

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

UNIVERSITE DU 20 AOUT 1955 SKIKDA

Faculté de Technologie

Département : Pétrochimie



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master.

Filière : industrie pétrochimique

Spécialité : automatisation en industrie pétrochimique

Par : Ladaycia Moundji

Mahcene Zakaria

**Thème:**

---

**Diagnostic des défauts actionneurs: d'un benchmark  
de trois cuves**

---

*Soutenu publiquement le : 13 / 07 / 2023 devant le jury composé de :*

*Président Chettah Chouaib MCA*

*Rapporteur Menighed Kamel MCA*

*Examineur Harzallah Ghania MCB*

**Promotion : 2022/2023**

---

## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH**, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail. Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadrant, le Dr. *Menighed Kamel*, pour son soutien, ses conseils et ses remarques constructives qui ont contribué à présenter notre travail sous sa meilleure forme.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés et qui, par leur expertise, nous ont soutenus tout au long de nos études.

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont montré de l'intérêt pour notre mémoire en acceptant de l'examiner et de l'enrichir de leurs suggestions.

Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et notre respect envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce modeste travail. Leur contribution est très appréciée.

Nous remercions sincèrement tous ceux et toutes celles qui ont été impliqués dans ce projet.

---

## Résumé

Dans ce travail, nous avons introduit une méthode de diagnostic applicable aux systèmes décrits par des équations d'état, en utilisant deux types d'observateurs : l'observateur de Luenberger et l'observateur à entrée inconnue. Cette méthode a été simplifiée et appliquée à un système industriel spécifique, à savoir un système hydraulique composé de trois réservoirs.

Dans la première partie de la simulation, nous avons effectué des tests en utilisant l'observateur de Luenberger pour détecter un défaut de l'actionneur ainsi qu'une entrée inconnue. Dans la deuxième partie, nous avons utilisé l'observateur à entrée inconnue pour détecter un défaut de l'actionneur. Ensuite, nous avons réalisé deux scénarios d'isolation de défauts en utilisant l'observateur à entrée inconnue. Dans le premier scénario, nous avons simulé un seul défaut de l'actionneur avec une perturbation, tandis que dans le deuxième scénario, nous avons simulé deux défauts de l'actionneur.

**Mots clés:** diagnostic, Observateur de Luenberger, Observateur à entrée inconnue, Simulation, Actionneur, défauts, Perturbation

### ملخص

في هذا العمل ، قدمنا طريقة تشخيصية قابلة للتطبيق على الأنظمة الموصوفة بواسطة معادلات الحالة ، باستخدام نوعين من المراقبين: مراقب لونيبرغر ومراقب الإدخال غير المعروف. تم تبسيط هذه الطريقة وتطبيقها على نظام صناعي معين ، وهو نظام هيدروليكي يتكون من ثلاثة خزانات

في الجزء الأول من المحاكاة ، أجرينا اختبارات باستخدام مراقب لونيبرغر للكشف عن خطأ المحرك وكذلك إدخال غير بعد ذلك ، قمنا بتنفيذ معروف. في الجزء الثاني ، استخدمنا مراقب الإدخال غير المعروف للكشف عن خطأ في المشغل سيناريوهين لعزل الأخطاء باستخدام مراقب الإدخال غير المعروف. في السيناريو الأول ، قمنا بمحاكاة خطأ مشغل واحد مع اضطراب ، بينما في السيناريو الثاني ، قمنا بمحاكاة خطأين في المشغل

**الكلمات المفتاحية:** التشخيص ، مراقب لونيبرغر ، مراقب إدخال غير معروف ، محاكاة ، مشغل ، أخطاء ، اضطراب

### Abstract

In this work, we have introduced a diagnostic method applicable to systems described by equations of state, using two types of observers: the Luenberger observer and the unknown input observer. This method has been simplified and applied to a specific industrial system, namely a hydraulic system consisting of three tanks.

In the first part of the simulation, we performed tests using the Luenberger observer to detect an actuator fault as well as an unknown input. In the second part, we used the unknown input observer to detect a fault in the actuator. Then, we carried out two fault isolation scenarios using the unknown input observer. In the first scenario, we simulated a single actuator fault with a disturbance, while in the second scenario, we simulated two actuator faults.

**Key words:** diagnosis, Luenberger Observer, Unknown input observer, Simulation, Actuator, Faults, Disturbance.

---

# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre I: Généralités sur le diagnostic

I.1 Introduction .....	1
I.2 Définitions et concepts .....	1
I.3 Types de défauts.....	2
I.3.1 Emplacement .....	2
I.3.1.1 Défaut sur le capteur .....	2
I.3.1.2 Défaut sur l'actionneur .....	3
I.3.1.3 Défaut sur le système ou composants.....	3
I.3.2. Modélisation .....	3
I.3.3. Caractéristique temporelle.....	4
I.3.3.1 Défaut brusque .....	4
I.3.3.2 Défaut intermittent.....	4
I.3.3.3 Défaut graduel.....	4
I.4. Redondances d'informations .....	4
I.4.1 Redondance physique ou matérielle .....	5
I 4.2 Redondance analytique .....	5
I.5. Procédure de détection et d'isolation des défauts .....	6
I.5.1. La détection .....	6
I.5.2. L'isolation .....	6
I.5.3. L'identification .....	6
I.6. Méthodes de diagnostic de défauts .....	6
I.6.1. Les méthodes sans modèle mathématique .....	8
I.6.2. Méthodes de diagnostic à base de modèle .....	8
I.6.2.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs .....	8

I.6.2.2 Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs .....	8
I.7 Conclusion .....	10
<b>Chapitre II : Observateurs d'état pour le Diagnostic</b>	
II.1 Introduction .....	11
II.2 L'observateur d'état .....	11
II.2.1 Définition d'un observateur .....	11
II.2.2 Condition d'existence de l'observateur .....	11
II.2.3 Principe de l'observateur .....	12
II.3. Observabilité des systèmes linéaires .....	12
II.3.1. Définition de l'observabilité .....	12
II.3.2. Critère d'observabilité .....	12
II.4 Classification des observateurs .....	13
II.4.1 Observateurs des systèmes non linéaires .....	14
II.4.1.1 Observateur de Luenberger étendu .....	14
II.4.1.2 Filtre de Kalman étendu .....	14
II.4.1.3 Observateur à grand gain .....	15
II.4.2 Observateurs des systèmes linéaires .....	15
II.4.2.1 Observateur de Luenberger .....	15
II.4.2.2 Observateur à entrée inconnue .....	17
II.4.2.3 Observateur de Kalman-Bucy .....	18
II.5 Principe de génération de résidus à base d'observateurs .....	19
II.6 Structuration et évaluation des résidus générés à base d'observateur .....	20
II.6.1 Structure d'observateurs simplifiés .....	21
II.6.2 Structure d'observateurs dédiés (DOS) .....	21
II.6.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS) .....	22
II.7 Conclusion .....	23
<b>Chapitre III : Diagnostic des défauts actionneurs d'un benchmark de trois cuves</b>	

III.1 Introduction .....	24
III.2 Modélisation du système hydraulique trois cuves .....	24
III.2.1 Description du système.....	24
III.2.2 Modèle mathématique du système .....	25
III.2.3 Linéarisation du système à trois cuves .....	27
III.3 La synthèse et la construction d'un observateur de Luenberger pour le diagnostic .....	31
III.3.1 La synthèse d'un observateur de Luenberger .....	31
III.3.2 La construction d'un observateur de Luenberger .....	32
III.3.2 simulation de la détection d'un défaut actionneur à base d'un observateur de Luenberger.....	34
III.3.2.1 simulation en absence des défauts .....	34
III.3.2.2 simulation en présence d'un défaut .....	36
III.3.2.3 simulation en présence d'une entrée inconnue .....	37
III.4 La synthèse et la construction et la simulation d'un observateur à entrées inconnues pour le diagnostic .....	37
III.4.1 La synthèse d'un observateur à entrées inconnues pour le diagnostic .....	37
III.4.2 Construction de l'observateur à entrée inconnue .....	38
III.4.3 simulation d'un défaut actionneur à base d'un observateur entrée inconnu.....	40
III.4.3.1 Simulation de l'observateur en absence de défauts et en présence d'une entrée inconnue .....	40
III.4.3.2 Simulation de l'observateur en présence de défauts .....	42
III.4.3.3 Simulation de l'isolation des défauts actionneurs .....	44

III.4 Conclusion

**Conclusion général**

**ANNEXE**

**Bibliographie**

# Liste des figures

## Chapitre 1

<b>Figure I.1</b> : Différents types de défauts agissants sur un système .....	3
<b>Figure I.2</b> : Les défauts selon leurs modélisations .....	3
<b>Figure I.3</b> : Répartition des défauts selon leur comportement temporel .....	4
<b>Figure I.4</b> : Schéma représentant la redondance matérielle .....	5
<b>Figure I.5</b> : Procédure de détection et d'isolation des défauts .....	6
<b>Figure I.6</b> : Une classification générale des méthodes de diagnostic .....	7

