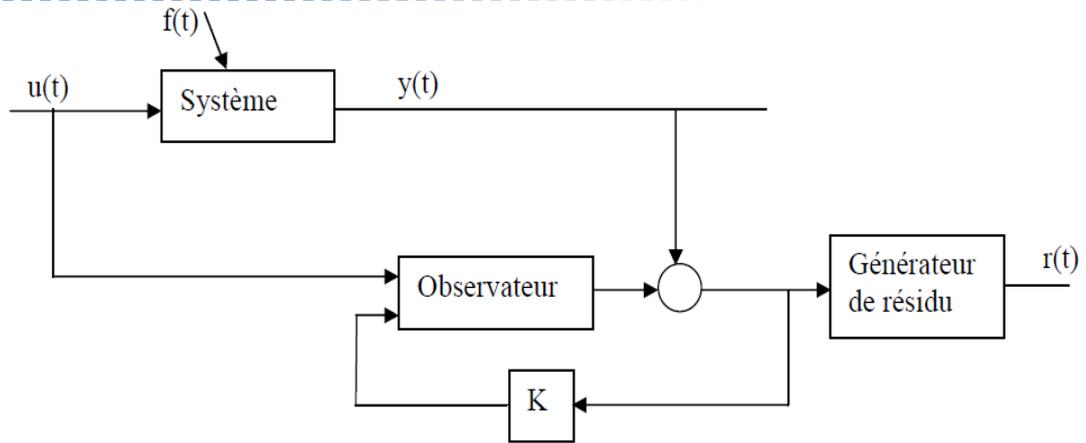


Figure 4.4 : Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs [5]

## 5. Structuration et évaluation des résidus générés à base d'observateur

Il est important d'obtenir une structure du résidu permettant son évaluation. Les résidus doivent être produits, de manière que pour chaque défaut un ou un ensemble de résidus soient affectés.

Cependant, même si l'apparition de défauts multiples est peu probable, les résidus doivent être capables de situer chacun des défauts arrivant simultanément, en occurrence, il devrait être garanti que le recouvrement des effets résultants de la combinaison des défauts ne mène pas à une décision fautive, par exemple détection manquée d'un défaut ou mauvaise isolation du défaut. Il existe plusieurs manières de définir les résidus structurés afin de parvenir à une évaluation correcte du résidu. Les résidus structurés sont conçus de manière à être chacun affecté par un sous ensemble de défaut et robuste (non affecté) par rapport aux défauts restantes. Ainsi, lorsqu'une défaillance apparaît, seul un sous ensemble de résidus réagit. Le résidu est dit structuré par rapport à un vecteur de défaillances  $1_f$  s'il n'est affecté que par les défaillances  $1_f$  et s'il est robuste aux autres. Dans la littérature, on distingue trois structures de génération de résidus à base d'observateur ou chacune est définie par un schéma particulier.

## 7. Détection des défauts par banc d'observateurs

La surveillance d'un système physique modélisé sous forme d'état, consiste à étudier la cohérence comportementale du modèle vis à vis du système réel. Une des approches permettant de réaliser ceci, consiste à comparer les variables mesurées avec les variables calculées ou estimées (en ligne) à partir du modèle lorsque celui-ci est soumis aux mêmes signaux d'entrée que ceux du système réel.

Le système permettant d'obtenir ces estimations est appelé un observateur. Par définition, un observateur est un système dynamique prenant pour entrées les signaux connus du système sur lequel il est implanté et dont les sorties convergent vers une estimation des variables d'état (ou d'une partie des variables d'Etat) [24].

Il est important d'obtenir une structure du résidu permettant son évaluation. Les résidus doivent être produits, de manière que pour chaque défaut un ou un ensemble de résidus soient affectés [4].

## 8. Structure d'observateurs simplifiés

Dans cette structure le banc est constitué d'un seul observateur. Il est synthétisé de façon n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraire, elles seront exactes [4].

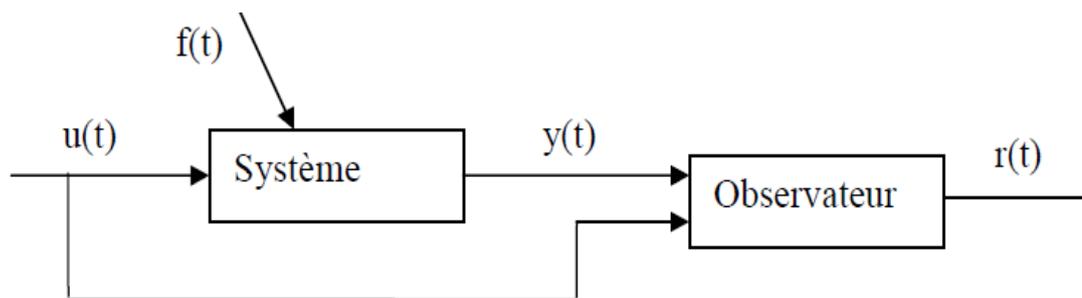


Figure 4.5 : Structure d'observateur simple.

## 9. Structure d'observateurs dédiés (DOS)

Dans ce type de structure, il est question de construire autant d'observateur que de défaut à détecter, chacun d'entre eux génère un résidu insensible à tous les défauts sauf un. Ainsi, l'observateur recevant une mesure défaillante fournit une mauvaise estimation des variables estimées, tandis que les estimations des autres observateurs convergent vers les mesures des sorties correspondantes sauf sur la sortie erronée. Ce schéma reste valable même dans le cas de plusieurs défauts simultanés.

### 9.1. Approche par observateur dédié (DOS)

Il est possible de concevoir des observateurs dont chacun est sensible à un seul défaut et de

Considérer les autres défauts comme des entrées inconnues (c.à.d. comme des perturbations).

Dans ce cas, chaque résidu est influencé par un seul défaut.

Tableau 4.1 : Signature des différents défauts sur les résidus obtenus par l'approche DOS.

	$f_1(t)$	$f_2(t)$	$f_3(t)$
$r_1(t)$	1	0	0
$r_2(t)$	0	1	0
$r_3(t)$	0	0	1

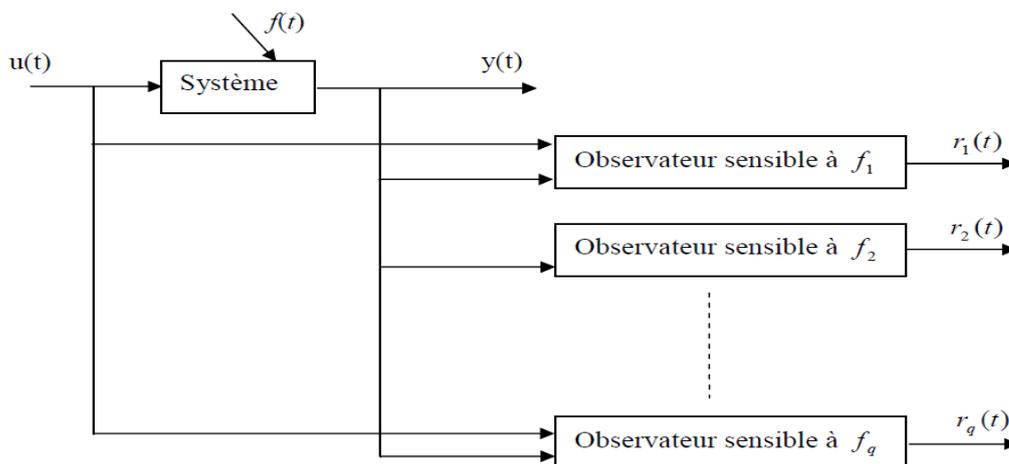


Figure 4.6: Structure d'observateurs dédiés.