## Chapitre 2

<b>Figure II.1</b> : Structure de l'observateur de Luenberger .....	16
<b>Figure II.2</b> : Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs .....	19
<b>Figure II.3</b> : Tables des signatures. ....	19
<b>Figure II.4</b> : Principe de détection et localisation de défauts .....	20
<b>Figure II.5</b> : Structure d'observateur simple .....	21
<b>Figure II.6</b> : Structure d'observateurs dédiés .....	22
<b>Figure II.7</b> : Structure d'observateurs généralisée .....	23

## Chapitre 3

<b>Figure III.1</b> : système à trois cuves .....	24
<b>Figure III.2</b> : Schéma du système hydraulique communiquant .....	25
<b>Figure III.3</b> : domaine de validité .....	30
<b>Figure III.4</b> : L'observateur de Luenberger .....	31
<b>Figure III.5</b> : Schéma de Simulink du système sans défauts .....	34
<b>Figure III.6</b> : schéma de manuel switch .....	34
<b>Figure III.7</b> : Les sorties du système .....	35
<b>Figure III.8</b> : Le résidu. ....	35
<b>Figure III.9</b> : Schéma de Simulink du système avec défaut .....	36
<b>Figure III.10</b> : schéma de manuel switch .....	36
<b>Figure III.11</b> : les résidus en présence d'un défaut .....	37
<b>Figure III.12</b> : Schéma de simulation du système en présence d'une entrée inconnue .....	37
<b>Figure III.13</b> : schéma de manuel switch relie avec entrée inconnue .....	42
<b>Figure III.14</b> : les résidus en présence d'entrée inconnue .....	38

<b>Figure III.15</b> : observateur entrée inconnue .....	40
<b>Figure III.16</b> : Schéma de simulation du système sans défauts.....	42
<b>Figure III.17</b> : schéma de manuel switch en cas d'entrée inconnue .....	42
<b>Figure III.18</b> : Les sorties du système.....	42
<b>Figure III.19</b> : Le résidu en absence de défaut et en présence d'entrée inconnue .....	43
<b>Figure III.20</b> : Le résidu en absence de défaut et en présence d'entrée inconnue .....	43
<b>Figure III.21</b> : schéma de manuel switch .....	44
<b>Figure III.22</b> : les sorties du système en présence des défauts .....	44
<b>Figure III.23</b> : le résidu de système en présence des défauts .....	44
<b>Figure III.24</b> : Schéma d'isolation de défaut actionneur 1 .....	45
<b>Figure III.25</b> : Schéma de manuel switch .....	46
<b>Figure III.26</b> : Le résidu en absence de défaut actionneur 1 .....	46
<b>Figure III.27</b> : Schéma de manuel switch .....	46
<b>Figure III.28</b> : Le résidu en présence de défaut actionneur 1 .....	47
<b>Figure III.29</b> : Schéma d'isolation de défaut actionneur 2.....	48
<b>Figure III.30</b> : Schéma de manuel switch en absence des défauts.....	48
<b>Figure III.31</b> : Le résidu en absence de défaut actionneur 2 .....	49
<b>Figure III.32</b> : Schéma de manuel switch .....	49
<b>Figure III.33</b> : Le résidu en présence de défaut actionneur 2.....	50
<b>Figure III.34</b> : Schéma d'isolation de défaut actionneur 1 en présence de défaut additif sur U2	51
<b>Figure III.35</b> : Le résidu du défaut actionneur 1 en présence de défaut additif sur U2 .....	51
<b>Figure III.36</b> : Schéma d'isolation de défaut actionneur 2 en présence de défaut additif surU1	52
<b>Figure III.37</b> : Le résidu du de défaut actionneur 2 en présence de défaut additif sur U1.....	53

## Liste des tableaux

**Tab III.1** : paramètres du système de trois bacs .....25

## Abréviations

AFNOR : Association française de normalisation.

CEI : Communauté des États indépendants.

FDI: Fault detection and isolation.

AMDE : Analyse des Modes de Défaillance.

GOS: Generalized Observer Scheme.

DOS : Dedicated Observer Scheme.

UIO : observateur a entrée inconnue.

## Symboles

A : Matrice de transition.

B : Matrice de commande.

$d(t)$  : Vecteur de défaut.

$e(t)$  : Vecteur des bruits des mesures.

E : La matrice de distribution des entrées inconnues.

M : La matrice de distribution des défauts.

$r(t)$  : Résidu du système.

t : temps.

$u(t)$  : Commande du système.

$x(t)$  : vecteur d'état.

$\dot{x}(t)$  : Dérivée de vecteur d'état.

$\tilde{x}(t)$  : Estimation de vecteur d'état.

$\dot{\tilde{x}}(t)$  : Dérivée d'estimation d'état.

$y(t)$  : Vecteur des mesures.

$\hat{y}(t)$  : Sortie estimée.

$\partial$  : Notion de dérivée.

$\mathbf{R}$ : Ensemble des nombres réels.

$\mathbf{I}$  : Matrice identité

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Dans le milieu industriel, les coûts d'arrêt de production sont supérieurs aux coûts de réparation et de remise en état normalisée. Ainsi la prévention des dégâts des machines a pour chaque entreprise une grande signification économique, donc si pour ça on utilise le diagnostic des défauts pour détecter et localiser les composants ou les organes défaillants dans les systèmes et de déterminer ses causes. et aussi pour protéger la production industrielle ainsi l'homme et l'environnement.

Selon les instances nationales et internationales de normalisation (AFNOR, CEI) :

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection, isolation (localisation) et identification [6].

Le diagnostic a pour objectif de rechercher l'origine d'un défaut constaté. Un défaut correspond à une déviation jugée anormale d'une grandeur caractéristique du système [6].

Pour le diagnostic, il est nécessaire de connaître des informations relatives aux variables internes du système. Afin d'obtenir ces informations sur les états on peut:

-Utiliser des observateurs : quand le système est observable, on pourra toujours estimer analytiquement les états internes du système. L'observation présente l'avantage de ne pas nécessiter des capteurs supplémentaires [41].

L'utilisation des observateurs a une grande importance dans le diagnostic des systèmes. Dans notre mémoire nous allons parler de certains qui sont utilisés pour le diagnostic des systèmes linéaires et non linéaires, en portant un intérêt aux observateurs Luenberger, et à entrée inconnue.

L'observateur de Luenberger n'est pas robuste aux entrées inconnues, car il est sensible pour les défauts et les perturbations.

En effet, les observateurs à entrée inconnue ont été à l'origine créés pour s'affranchir des perturbations non quantifiables pouvant affecter le système. Ce type d'observateurs est utilisé pour générer des signaux appelés résidus qui fournissent des informations sur l'occurrence des défauts et permettent la détection et la localisation de ces derniers.

L'objectif de notre travail est d'utiliser des observateurs luenberger et à entrée inconnue pour détecter et localiser les défauts affectant un système hydraulique de trois bacs.

Pour atteindre notre objectif, nous avons scindé notre travail en trois chapitres :

-Le premier chapitre est consacré pour introduire les notions de bases du diagnostic de défauts ainsi que les types de défauts et leurs modélisations, ensuite nous allons présenter le principe de base de diagnostic et ces étapes et ces méthodes.

-Le deuxième chapitre : nous allons aborder le principe de base des observateurs d'états, leurs classes (linéaires et non linéaires) et nous présentons les notions d'observabilité, puis nous allons parler du principe de diagnostic à base des observateurs d'états qui inclut le principe de génération des résidus et leurs structurations.

- Le troisième chapitre sera consacré à l'instauration d'un schéma de détection et d'isolation de défaut par un observateur Luenberger et entrées inconnues et nous finirons avec l'application de cette méthode pour le diagnostic d'un système hydraulique de trois bacs.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I: Généralités sur le diagnostic**

## Chapitre I: Généralités sur le diagnostic

### I.1 Introduction

L'instabilité et la dégradation des performances d'un procédé industriel est causée par la présence de défaut, et ceci peut affecter la production industrielle ainsi l'homme et l'environnement. C'est pour cela qu'il est nécessaire de mettre en œuvre un système de diagnostic afin de détecter, localiser et identifier les défauts affectant le système. Le rôle d'un système diagnostic est de détecter et de localiser un défaut avant celui-ci ne conduise à une défaillance grave du procédé. Dans ce chapitre, on va introduire en premier lieu les notions de bases de diagnostic de défauts ainsi les types de défauts et leurs modélisations, ensuite nous citons le principe de base de diagnostic et, ses étapes et ses différentes méthodes.

### I.2 Définitions et concepts

Le diagnostic de défauts est une procédure qui consiste à détecter, localiser et identifier un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique. Pour pouvoir évoquer les événements pouvant survenir dans un système nous allons définir les termes suivants :

- **Une anomalie** : est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique [1].
- **Un défaut** : L'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec des performances définies dans les spécifications techniques [2].
- **Perturbation** : Une perturbation est une entrée inconnue et non commandée qui agit sur un système. Contrairement au défaut qui est interne la perturbation est une entrée exogène au système [3].
- **Une défaillance** : Perte partielle ou totale des fonctionnalités du système qui le rend incapable de délivrer le service pour lequel il a été conçu [2].
- **Une panne** : Etat d'un système incapable d'assurer le service spécifié à la suite d'une défaillance [2].
- **Dégradation** : Etat d'une entité ou d'un sous ensemble présentant une perte de performance d'une des fonctions assurées par cette entité [4].
- **Un résidu** : Un indicateur de défauts basé sur la différence entre les mesures et les calculs [5].

- **Un symptôme:** est un caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal [5].
- **Diagnostic :** Selon, le contexte et le domaine d'application, le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations.
- **La surveillance :** est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement [7].
- **La sensibilité :** représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter. Ces défauts sont généralement caractérisés par une certaine amplitude [7].
- **La supervision :** est la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération lors de l'apparition de défauts [7].

### I.3 Types de défauts

Les défauts sont classés selon leur emplacement, leur modélisation, et leurs caractéristiques temporelles :

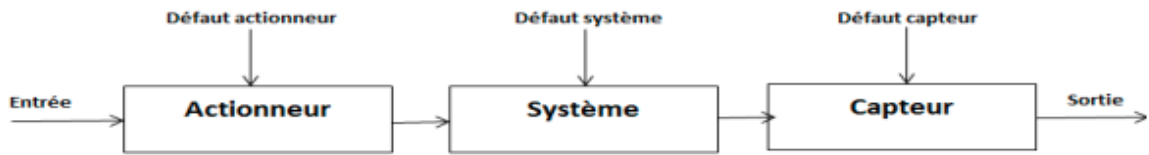
#### I.3.1 Emplacement

**I.3.1.1 Défaut sur le capteur :** se traduit par le fait que la mesure fournie par le capteur ne correspond pas à la réalité car elle est entachée d'une erreur [8].

**I.3.1.2 Défaut sur l'actionneur :** se traduit, quant à elle, par le fait que l'actionneur ne réagit pas correctement à la commande qui lui est imposée [8].

**I.3.1.3 Défaut sur le système ou composants :** correspond à une modification permanente et suffisante de ses caractéristiques physiques [8].

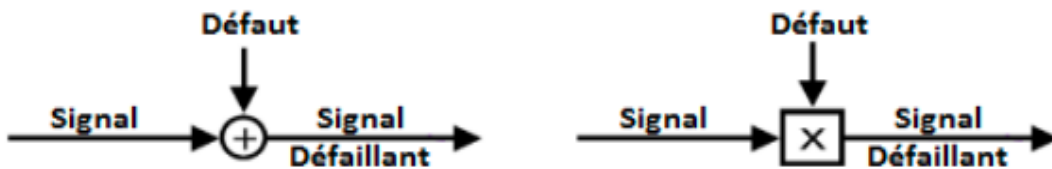
La figure I.1 nous montre les types de défauts selon leur emplacement :



**Figure I.1** : Différents types de défauts agissants sur un système

### I.3.2 Modélisation

Suivant la manière dont les défauts sont modélisés, ils sont classés en défauts additifs et en défauts multiplicatifs, comme le montre la figure I.2 :



**Figure I.2** : Les défauts selon leurs modélisations

Un défaut est dit additif quand il est modélisé par l'ajout d'une variable, quant au défaut multiplicatif, il affecte un système à travers la multiplication de l'entrée  $E$  du système par un défaut.

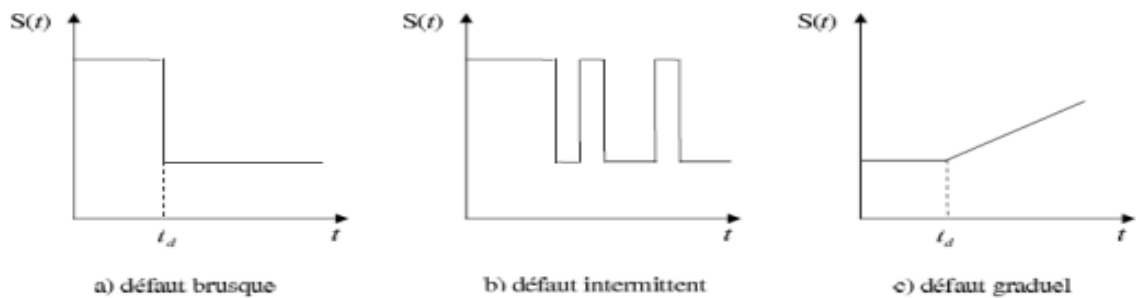
### I.3.3 Caractéristique temporelle

Les défauts peuvent être différenciés selon leur forme et leur comportement dans le temps. En générale on distingue trois types:

**I.3.3.1 Défaut brusque** : il est caractérisé par une discontinuité de l'évolution temporelle de la variable [9]. Il est caractéristique d'une panne brutale : arrêt total ou partiel de connexion [7].

**I.3.3.2 Défaut intermittent :** Ce défaut est un cas particulier de défaut abrupt avec la propriété particulière que le signal revient de façon aléatoire à sa valeur normale. Ce type de défauts caractérise les faux contacts [7].

**I.3.3.3 Défaut graduel:** c'est un défaut caractéristique d'une usure d'une pièce ou d'un encrassement. Il est très difficile à être détecté à cause de son évolution temporelle qui peut être confondue à une modification paramétrique lente représentant le non stationnarité du procédé [10].



**Figure I.3 :** Répartition des défauts selon leur comportement temporel.

## I.4 Redondances d'informations

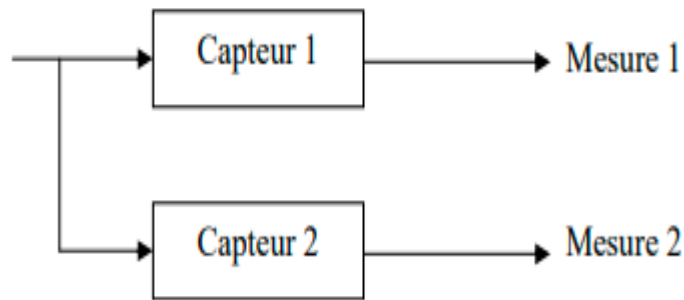
Le principe de base du diagnostic des défauts repose sur la notion de redondance, qui fournit au système plusieurs informations différentes sur une même variable. Des tests vont alors permettre de vérifier la cohérence de ces informations. Cependant, il existe deux approches: La première est dite traditionnelle et consiste à ajouter des capteurs afin d'obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système. C'est la redondance matérielle.

L'inconvénient majeur de cette approche est le coût additionnel en équipement. La deuxième approche est dite redondance analytique. Elle consiste à développer des algorithmes de détection et de localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système [11].

### I.4.1 Redondance physique ou matérielle

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs actionneurs, capteurs, processeurs et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote est appliqué sur les valeurs redondantes pour décider si une faute est présente ou non. Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter. Elle est mise en œuvre essentiellement sur des systèmes à hauts risques

tels que les centrales nucléaires ou les avions. Le diagnostic utilisant la redondance physique se limite à la surveillance des éléments redondants (capteur, actionneurs, ...) présents sur une installation. À l'aide de cette unique technique, il ne sera pas possible de détecter des pannes survenant sur des éléments non redondants [11].



**Figure I.4 :** Schéma représentant la redondance matérielle

#### I 4.2 Redondance analytique

Un complément à la redondance physique consiste à exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces contraintes peuvent souvent s'exprimer sous la forme de relations analytiques liant les variables connues (relations d'entrée/sortie ou de sortie/sortie). Ces relations sont appelées relations de redondances analytiques. Le principe de la surveillance consiste à vérifier la fermeture algébrique de ces relations en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller [12].

Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes : la génération de résidus et la prise de décision [13].