Mais, si cette structure donne parfois des bons résultats sa conception reste très limitée car elle ne permet pas de s'affranchir des entrées inconnues et des bruits [5].

## 10. Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Dans ce genre de structure, il s'agit de synthétiser un certain nombre d'observateurs où chacun d'entre eux étant insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît alors, toutes les estimations d'états seront erronées sauf celles issues de l'observateur insensible à ce seul défaut. Ce schéma offre plus de degrés de liberté pour la conception de l'observateur et permet d'augmenter la robustesse.

Cependant, en plus de ne pas être généralement pas capables de résoudre les problèmes de localisation des défauts, La problématique de cette approche reste dans les interactions entre les sous-systèmes. En effet, si ces interactions sont faibles (voire nulle), un défaut n'affectera que l'estimation de l'observateur local correspondant. Il est alors possible de localiser le composant défaillant. En revanche, si les interactions sont grandes, un défaut d'un des composants se propagera aux observateurs des autres composants [5].

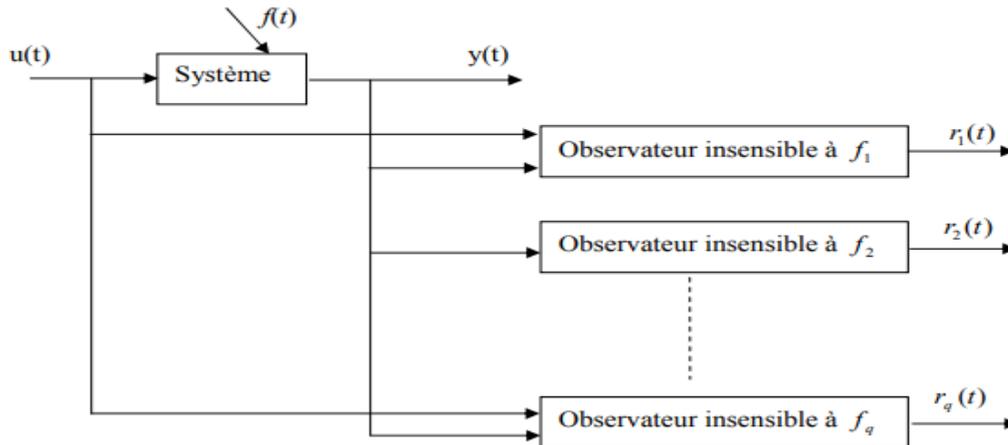


Figure 4.7 : Structure d'observateurs généralisée

### 10.1. Approche par observateur généralisé (GOS: Généralise Observer Schème)

L'approche par observateur dédié est séduisante par sa simplicité et permet l'isolation des défauts multiples et simultanés, mais les conditions d'existence de l'observateur à entrées inconnues deviennent plus contraignantes du fait d'un grand nombre d'entrées inconnues. Si cette approche n'est pas réalisable, on construit des observateurs sensibles à tous les défauts sauf un, qui est considéré comme une entrée inconnue. Dans ce cas, chaque résidu est influencé par tous les défauts excepté un seul [4].

Tableau 4.2 : Signature des différents défauts sur les résidus obtenus par l'approche GOS

	$f_1(t)$	$f_2(t)$	$f_3(t)$
$r_1(t)$	0	1	1
$r_2(t)$	1	0	1
$r_3(t)$	1	1	0

## 11. Système FDI dans les actionneurs

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

- **Défauts uniques**

Dans ce cas, le banc d'observateurs peut être construit suivant l'architecture GOS (Generalized Observer Schème) présentée sur la figure 2.6 Chaque résidu issu d'un UIO est insensible à un défaut actionneur particulier et sensible à tous les autres. Il est donc possible de détecter et localiser les défauts actionneurs lorsque ceux-ci interviennent séparément [15].

La première manière de représenter le défaut d'actionneur est la suivante [6] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + (B + \Delta B) u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

- **Défauts multiples**

Le banc d'observateurs pourra être construit suivant l'architecture DOS (Dédicace Observer Schème) présentée sur la figure 4.6 Chaque résidu issu d'un UIO est sensible à un et un seul défaut actionneur ce qui permet de détecter et localiser les défauts même quand ceux-ci surviennent simultanément [1].

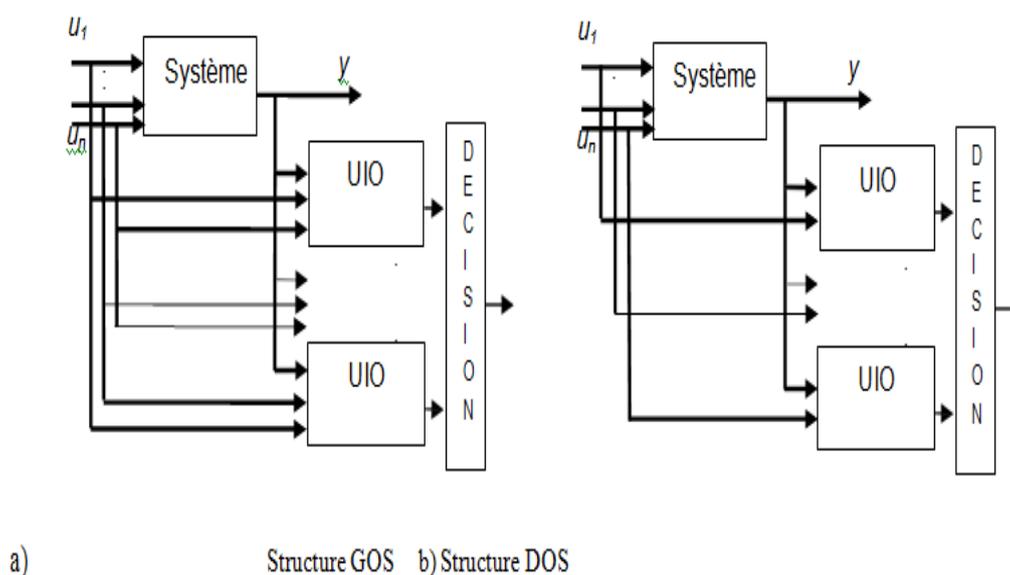


Figure 4.7. Localisation de défauts actionneurs

La seconde manière de représenter le défaut d'actionneur est de considérer le défaut comme un vecteur d'entrée inconnue. Pour cela, on considère l'entrée de commande globale de la manière suivante :

$$U_f(t) = \Gamma U(t) + U_{f_0}(t) \quad (4.3)$$

Où  $U$  et  $U_{f_0}$  sont respectivement l'entrée de commande globale appliquée au système et l'entrée de commande nominale pour le système défaillant.