#### I.5 Procédure de détection et d'isolation des défauts

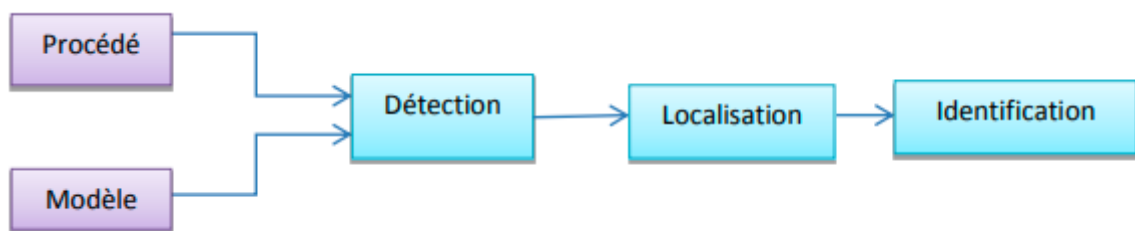
Comme elle est représentée par la figure (I.5), la procédure de détection et d'isolation des défauts passe par trois étapes essentielles [14] :

**I.5.1 La détection :** c'est l'étape qui décide si le système est soumis à un défaut ou pas. Elle consiste dans la plupart des cas à générer le vecteur résidu, qui est nul en fonctionnement

normal et est comparé en ligne aux signatures de pannes. La détection est réalisée en vérifiant le dépassement d'un seuil par les résidus.

**I.5.2 L'isolation** : cette étape permet de localiser le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie. La détection de panne est souvent suivie d'une procédure d'isolation de panne, qui sert à distinguer (isoler) une panne particulière. Un seul résidu peut suffire pour détecter les pannes, cependant plusieurs résidus (ou un vecteur de résidus) sont souvent requis pour l'isolation de panne.

**I.5.3 L'identification** : l'ampleur et le type des défauts sont estimés dans cette phase.



**Figure I.5:** Procédure de détection et d'isolation des défauts.

## I.6 Méthodes de diagnostic de défauts

Selon que l'on dispose ou pas, d'un modèle mathématique représentatif du système, les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes. Dans le premier cas, on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système, puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état.

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

Dans l'étude qui suit, il sera question de présenter les différentes méthodes de détection et d'isolation des défauts. L'intérêt portera surtout sur les méthodes à base de modèle mathématique [15] et [16].

Nous présentons à la figure (I.6) un panorama général des différentes méthodes de diagnostic.

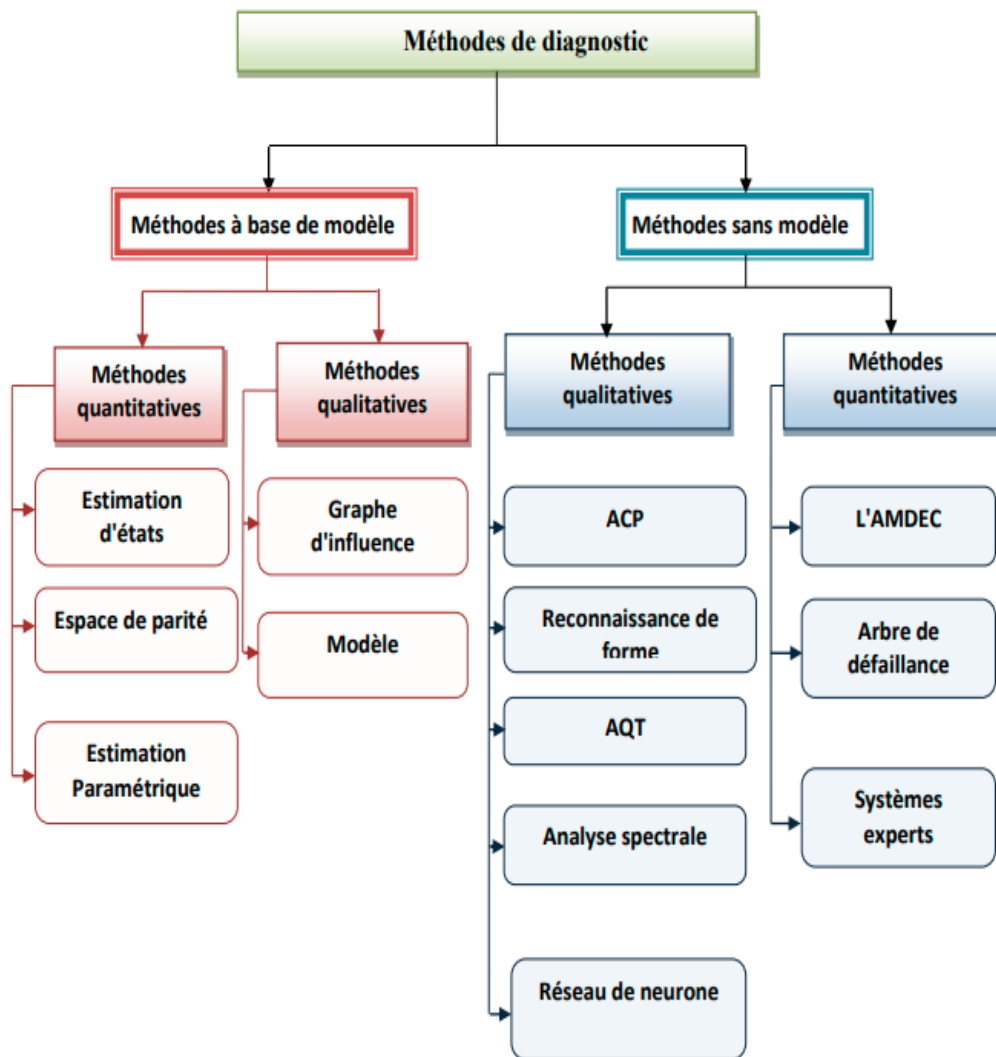


Figure I.6 : Une classification générale des méthodes de diagnostic.

### I.6.1 Les méthodes sans modèle mathématique

- ◇ Les méthodes inductives : la méthode de l'arbre.
- ◇ Les méthodes déductives : l'analyse AMDE (Analyse des Modes de Défaillance).

### I.6.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle

Le principe de ces méthodes consiste à comparer le comportement du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, comme indiqué dans le schéma de la figure I.8. Il est nécessaire donc

d'avoir des connaissances approfondies sur le procédé à diagnostiquer sous la forme d'un modèle représentatif, qui fournit des grandeurs caractéristiques du procédé qui seront constamment comparées aux grandeurs issues du procédé réel.

Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Fault Detection and Isolation) et les méthodes qualitatives issues des communautés intelligence artificielle.

La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic [7].

### **I.6.2.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs**

Les modèles qualitatifs permettent d'abstraire le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique. Ces modèles décrivent d'une manière qualitative l'espace d'état continu du système. Contrairement aux modèles de type numérique, les modèles qualitatifs ne représentent pas la physique du système, mais ils le décrivent en terme de mode de fonctionnement. [7].

### **I.6.2.2 Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs**

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état, des paramètres ou de l'espace de parité en utilisant des modèles mathématiques du système décrivant le comportement du système. Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors détectée. A ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connues, afin d'isoler et d'identifier la défaillance. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous trouvons principalement celles utilisant l'espace de parité, l'estimation paramétrique et celle à base d'observateurs [7].

❖ **Espace de parité** : Cette méthode est utilisable à la fois dans le cas des systèmes déterministes et dans le cas des systèmes stochastiques. Elle s'appuie sur l'élaboration de signaux permettant de tester la cohérence des mesures par rapport à leurs valeurs calculées à l'aide d'un modèle (on parle aussi de consistence des mesures, de leur parité). D'un point de vue général, la méthode consiste à vérifier les relations algébriques entrées/sorties du modèle en utilisant les mesures réelles. Pour cela, les signaux recueillis sur le système

sont injectés dans les relations entrées/sorties et les signaux ainsi créés sont utilisés comme résidus. La méthode a été développée au début pour le cas statique, puis elle a été généralisée plus tard pour le cas des systèmes dynamiques. Cette généralisation utilise la redondance temporelle, c'est-à-dire des relations faisant intervenir les valeurs des sorties des capteurs et les entrées des actionneurs à différents instants. Enfin, la redondance fréquentielle est également utilisée [7].

- ❖ **Méthodes d'estimation paramétrique** : Quand la structure du modèle est connue la détection et la localisation des défauts peuvent être effectuées en utilisant des techniques d'identification. L'idée de base consiste à estimer les paramètres du système en temps réel et de les comparer aux paramètres non affectés par les défauts [20]. Pour cela on doit établir un modèle mathématique du système à diagnostiquer et décrire toutes les relations qui existent entre les constantes physiques et les paramètres du modèle, puis estimer les paramètres du système ainsi que ceux du modèle à partir des entrées et sorties du système. Le vecteur de résidus est obtenu en faisant la différence entre les grandeurs estimées et les valeurs nominales [7].
- ❖ **Méthodes à base d'estimation d'état** : Cette approche s'appuie sur une bonne connaissance du modèle et de ses paramètres, et nécessite l'intégration des diverses relations qui, contrairement aux relations de parité, sont différentielles. Le diagnostic de défaut à base d'observateurs est basé sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur). L'état du système est reconstruit en se recalant à l'aide de certaines mesures [17], le gain de l'estimateur dépendant des objectifs et des performances désirées. Dans le cas des systèmes linéaires, la structure de base des reconSTRUCTEURS est toujours la même, un modèle parallèle corrigé à l'aide de l'erreur d'estimation multipliée par un gain adéquat, mais dans le cas non linéaires le problème s'avère difficile. En diagnostic, la construction d'observateur est beaucoup plus complexe que ce qu'il en est dans le cas de commande dans la mesure où les paramètres d'observateurs jouent un rôle aussi sur la manière dont les défauts vont affecter les résidus. En plus d'assurer la stabilité, ces paramètres doivent permettre de structurer les résidus afin de localiser les défauts. Cependant, pour ce type de stratégie, si une anomalie apparaît, elle affecte en général toutes les composantes des vecteurs résidus ; de ce fait, le problème de localisation est plus complexe que ce qu'il en est dans le cadre de l'espace de parité. Pour résoudre ce problème, une solution consiste à construire des bancs d'observateurs où chacun d'entre eux surveille un défaut [18].

**I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté, un bref rappel sur le concept et la terminologie propre au diagnostic des défauts. Les méthodes de diagnostic sans modèle et les méthodes à base de modèle ainsi que les différentes natures des défauts ont été déployées

# **Chapitre II :**

# **Observateurs d'état pour le**

# **Diagnostic**

## Chapitre II : Observateurs d'état pour le Diagnostic

### II.1 Introduction

En automatique et en théorie de l'information, un observateur d'état est une extension d'un modèle représenté sous forme de représentation d'état. Lorsque l'état d'un système n'est pas mesurable, on conçoit un observateur qui permet de reconstruire l'état à partir d'un modèle du système dynamique et des mesures d'autres grandeurs [19].

Dans ce chapitre nous allons aborder le principe de base des observateurs d'états, leurs classes (linéaires et non linéaires), et on va parler du principe de diagnostic à base des observateurs d'états qui inclut le principe de génération des résidus et leurs structurations.

### II.2 L'observateur d'état

#### II.2.1 Définition d'un observateur

Un observateur d'état, appelé aussi constructeur d'état ou estimateur est un système dynamique ayant comme entrées, les entrées et les sorties du processus réel, et dont la sortie est une estimation de l'état du système si l'on souhaite faire de la commande, ou le vecteur des résidus si l'on souhaite faire du diagnostic [20].

#### II.2.2 Condition d'existence de l'observateur

En ce qui concerne la condition d'existence de l'observateur, il faut que la matrice d'observabilité

$$O = (C^T (CA)^T \dots (CA^{n-1})^T)^T \text{ Soit de rang } n$$

Mathématiquement, cela veut que :  $\text{rang}O = n = \dim(x(t))$

Le diagnostic de défaut à base d'observateurs est basé sur le principe de génération de résidus en comparant les grandeurs disponibles du système réel aux grandeurs estimées (issues de l'observateur) [20].

### II.2.3 Principe de l'observateur

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

La synthèse d'un observateur (appeler aussi estimateur d'état ou capteur virtuel) consiste à trouver un modèle d'état pour l'observateur en s'appuyant sur le modèle d'état du système. Au début et avant toute synthèse d'observateur, on doit se demander si sa conception est possible, la notion d'observabilité et certaines propriétés des entrées appliquées au système fournissent des conditions nécessaires à la synthèse d'un observateur, nous discutons dans cette partie l'observabilité des systèmes linéaires [21].

## II.3 Observabilité des systèmes linéaires

### II.3.1 Définition de l'observabilité

L'observabilité d'un processus est un concept très important dans le domaine d'estimation de l'état. En effet, pour reconstruire les états inaccessibles d'un système, il faut savoir, a priori, si les variables d'état sont observables ou non. L'observabilité d'un système est la propriété qui permet de dire si l'état peut être déterminé uniquement à partir de la connaissance des signaux d'entrées et de sorties. Dans le cas des systèmes non linéaires, la notion d'observabilité est liée aux entrées (via la notion d'entrée uniforme) et aux conditions initiales (via la notion de distinguabilité). Les résultats classiques que l'on peut trouver dans la littérature [22] [23] sont rappelés dans cette partie.

### II.3.2. Critère d'observabilité

- **Observabilité des systèmes linéaires**

Soit un système continu décrit par l'équation d'état déterministe suivante:

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

Où les vecteurs  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^m$  et  $y(t) \in R^p$  représentent respectivement l'état, la commande et la sortie du système. Les matrices A, B et C sont des matrices constantes de dimensions appropriées. L'observabilité du système linéaire (II.1) est garantie si et seulement si :

$$\text{rang}(o) = \text{rang} \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ CA^{(n-1)} \end{pmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Par conséquent le système linéaire (II.1) est observable, si le rang de la matrice d'observabilité O est égal à la dimension n de ce système. Dans le cas où le rang de la matrice O est inférieur à n on parle alors, d'observabilité partielle [24].

- **Observabilité des systèmes non linéaires**

Pour les systèmes non linéaires, étant donné l'espace de l'état  $X \subseteq R^n$  U des entrées, la notion d'observabilité est basée sur la possibilité de différencier deux conditions initiales distinctes. On parlera ainsi de la distinguabilité d'un couple de conditions initiales. On considère le système non linéaire donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Où les vecteurs  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^m$  et sont respectivement le vecteur d'état et de commande [24].

## II.4 Classification des observateurs

Il existe de nombreuses techniques d'observation. Elles diffèrent en fonction de la nature du système considéré linéaire ou non linéaire.

### II.4.1 Observateurs des systèmes non linéaires

La nécessité d'obtenir un modèle précis du comportement d'un processus réel exige souvent l'utilisation du formalisme non linéaire. Les modèles non linéaires obtenus permettent une description exhaustive sur un large espace de fonctionnement, contrairement aux modèles linéaires qui ont un caractère local [29].

#### II.4.1.1 Observateur de Luenberger étendu

L'observateur de Luenberger étendu intervient, soit au niveau du système original avec un gain constant, soit par le biais d'un changement de coordonnées avec un gain dépendant de l'état à estimer. Dans le premier cas, un modèle linéarisé est nécessaire, et le gain de l'observateur est calculé par placement de pôles. Ce type d'observateur ne peut être utilisé que lorsque on est sûr que l'état restera au voisinage de l'état d'équilibre. Pour cette raison, l'utilisation de cet observateur peut être compromise par les instabilités qui peuvent se révéler si l'on s'éloigne du point de fonctionnement. Dans le deuxième cas, les méthodes de changement de coordonnées ne concernent qu'une classe restreinte de systèmes non linéaires. En effet, beaucoup d'approches utilisant les changements de coordonnées nécessitent l'intégration d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires, ce qui est souvent très délicat à réaliser. De ce fait, l'utilisation de solutions approchées est envisageable [30].

#### II.4.1.2 Filtre de Kalman étendu

Le filtre de Kalman étendu est l'une des techniques d'estimation les plus populaires et largement étudiées dans le domaine d'estimation d'état des systèmes dynamiques non linéaires. Ce filtre étendu consiste à utiliser les équations du filtre de Kalman standard au modèle non linéaire linéarisé par la formule de Taylor au premier ordre. Ce filtre étendu a été appliqué avec succès sur différents types de procédés non linéaires. Malheureusement, les preuves de stabilité et de convergence établies dans le cas des systèmes linéaires, ne peuvent être étendues de manière générale au cas des systèmes non linéaires. Dans un environnement déterministe, une preuve de la convergence du filtre de Kalman étendu a été établie dans [31] et [32] pour la classe des systèmes non linéaires à temps discret. Cependant, cette convergence n'est que locale. L'analyse de la convergence de cet estimateur reste, à l'heure actuelle, un problème ouvert.

### II.4.1.3 Observateur à grand gain

Généralement, l'observabilité des systèmes non linéaires dépend de l'entrée. Néanmoins, nous pouvons trouver des systèmes qui sont observables quel que soit l'entrée, il s'agit d'une classe des systèmes uniformément observables, c'est-à-dire que toutes les entrées sont universelles. Le travail de Gauthier et Bornard [33], montre que concernant les systèmes mono-sortie, affines en la commande et qui sont uniformément observables, il est possible de les transformer localement par un changement approprié de coordonnées dans une forme canonique constituée de deux parties : une première linéaire et observable, et une seconde qui est commandable mais non linéaire possédant une structure triangulaire. Pour de tels systèmes, sous des hypothèses du type Lipschitz sur les non linéarités, Gauthier et al. Dans [34] et [35] proposent un observateur dit « à grand gain ».

### II.4.2 Observateurs des systèmes linéaires

Une solution simple et optimale au problème de l'estimation de l'état des systèmes linéaires a été proposée par Luenberger dans le cadre déterministe, et par Kalman dans le cadre stochastique. Dans les deux cas, on considère le modèle dynamique du système linéaire défini par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lw(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Où  $x(t) \in R^n$  ,  $u(t) \in R^m$  ,  $y(t) \in R^p$  ,  $w(t) \in R^r$  ,  $v(t) \in R^p$  sont deux bruits blancs gaussiens d'espérance nulle, de covariances respectives et . Ces bruits sont supposés non corrélés. Les matrices du système sont de dimensions appropriées, et les conditions initiales sont définies par :  $x(0) = x_0$  [23] [28].