On considérant :

$$U_f(t) = U_f(t) - U_0 \quad (4.4)$$

L'équation d'état est affectée par un défaut d'actionneur de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A x(t) + (B + \Delta B) u(t) \\ &= A x(t) + B (U_f(t) - U_0(t)) \\ &= A x(t) + B (\Gamma U(t) + U_{f_0}(t) - U_0(t)) \quad (4.4) \\ &= A x(t) + B u(t) + B (\Gamma U(t) + U_{f_0}(t) - U_0(t) - u(t)) \\ &= A x(t) + B u(t) + B ((\Gamma - I)U(t) + U_{f_0}(t)) \end{aligned} \quad (4.5)$$

On considérant l'équation (4.8), le défaut d'actionneur est représenté par un vecteur d'entrées inconnues  $f_a$ , ce qui donne le système suivant [6]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + E_a f_a(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

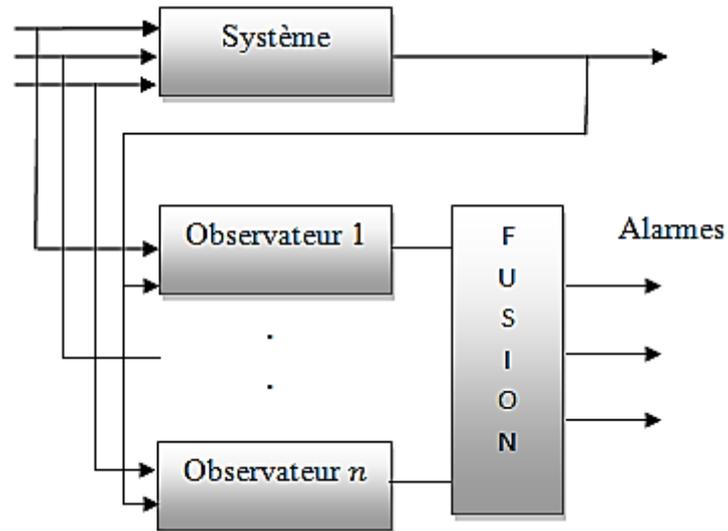


Figure 4.8: Observateur DOS pour la détection de défauts d'actionneur.

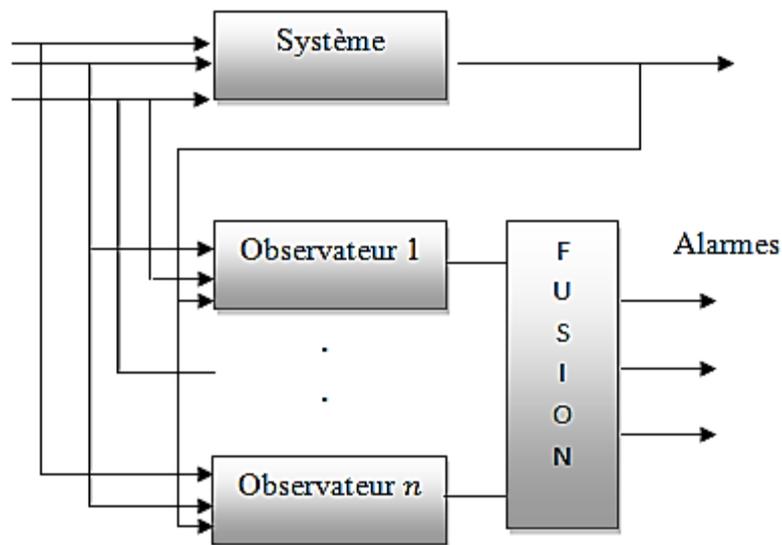


Figure 4.9: Observateur GOS pour la détection de défauts d'actionneur.

## 12. Système FDI dans les capteurs :

En représentation d'état, ces défauts sont modélisés par des termes additifs sur les composantes de la matrice de sortie. Deux hypothèses sont encore envisageables pour la construction d'UN banc d'observateurs suivant que les hypothèses de défauts uniques ou défauts multiples sont retenues [1].

- **Défauts uniques :**

Dans ce cas, le banc d'observateurs peut être construit selon l'architecture GOS présentée à la figure (IV.7.a) le  $i^{\text{ème}}$  observateur est piloté par toutes les sorties sauf la  $i^{\text{ème}}$ , et toutes les entrées. La sortie de cet observateur est donc sensible aux défauts de tous les capteurs sauf ceux de la  $i^{\text{ème}}$ . Il est donc possible de détecter et de localiser les défauts capteurs lorsque ceux-ci interviennent séparément [28]

- **Défauts multiples :**

le banc d'observateurs peut être construit selon le schéma DOS présenté sur la figure 4.6 . Chaque résidu issu d'un UIO est sensible à un et un seul défaut capteur ce qui permet de détecter et localiser les défauts actionneurs même lorsqu'ils surviennent de façon simultanée [15]

Tout comme les défauts actionneurs, on peut représenter les défauts de capteurs par un vecteur d'entrées inconnues, mais cette fois-ci, affectant les sorties [6] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) + E_c f_c(t) \end{cases} \quad (4.7)$$

Un défaut de capteur peut également être de nature multiplicative, ce qui se traduit par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (4.8)$$

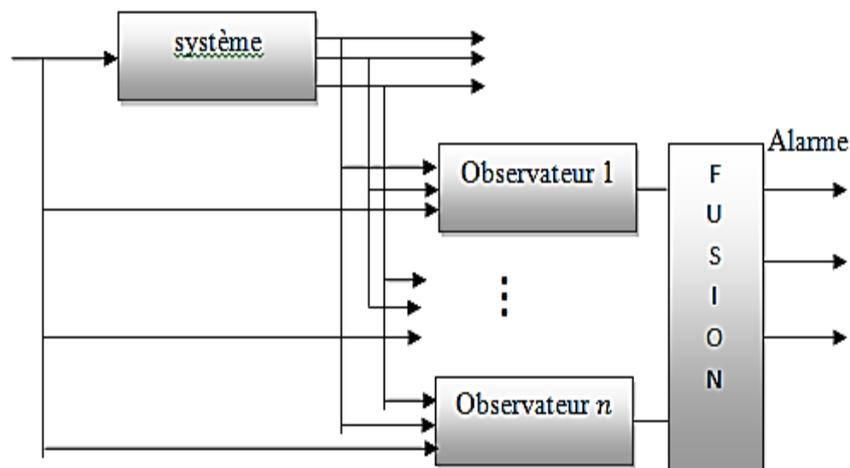


Figure 4.10 Observateur GOS pour la détection de défauts de capteurs

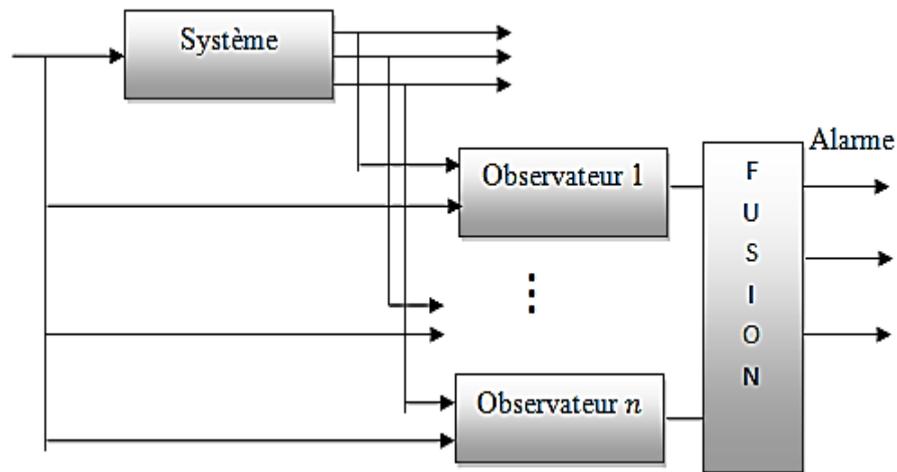


Figure 4.11 Observateur DOS pour la détection de défauts de capteurs.

### 13. Diagnostic du système trois cuves

#### 13.1. Présentation du système trois cuves

Le schéma de principe du système à trois cuves couplé est représenté à la figure (4.12) le premier bac est alimenté par un débit d'entrée  $q_e$  constant ( $2.78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ) contrôlé par une vanne régulé en débit dont on commande la consigne, les trois bacs 1, 2, 3 accompagné de débit de sorties  $q_{12}$ ,  $q_{23}$  respectivement, de section effective  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ . ils communiquent entre eux à travers des orifices de diamètre  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  et de section  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$  de coefficient de débit  $\alpha_d$ , on note aussi deux sorties de diamètres  $d_{s1}$ ,  $d_{s2}$  de sections  $\phi_{s1}$ ,  $\phi_{s2}$ . les variables d'états sont les niveaux de bacs  $(x_1, x_2, x_3)$ , la sortie est le niveau du bac numéro 1.