#### II.4.2.1 Observateur de Luenberger

La théorie de l'observation de Luenberger repose essentiellement sur des techniques de placement de pôles. On se place dans le cas déterministe, où les bruits  $w$  et  $v$  sont nuls, Luenberger propose l'observateur suivant pour le système (2.26) :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (II.5)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  a pour expression :

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) \quad (II.6)$$

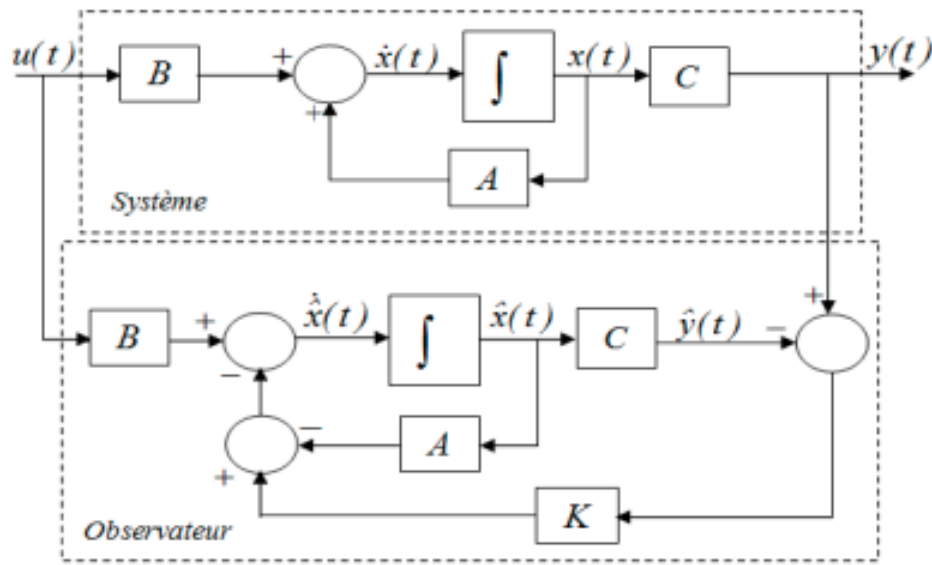


Figure II. 1 : Structure de l'observateur de Luenberger

En utilisant une technique de placement de pôles, il suffit alors de choisir le gain de l'observateur de telle sorte que les valeurs propres de la matrice 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'erreur plus rapide que celle du processus. Cependant, on ne peut les prendre infiniment grandes pour deux raisons essentielles : on ne peut utiliser que des gains réalisables et l'augmentation de la bande passante du reconstituteur ne permet plus de négliger les bruits qui deviennent prépondérants en hautes fréquences. Il faut noter qu'en présence de bruits, la dynamique de l'erreur est régie par l'équation:

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) + Lw(t) + Kv(t) \quad (II.7)$$

Cette erreur est donc sensible aux bruits par l'intermédiaire des deux fonctions de transfert  $(sI - A + KC)^{-1}L$  et  $(sI - A + KC)^{-1}K$ . L'étude du gain fréquentiel permet de quantifier l'influence des bruits sur l'erreur d'observation [25].

### II.4.2.2 Observateur à entrée inconnue

La théorie d'observateur à entrée inconnue est applicable à la classe des systèmes linéaires (II.1). Seulement cette fois, les entrées inconnues interviennent dans le modèle du système :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Où  $d(t) \in R^q$  est une entrée inconnue et E est une matrice de rang plein de dimension appropriée.

Pour le système (II.8) on dit qu'un observateur est à entrée inconnue si l'erreur d'estimation tend vers zéro en présence d'entrées inconnues. Sa structure est donnée par [26]:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x} = z(t) + Hy(t) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Où  $z(t) \in R^n$  est le vecteur d'état de l'observateur et  $\hat{x}(t) \in R^n$  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 :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = (A - HCA - K_1C)e - [F - (A - HCA - K_1C)]z(t) \quad (\text{II.10}) \\ - [T - (I - HC)]Bu(t) - (I - HC)Ed(t) - [K_2 - (A - HCA - K_1C)H]y(t) \end{aligned}$$

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

$$(HC - I)E = 0 \quad (\text{II.11})$$

$$T = I - HC \quad (\text{II.12})$$

$$F = A - HCA - K_1C \quad (\text{II.13})$$

$$K_2 = FH \quad (\text{II.14})$$

$$K = K_1 + K_2 \quad (\text{II.15})$$

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

$$\dot{e}(t) = Fe(t) \quad (\text{II.16})$$

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 (II.9) sont [27]:

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

$$(C, A_1) \text{ est stable, } A_1 = A - E[(CE)^T CE]^{-1}(CE)^T CA .$$

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.

### II.4.2.3 Observateur de Kalman-Bucy

On l'appelle aussi filtre de Kalman-Bucy. Ce dernier est l'outil utilisé pour résoudre le problème d'estimation de l'état des systèmes linéaires stochastiques à temps invariant qui sont caractérisés par des bruits blancs gaussiens de moyenne nulle et de matrice de covariance et . Le filtre de Kalman-Bucy est un observateur optimal qui repose sur la résolution de l'équation de Riccati. Kalman propose cette structure pour son observateur [28] :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t) - \hat{y}(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Pour minimiser la variance de l'erreur d'estimation  $E(e^T(t), e(t))$  on doit déterminer le gain L pour qu'il soit optimal. Pour cela, on utilise la méthode d'optimisation de Lagrange et on obtient:

$$L = PC^T R^{-1} \quad (\text{II.18})$$

OU

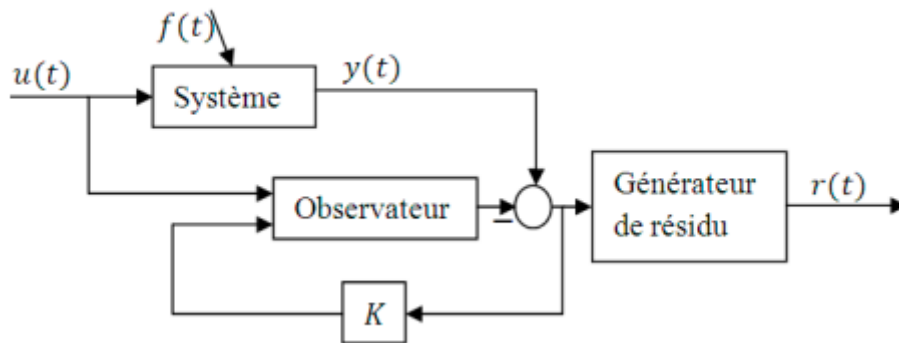
$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (\text{II.19})$$

P la matrice symétrique définie positive solution de l'équation de Riccati.

$$AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + Q = 0 \quad (\text{II.20})$$

## II.5 Principe de génération de résidus à base d'observateurs

Le principe de génération de résidus 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 (II .2). 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. Les résidus doivent être produits, de manière que pour chaque défaut un ou un ensemble de résidus soient affectés [36].



**Figure II .2:** Schéma de principe du diagnostic des défauts à base d'observateurs

Pour l'interprétation des résultats on utilise des tables logique des signatures (voir figure II.3) tel que la valeur 1 représente la valeur du résidu  $r(t)$  supérieur au seuil choisit, et 0 représente la valeur de  $r(t)$  inférieur au seuil.

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

Non localisant

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

faiblement localisant

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

fortement localisant

**Figure II.3 :** Tables des signatures.

Comme on le constate sur la figure II.3, il existe trois types de table de signature [37] :

- Non localisant : si aux moins deux signatures de défauts sont identiques

- Faiblement localisant : si toutes les signatures de défauts sont différentes, mais si on modifie une signature en changeant un 1 par 0, on trouve autre signature déjà existante.
- Fortement localisant : si toutes les signatures de défauts sont différentes et ne peuvent être déduite d'une autre en modifiant un 1 par 0.

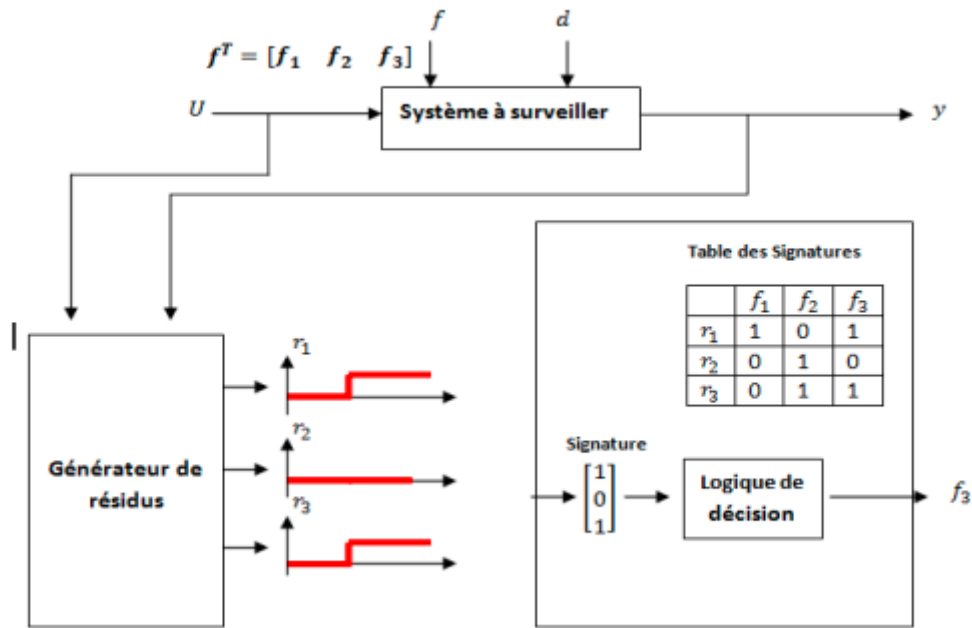


Figure II.4 : Principe de détection et localisation de défauts.

La figure II.4 résume les étapes du diagnostic. le générateur de résidus permet de générer les signaux résidus sensible aux défauts ce qui nous fournit une signature ensuite comparer cette dernière à la table signature qui permet la localisation des défauts.

## II.6 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  $1f$  s'il n'est affecté que par les défaillances  $1f$  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 n schéma particulier [38].

### II.6.1 Structure d'observateurs simplifiés

Dans cette structure le banc est constitué d'un seul observateur. Il est synthétisé de façon à n'être sensible qu'à un groupe de défauts. Dans le cas où un des défauts auquel il est sensible apparaît alors les estimations seront faussées. Dans le cas contraire, elles seront exactes [39].

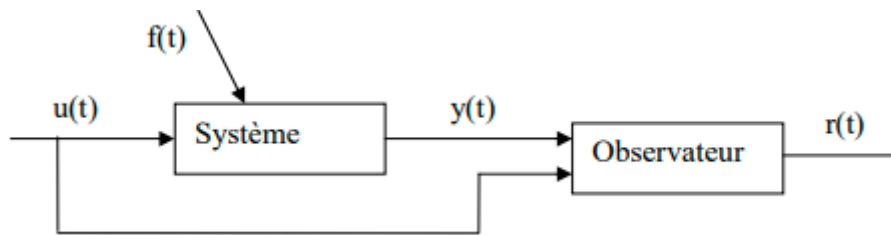
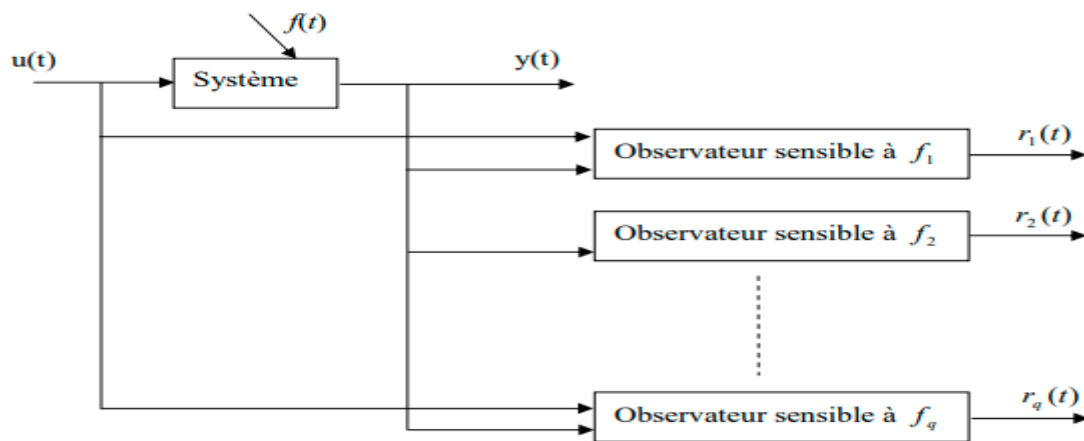


Figure II.5: Structure d'observateur simple

### II.6.2 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 [39].

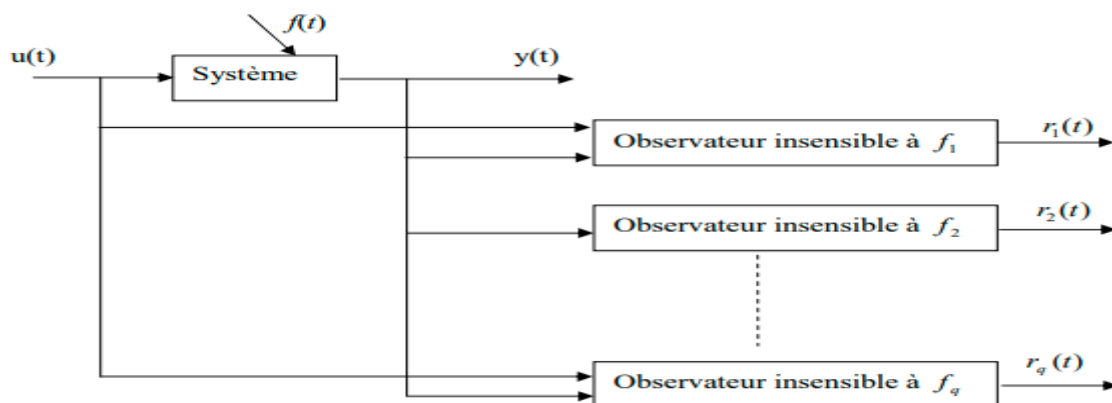


**Figure II.6 :** Structure d'observateurs dédiés.

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.

### II.6.3 Structure d'observateurs généralisés (GOS)

Ce cas consiste à synthétiser  $q$  observateurs, chacun d'entre eux étant insensible à un seul défaut. Si un défaut apparaît, l'estimation de l'ensemble du sous espace d'état sensible à ce défaut est erronée si elle ne provient pas de l'observateur insensible à ce seul défaut [40].



**Figure II.7 :** Structure d'observateurs généralisée

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les observateurs, et leur application au diagnostic. Nous avons en premier lieu parlé du principe de base d'un observateur et la notion d'observabilité, nous avons aussi présenté quelques classes d'observateurs (linéaire,

non linéaire) nous avons conclu avec la présentation du principe de génération de résidus par observateur

# **Chapitre III : Diagnostic des défauts actionneurs d'un benchmark de trois cuves**

## Chapitre III : Diagnostic des défauts actionneurs d'un benchmark de trois cuves

### III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'utiliser la technique de diagnostic à base d'observateur à entrées inconnues, pour détecter et localiser les défauts actionneurs d'un benchmark de trois cuves.

### III.2 Modélisation du système hydraulique trois cuves

#### III.2.1 Description du système

Ce système est constitué de 3 cuves cylindriques T1, T2 et T3 de même diamètre noté  $S$ . Il est équipé de deux actionneurs (pompes) qui délivrent un débit d'eau  $Q_1(t)$  et  $Q_2(t)$  respectivement dans les cuves de gauche et droite. Trois capteurs piézo-électriques permettent de mesurer les hauteurs de liquide  $L_1(t)$ ,  $L_2(t)$  et  $L_3(t)$ .

On note  $L_{\max}(t)$  la hauteur maximale des trois bacs, le débit d'équilibre et de débit maximal. Les trois cuves communiquent entre elles par des canalisations de sections  $S_{pi}$  [20].

Une vue de ce système est donnée par la figure III.2.