#### Remarque :

$q_{s1}$  et  $q_{s2}$  Sont considérés comme des defaults de notre système, comme chaque bac peut Avoir un défaut. Comme aussi on peut supposer qu'un seul bac qui peut contenir une Fail.

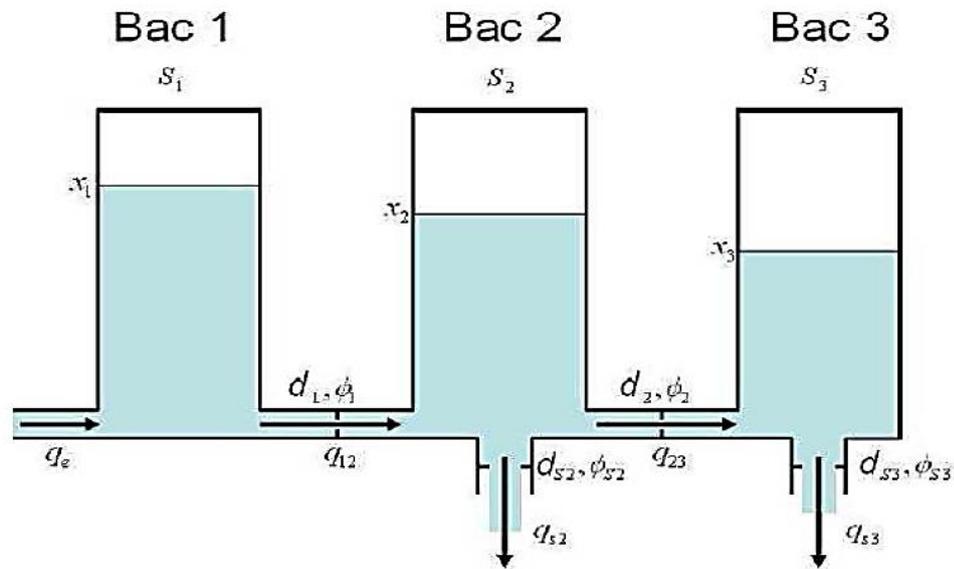


Figure 4.12 : Schématisation du système des 3 cuves

### 13.2 Modèle mathématique du système

Le système à trois réservoirs représentés en utilisant le bilan de masse est donné dans l'équation (4.9)

Le model non linéaire:

$$\begin{aligned}
 S_1 \frac{dx_1(t)}{dt} &= q_e(t) - q_{12}(t) \\
 S_2 \frac{dx_2(t)}{dt} &= q_{12}(t) - q_{s2}(t) - q_{23}(t) \\
 S_3 \frac{dx_3(t)}{dt} &= q_{23}(t) - q_{s3}(t)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Nous exprimons le débit sortant d'un bac  $i$  vers un bac  $j$  en fonction des différences entre les hauteurs d'eaux en amont et en aval par la relation de Bernoulli suivante:

$$q_{ij} = a_{ij} \sqrt{\Delta x} \tag{4.10}$$

Avec:

$a_{ij}$  Dépendant de la section  $\phi$  et de coefficient de débit moyen  $\alpha_d$  de la réalisation.

$$a_{ij} = \alpha_d \phi \sqrt{2g} \tag{4.11}$$

Nous considérons la hauteur d'eau du premier Bac comme étant la sortie de système.

Nous avons donc un système dynamique qui est représenté dans l'équation.

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(x, q_e)$$

$$F(x, q_e) = \begin{pmatrix} \frac{1}{S_1}(q_e(t) - a_{12}\sqrt{x_1 - x_2}) \\ \frac{1}{S_2}(-a_{23}\sqrt{x_2 - x_3} + a_{12}\sqrt{x_1 - x_2} - a_{S2}\sqrt{x_2}) \\ \frac{1}{S_3}(a_{23}\sqrt{x_2 - x_3} - a_{S3}\sqrt{x_3}) \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

La sortie du système est :  $y(t) = x_1(t)$

Les paramètres physiques du système à trois cuves sont disposés dans le tableau (4.3).

Tableau 4.3 : Paramètres de système trois cuves

Paramètres	Valeurs Numériques
Surface de la section du réservoir	$S_1 = S_2 = S_3 = 0.001310 \text{ m}^2$
Surface des tuyaux transversaux	$\phi_1 = 4.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2, \phi_2 = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ $\phi_{S2} = \phi_{S3} = 9.6211 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Débit de sortie de chaque tuyau	$q_{12} = 2.77 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s},$ $q_{S2} = 1.42 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$ $q_{23} = 1.35 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ $q_{S3} = 1.30 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$
Niveau maximal des réservoirs	$h = 0.2606 \text{ m} = 26.06 \text{ cm}$
Le débit d'entrée maximal	$q_{max} = 0.140 \text{ m}^3/\text{h} = 3.89 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$

### 13.3. Linéarisation du système à trois bacs

Considérons la linéarisation du modèle d'état à mesure continue présenté sans l'équation (4.13) :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.13)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

Où :

Le système est au point d'équilibre pour :

$$q_e = q_{ee} = 100 L/h = 2.78 \times 10^{-5} m^3 / s$$

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{dx_3(t)}{dt}$$

Ce qui a imposé pour le point d'équilibre:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{10} = \left(\frac{q_{ee}}{a_{12}}\right)^2 + x_{20} \\ x_{20} = \frac{q_{ee}}{a_{S2}^2 + a_{S3}^2 \beta + 2a_{S2}a_{S3}\sqrt{\beta}} \\ x_{30} = \beta x_{20} \end{array} \right. \quad (4.14)$$

Avec :

$$\beta = \frac{a_{23}^2}{(a_{S3})^2 + a_{23}^2} \quad (4.15)$$

On trouve :

$$50 \text{ cm} > x_{10} = 0.2606 \text{ m} > x_{20} = 0.2148 \text{ m} > x_{30} = 0.1803 \text{ m}$$

Ce qui donne à obtenir une représentation d'état au tour de ce point d'équilibre, avec :

$$u = \Delta q_e$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{x_{i0}, q_{ee}}, B = \left. \frac{\partial F}{\partial q} \right|_{x_{i0}, q_{ee}}$$

$$C = \left. \frac{\partial G}{\partial x} \right|_{x_{i0}, q_{ee}}, D = \left. \frac{\partial G}{\partial q} \right|_{x_{i0}, q_{ee}}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-a_{12}}{2s_1\sqrt{x_1-x_2}} & \frac{-a_{12}}{2s_1\sqrt{x_1-x_2}} & 0 \\ \frac{a_{12}}{2s_1} & \frac{z}{2s_2} & \frac{a_{23}}{2s_2\sqrt{x_2-x_3}} \\ 0 & \frac{a_{23}}{2s_2\sqrt{x_2-x_3}} & \frac{r}{2s_3} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Avec :

$$Z = \frac{-a_{23}}{\sqrt{x_2-x_3}} - \frac{-a_{12}}{\sqrt{x_1-x_2}} - \frac{as_2}{\sqrt{x_2}} \quad (4.17)$$

$$r = \frac{-a_{23}}{\sqrt{x_2-x_3}} - \frac{as_3}{\sqrt{x_3}} \quad (4.18)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ s_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$F_1 = \frac{\partial x_1}{\partial t}, F_2 = \frac{\partial x_2}{\partial t}, F_3 = \frac{\partial x_3}{\partial t} \quad (4.20)$$

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{10} \\ x_2 - x_{20} \\ x_3 - x_{30} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$[x_{10} \quad x_{20} \quad x_{30}]^T = [0.2606 \quad 0.2148 \quad 0.1803]^T$$

Finalement le modèle linéaire d'états donné ci-dessous :

$$A = \begin{bmatrix} -0.2415 & 0.2415 & 0 \\ 0.2415 & -0.4244 & 0.1566 \\ 0 & 0.1566 & -0.1865 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 795.7747 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = [0] \quad (4.22)$$

### 13.4. Estimation d'état du système trois cuves :

Schéma de simulation :

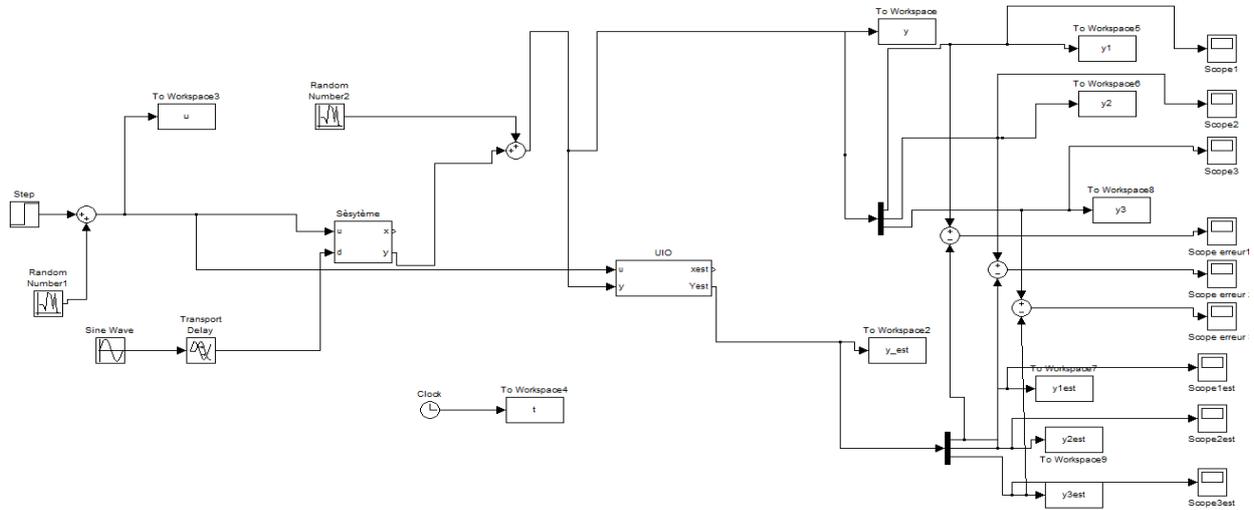


Figure 4.13 : Schéma Simulink pour l'estimation d'état par UIO

Les résultats de la simulation sont donnés dans les figures suivantes:

Les figures (4.14), (4.15) représentent respectivement les sorties  $y(t)$  et leurs estimations par l'observateur à entrées inconnues et l'erreur d'estimation d'états entre l'observateur UIO et le système:

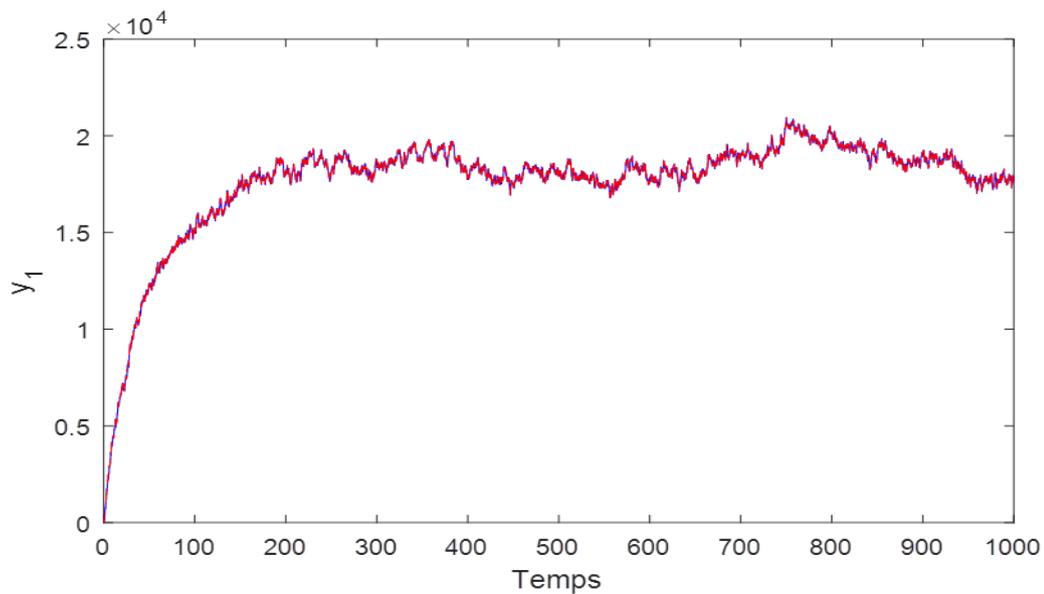


Figure 4.14 Évolution de sortie  $y_1$  et de son estimée  $\hat{y}_1$

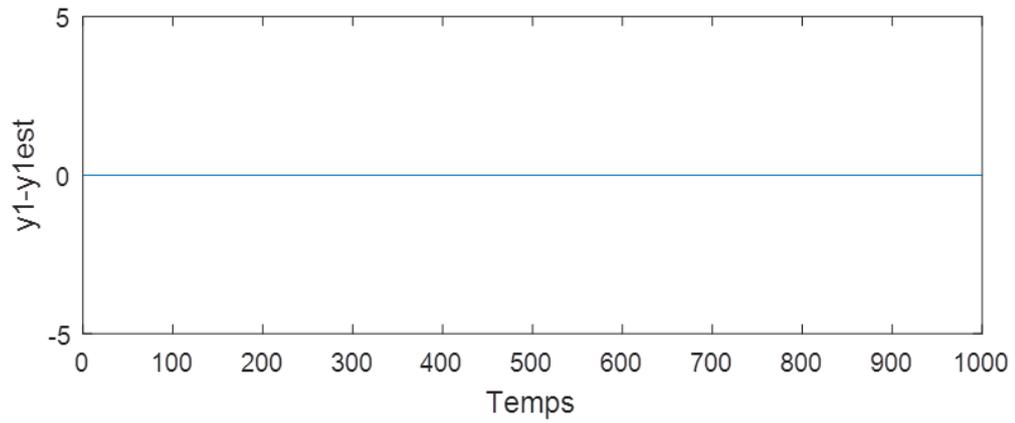


Figure 4.15 Evolution d'erreur d'estimation entre l'observateur et sortie de système  $y_1$

Les Figures (4.16) (4.17) présentés les mesures du système  $y_2$  et l'évolution de son estimation et l'erreur d'estimation d'états entre l'observateur PI et le système

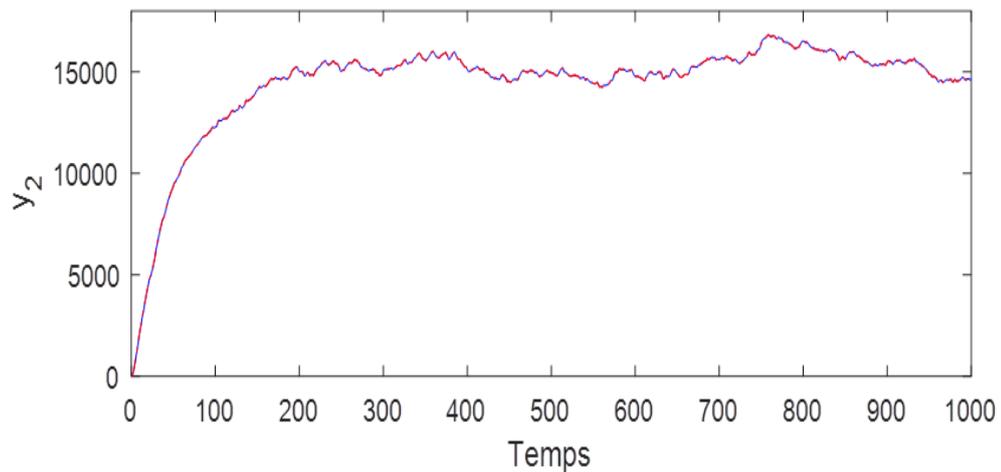


Figure 4.16 : Évolution de sortie  $y_2$  et de son estimée  $\hat{y}_2$

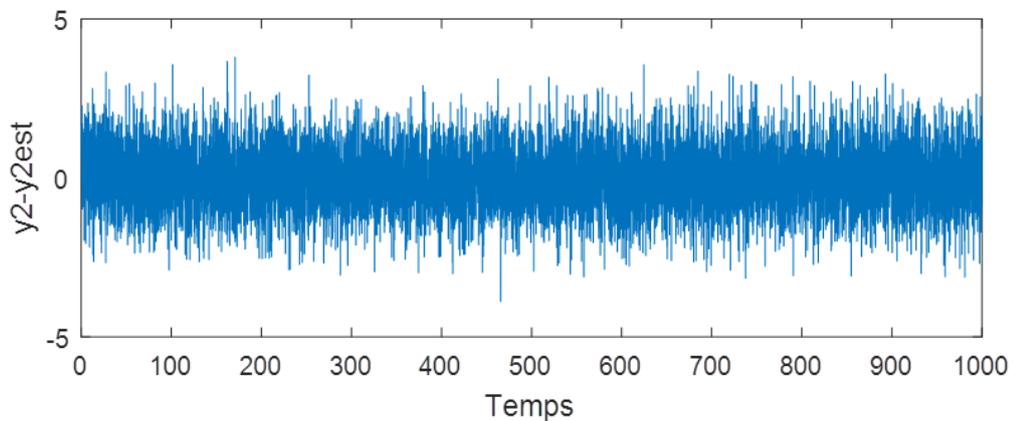


Figure 4.17 : Evolution d'erreur d'estimation entre l'observateur et sortie de système  $y_2$

Les figures (4.18) et (4.19) montrent que la sortie  $y_3$  et son estimation et l'erreur d'estimation entre le système et l'observateur :

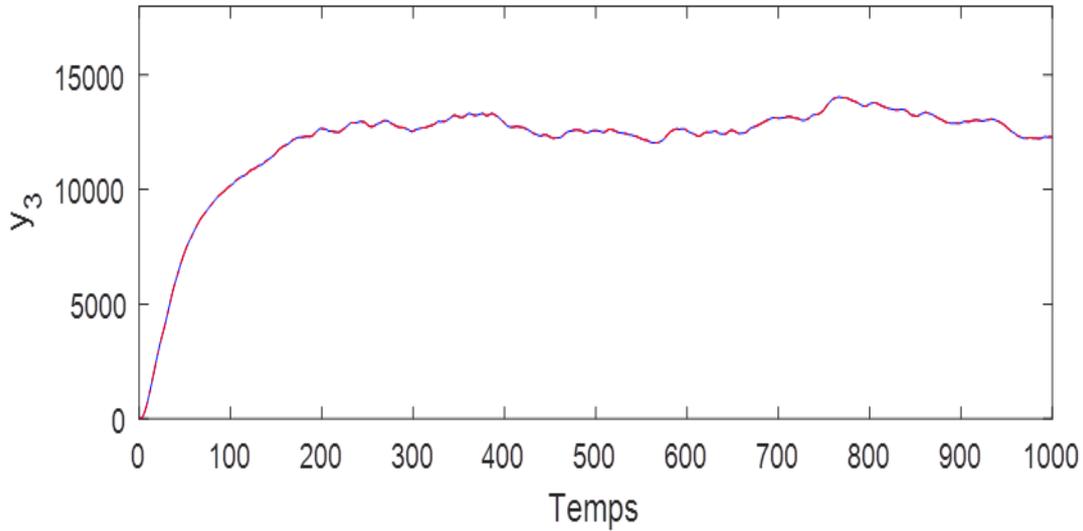


Figure 4.18 : Évolution de sortie  $y_3$  et de son estimée  $\hat{y}_3$

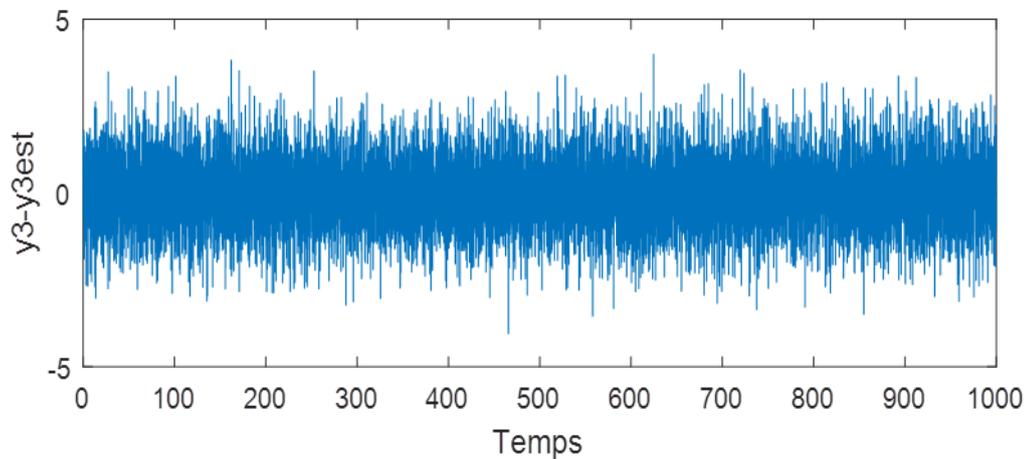


Figure 4.19 : Evolution d'erreur d'estimation entre l'observateur et sortie de système  $y_3$

L'observateur (UIO) à entrées inconnues donne une estimation satisfaisante des états du système, On observe la bonne qualité de l'estimation, On constate qu'en pratique on peut augmenter les gains de l'observateur afin d'estimer les entrées inconnues ayant des dynamiques négligées.

### 13.5 Diagnostic de défauts capteurs du système trois cuves

Pour le diagnostic de défauts capteurs du système trois Cuves, on va présenter la détection et la localisation des éventuels défauts susceptibles d'affecter un capteur

#### 13.5.1. Détection de défaut :

Pour la détection de défaut, on va fixer le seuil de confiance (seuil de détection), de tel sorte que, si le résidu dépasse ce seuil, alors on enregistre la présence d'un défaut.

- **Seuil de détection :**

La fixation du seuil de confiance peut être effectuée en autorisant uniquement 2% des valeurs du signal de la sortie en état sain.

Pour la première sortie le seuil de confiance est fixé à 0.5. Pour le deuxième et le troisième résidu, le seuil est fixé à 2.8.

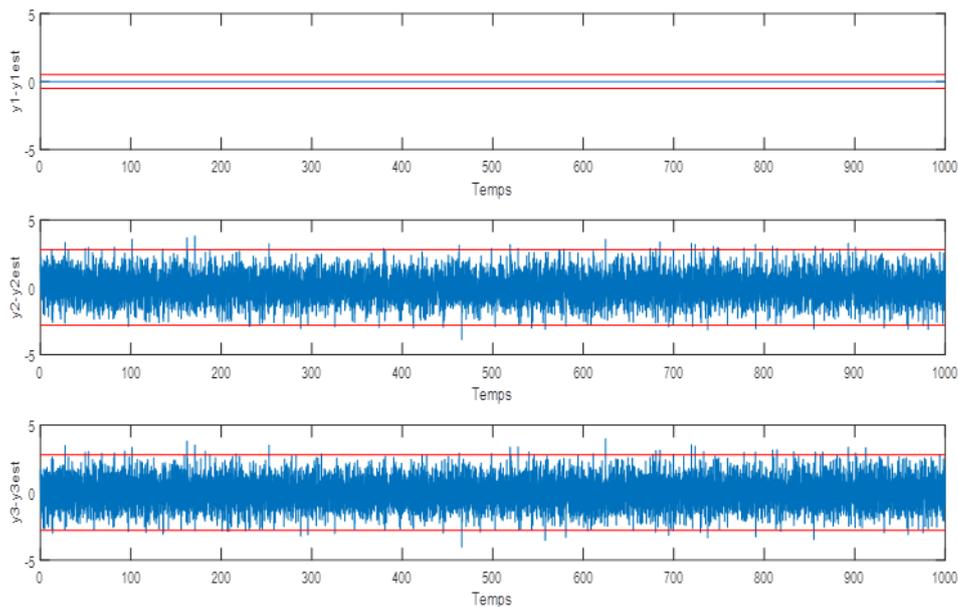


Figure 4.20 : Les résidus sans défauts avec seuils de confiance

- **Simulation d'un défaut affectant un le (02) deuxième capteur**

On va simuler un défaut d'amplitude (3) trois, elle dépasse le seuil de confiance.

Le défaut injecté est sous la forme :

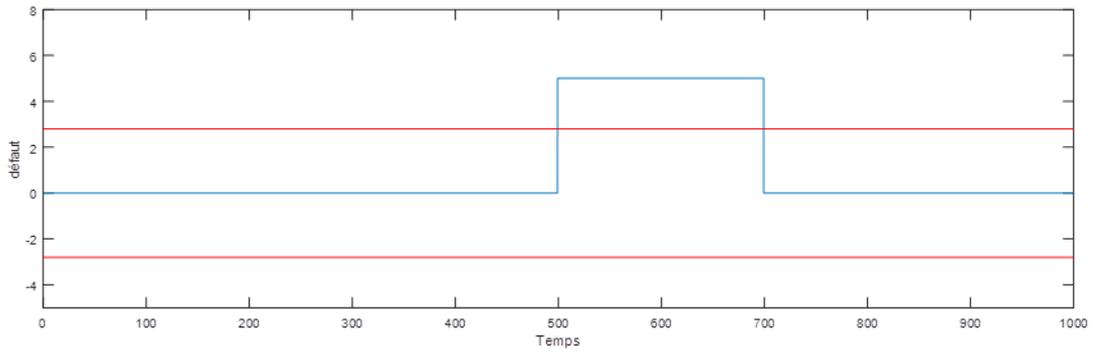


Figure 4.21 : Défaut simulé sans bruit

- **Matrice de signature théorique de défauts :**

L'utilisation de la structure DOS (observateurs dédié), nous permet de définir la matrice des signatures de défauts, qui est définie comme suit :

Tableau 4.4 : Matrice des signatures instrumentales de défauts

Résidus	Défaut1	Défaut2	Défaut3
$\begin{pmatrix} y_1 - \hat{y}_1 \\ y_2 - \hat{y}_2 \\ y_3 - \hat{y}_3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

- **Détection du défaut simulé :**

L'évolution du banc d'observateur structure DOS (chaque sortie du système est l'entrée de l'élément correspondant du banc d'observateurs) se donne comme suit :

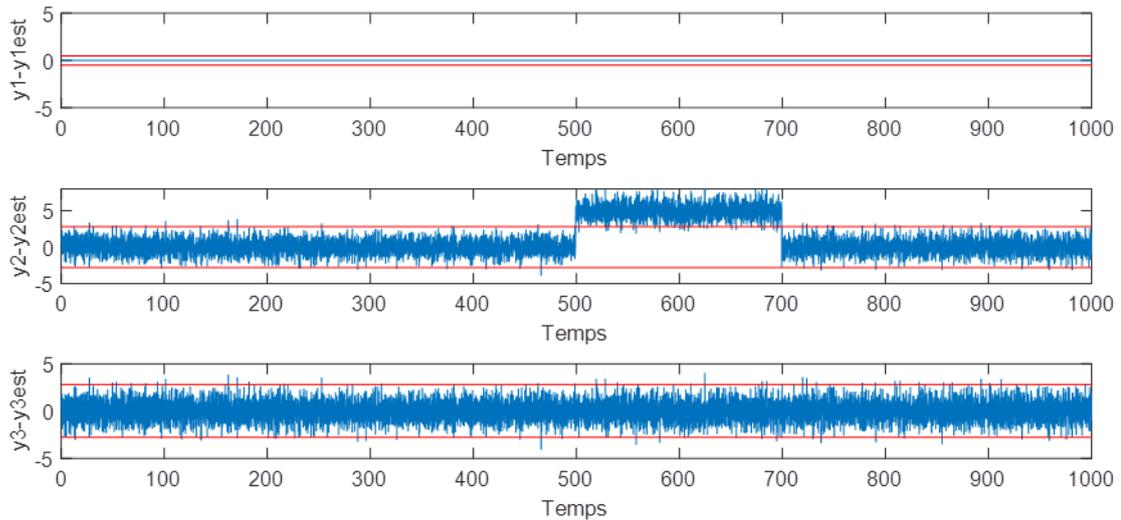


Figure 4.22 : Sorties du banc d'observateur structure DOS en présence de bruit

- **Localisation du défaut simulé :**

Pour localiser le défaut simulé on doit calculer la matrice des signatures instrumentales. A partir de la forme des signaux résidus, la matrice des signatures instrumentales est comme suit :

Tableau 4.5 : Matrice des signatures instrumentales de défauts

Résidus	Matrice
$\begin{pmatrix} y_1 - \hat{y}_1 \\ y_2 - \hat{y}_2 \\ y_3 - \hat{y}_3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

La comparaison de la matrice de signatures de défauts instrumentale avec la matrice des signatures théoriques, nous permet de conclure qu'est la variable en défaut.

Le suivi des différentes valeurs de cette matrice nous montre que le défaut a affecté le deuxième capteur à partir de l'instant  $t=500$  s, et il est disparu à l'instant  $t=700$ s.

Avant l'instant  $t=500$ , et après l'instant  $t=700$ s, on n'a pas enregistré aucun dépassement d'aucune des seuils de confiance, alors la procédure de localisation ne sera pas déclenchée.

## 14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des méthodes de détection et localisation de défauts à base d'observateur. Tout d'abord nous avons commencé la détection par observateur simplifié qui nécessite l'observateur pour générer le résidu. Puis nous avons présenté un banc observateur qui nécessite plusieurs observateur pour faire la localisation.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Les travaux développés dans ce mémoire présentent une contribution aux méthodes d'estimation d'état et de détection et de localisation de défauts des systèmes non linéaires représentés par des modèles. Dans ce contexte de modélisation, pleinement reconnu aujourd'hui, deux structures essentielles de modèles peuvent être distinguées selon que les sous modèles partagent ou non le même vecteur d'état. La première structure, à savoir le modèle de Takagi-Sugeno, a été à l'origine de nombreux développements dans divers domaines de l'automatique tels que l'identification, la commande ou l'estimation d'état. Nous avons testé ces méthodes sur un système non linéaire

Dans le premier chapitre, nous avons fait des rappels sur les notions de base sur le diagnostic et la surveillance, et les critères de performance, en passant par les approches usuelles de détection et enfin nous avons rappelé les méthodes de diagnostic à base de modèle mathématique.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude de l'approche multimodale qui permet de représenter un système dynamique non linéaire comme la combinaison d'un ensemble de modèles linéaires locaux valables dans des zones de fonctionnement. Nous avons représenté la méthode de obtention d'un modèle par linéarisation et les différentes méthodes d'optimisation paramétriques les plus utilisées.

Le troisième chapitre présente la conception de observateur, ce qui nous a permet d'estimer l'état, les entrées inconnues et les sorties d'un modèle pour un système non linéaire, et comment améliorer sa performance. Nous avons établi des conditions suffisantes de convergence de l'observateur.

Dans le dernier chapitre, l'exemple académique d'un système à trois cuves a permis d'illustrer la mise en pratique des résultats obtenus, depuis la phase de modélisation par modèle jusqu'à la phase de diagnostic à base de observateur. Une procédure de diagnostic de défauts capteurs et actionneurs a été mise en place. La méthode de localisation est basée sur la génération préalable d'une matrice de signatures théoriques des défauts à détecter. L'utilisation d'un banc de observateurs permet ensuite de constituer une matrice de signatures expérimentales. La localisation des défauts peut alors être obtenue en comparant les signatures théoriques et expérimentales.

Comme perspectives, nous comptons étudier l'utilisation des observateurs à entrées inconnues pour l'estimation d'état des systèmes non linéaires.

## Bibliographie

- [1] Elom Ayihdomlan, *Diagnostic des Systèmes a Changement de Régime de Fonctionnement*, Thèse de doctorat, Lorraine, (2006).
- [2] Boularem Adel, *Diagnostic des systèmes non linéaire représentés par multi-modélé*., Mémoire de Master, Université de M'Sila, (2012/2013)
- [3] Mourad Houari, *Estimateur d'état basé sur les courants pour les réseaux de distribution*, Mémoire de Master, Ecole Montréal, (2014)
- [4] Bendjama Hocine, *Contribution à la détection et au diagnostic des défauts. Application aux système dynamiques et aux matériaux*, Thèse, Ecole Nationale Polytechnique, (2012)
- [5] Abdouramane Moussa Ali, *Diagnostic sans modèle a priori*, Mémoire de Master, Université Henri Poincaré , (2011).
- [6] Youcef Ait Gherbi Mustapha Rabhi, *Synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes linéaires continus Application à la détection de fuite d'un système hydraulique*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .
- [7] BoucharebIlhem, *Modélisations et outils d'aide au diagnostic de défauts de machines synchrones et a reluctance variable*, Mémoire de Master, Université de Constantine 1, (2013) .
- [8] Aliouane Rahi Ben Derradji Mohamed Mounib, *Etude et Commande des Systèmes Non Linéaires : Système Twin Rotor*, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2015) .
- [9] Imen Ellouze, *Etude de la stabilité et de la stabilisation des systèmes à retard et des systèmes impulsifs*, Doctorat, l'Université Paul Verlaine de Metz, (2012) .
- [10] Hassiba Nechaf, *Observation et Synthèse d'Observateurs pour les Systèmes à Retard*, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2015).
- [11] Mohamed Zerrougui, *Observation et commande des systèmes singuliers non linéaires*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, (2011)
- [12] Ourida Chabour, *Stabilisation des systèmes non linéaires*, Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, (2000).
- [13] Yves Granjon, *Systèmes linéaire non linéaire à temps continu à temps discret représentation d'êta*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), (2015).
- [14] Benzahia Yasmina, *Observateurs non linéaires : Application sur un TRMS*, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, (2015/2016)

- [15] Merahi Kamel, *Estimation d'Etat et Diagnostic de Fonctionnement des Systèmes non Linéaires*, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, (2010).
- [16] Salwa Methnani, *Diagnostic reconstruction et identification des défauts capteurs et actionneurs : application aux station d'épurations des eaux usées*, Thèse de doctorat, Université de Toulon; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), (2012).
- [17] Wissem Saighi, *Estimation d'état et diagnostic de fonctionnement des systèmes linéaires*, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi O.E.B. , (2012 2013)
- [18] Kourd Yahia, *Génération des résidus par les outils de l'intelligence artificielle pour le diagnostic des systèmes complexes*, Thèse doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, ( 2011/2012).
- [19] Neçaibia Amar, *Conception d'Observateurs Robustes pour le Diagnostic des Processus Énergétiques*, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba, (2010).
- [20] Djeddi Abdelghani, *Diagnostic des systèmes non linéaires à base d'observateurs*, université Badji Mokhtar- Annaba, (2017)
- [21] Chakour Chouaib, *Diagnostic et surveillance des procédés industriels et de leur environnement sur la base de l'analyse de données*, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar- Annaba (2015/2016).
- [22] Fatma Sallem, *Détection et Isolation de Défauts Actionneurs Basées sur un Modèle de l'Organe de Commande*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2013).
- [23] Mohamed Yacine Hammoudi, *Contribution à la commande et à l'observation dans l'association convertisseurs machine*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider– Biskra (2015).
- [24] Nait Slimani Boukhalifa, *Synthèse d'observateurs non linéaires : Application au diagnostic de défauts*, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011).
- [25] Djamel Ounnas, *Contribution au Diagnostic et à la Commande Passive Tolérante aux Défauts des Systèmes non Linéaires*, Université Ferhat Abbas –Setif 1, 2018.
- [27] Tahraoui Souad, *Diagnostic Des Systèmes Dynamiques à Base D'observateurs à Entrées Inconnues*, Thèse de doctorat, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen Faculté de Technologie, (2015).
- [28] Didi Ibtissem, *l'observation des systèmes non linéaires invariants : Application aux Bioprocédés*, Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Bel kaid Faculté de technologie (2014/2015)
- [29] Abdelkader Akhenak, *Conception d'observateurs non linéaires par approche multimodale: Application au diagnostic*, Thèse de doctorat, IAEM, (2004).

- [30] Larbi Mohamed Elamine, *Synthèse des Observateurs pour un Dornes Hélicoptère*, Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2015)
- [31] Fenglong Liu, *Synthèses d'observateurs à entrées inconnues pour les systèmes non linéaires*, Thèse de doctorat de l'université de CAEN/BASSE–Normandie (2007).
- [32] Rabah fellouh, *Contribution au Diagnostic de Pannes pour les Systèmes Différentielle ment Plats*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2007
- [33] Nabila barkat, *méthodes analytiques de détection des défauts dans les systèmes boucles*, Mémoire de Magister, Faculté Elhadj Lakhder Batna, (2011)
- [34] Michel Batteux, *diagnostic bilité et diagnostic de systèmes technologiques pilotés*, Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, (2011)
- [35] Aliouan Rahim, *Etude et Commande des Systèmes Non-Linéaires : Système Twin Rotor*, Mémoire de Master, Université Mkasdi Rebba Houargla, (2015).
- [36] Ghribi Mohsen, *commande optimale de vitesse d'une machine à courant continu*, Thèse de doctorat de l'université du Québec, (1989).
- [37] Benoît Maxi, *Contribution à la Commande et au Diagnostic des Systèmes. Algébro-différentiels linéaires*, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2003
- [38] Ahmed Rahmani, *Etude structurelle des systèmes linéaires par l'approche bond graph*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille 1993.
- [39] Vincent Cocquempot, *Generation et optimisation des relations de redondance analytique*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de LILLE, (1993)
- [40] Merzougui Nardjes, Cheryett khawla, *Etude comparative de deux techniques FDI*, Mémoire de master, Badji Mokhtar, (2020)