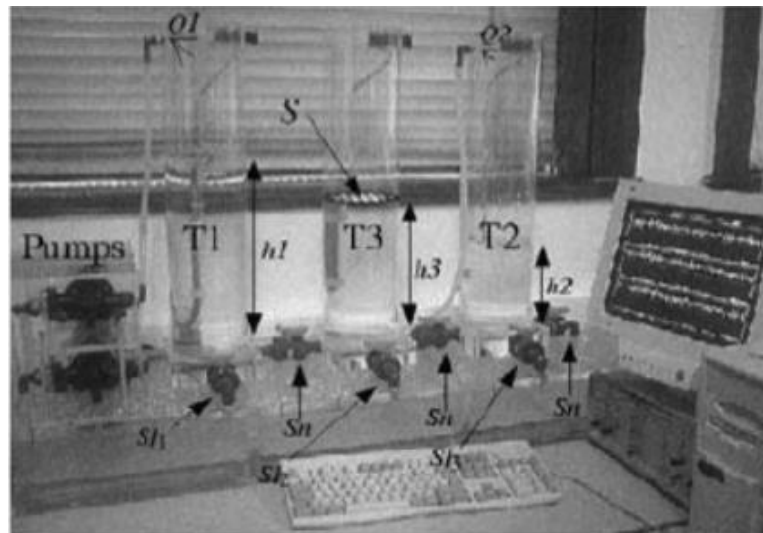


Figure III.1 : système à trois cuves [20]

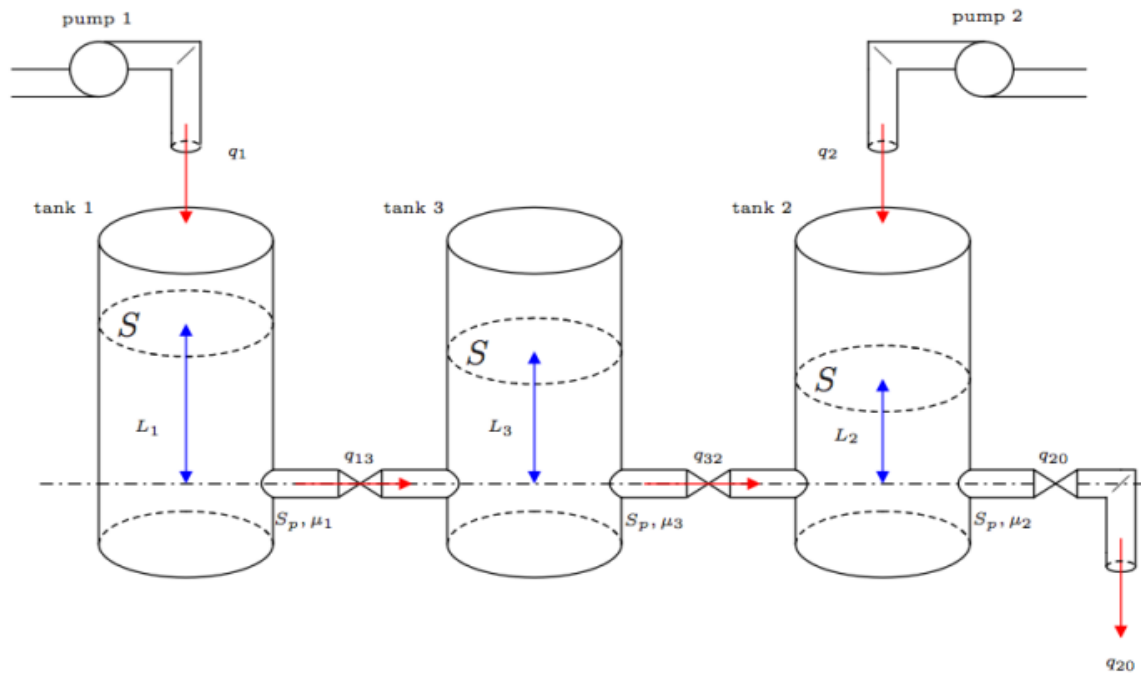


Figure III.2 : Schéma du système hydraulique communicant

Les paramètres physiques du système à trois cuves sont disposés dans le tableau suivant : [42].

Variable	Symbole	Valeur
Diamètre de la cuve	$S$	$0.0154 \text{ m}^2$
Débit de la pompe P1	$Q_1(t)$	$0.3 * 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$
Débit de la pompe P2	$Q_2(t)$	$0.3 * 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$
Coefficient de débit	$u$	0.6
La section des tuyaux	$S_p$	$5 * 10^{-5} \text{ m}^2$
L'accélération de gravité	$g$	$9.81 \text{ m/s}^2$

Tab III.1 : paramètres du système de trois bacs

### III.2.2. Modèle mathématique du système

Le modèle non linéaire traduisant le comportement dynamique du système hydraulique est déduit à partir de conservation de volume de liquide et de la loi de Bernoulli :

$$S_i = \frac{dL_i(t)}{dt} = \sum \text{débits entrants} - \sum \text{débits sortants} \quad (\text{III.1})$$

Où  $S_i$  et  $L_i$  : la section et la hauteur de chaque cuve respectivement, avec  $i = 1, 2, 3$

La différence entre les débits entrant et sortant fait évoluer le niveau à l'intérieur de chaque réservoir. Le modèle d'état non linéaire traduisant le comportement dynamique du procédé s'écrit donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Cuve 1 : } S \frac{dL_1(t)}{dt} = Q_1 - Q_{13} \\ \text{Cuve 2 : } S \frac{dL_2(t)}{dt} = Q_2 + Q_{32} - Q_{20} \\ \text{Cuve 3 : } S \frac{dL_3(t)}{dt} = Q_{13} - Q_{32} \end{array} \right. \quad (\text{III.2})$$

En utilisant la loi de Torricelli, on peut exprimer le débit du liquide de la cuve  $i^{eme}$  vers la cuve  $j^{eme}$  par :

$$Q_{ij} = u_{ij} S_p \sqrt{2g} \cdot \text{sign}(L_i - L_j) \sqrt{|L_i - L_j|} = u_{ij} S_p \cdot \text{sign}(L_i - L_j) \sqrt{2g |L_i - L_j|} \quad (\text{III.3})$$

Le débit de sortie  $Q_{20}$  est donné par  $u_{20} \cdot S_p \sqrt{2gL_2}$

On pose  $x(t) = \begin{pmatrix} l1 \\ l2 \\ l3 \end{pmatrix}$  et  $u(t) = \begin{bmatrix} q1 \\ q2 \end{bmatrix}$  le système peut être représenté sous la forme non

linéaire suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{S} \begin{pmatrix} -u_{13} S_p \cdot \sqrt{2g} \cdot \text{sign}(L_1 - L_3) \sqrt{|L_1 - L_3|} \\ S_p \sqrt{2g} [u_{32} \text{sign}(L_3 - L_2) \sqrt{|L_3 - L_2|} - u_{20} \sqrt{L_2}] \\ S_p \sqrt{2g} [u_{13} \text{sign}(L_1 - L_3) \sqrt{|L_1 - L_3|} - u_{32} \text{sign}(L_3 - L_2) \sqrt{|L_3 - L_2|}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \frac{1}{S} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix}$$

(III.4)

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = I_{3,3} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Nous obtenons trois équations différentielles non linéaires à cause des racines carrées sur les hauteurs  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$ .

Le dans (III.3) est utilisé la fonction  $sign(x)$ , qui détermine le sens de l'écoulement du courant entre deux cuves.

Sous l'hypothèse  $L_1 > L_3 > L_2$ , le modèle non linéaire précédent devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{S} \begin{pmatrix} -u_{13}S_p \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|L_1 - L_3|} \\ S_p \sqrt{2g} [u_{32} sign \sqrt{|L_3 - L_2|} - u_{20} \sqrt{L_2}] \\ S_p \sqrt{2g} [u_{13} \sqrt{|L_1 - L_3|} - u_{32} \sqrt{|L_3 - L_2|}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \frac{1}{S} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} \quad (III.6)$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = I_{3,3} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} \quad (III.7)$$

Où  $u_{ij}$  dénote les coefficients d'écoulement des canalisations entre  $T_i$  et  $T_j$  et  $g$  représente l'accélération de la pesanteur.

### III.2.3 Linéarisation du système à trois cuves :

La linéarisation consiste à transformer une équation non-linéaire en une équation linéaire applicable autour d'un point d'opération donné. En automatique, les opérations de régulation des systèmes sont en général, effectuées autour d'un point d'équilibre (pour des raisons simpliste). Le principe de linéarisation repose sur le développement en série de Taylor de la fonction non-linéaire dans l'intervalle d'étude. Le développement en série de Taylor d'une fonction  $y = f(x)$  autour du point d'équilibre (ou de fonctionnement),  $x = x_0$  [20].

$$y = f(x_0) + \frac{(x-x_0)}{1!} \left( \frac{dy}{dx} \Big|_{x=x_0} \right) + \frac{(x-x_0)^2}{2!} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \Big|_{x=x_0} \right) + \dots + \frac{(x-x_0)^n}{n!} \left( \frac{d^ny}{dx^n} \Big|_{x=x_0} \right) + \dots \quad (III.8)$$

Si la variation  $(x-x_0)$  est petite, alors on peut négliger les termes  $(x-x_0)^n$  lorsque  $n$  est supérieur à 1. Ce qui donne une relation linéaire entre les variables  $y$  et  $x$ .

$$y = f(x_0) + k(x - x_0) \text{ avec } k = \left( \frac{dy}{dx} \right) \quad (III.9)$$

Soit le système décrit par un ensemble d'équations différentielles non-linéaires :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (III.10)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (III.11)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (III.12)$$

où  $x$  et  $f$  sont des vecteurs de dimension  $(n \times 1)$  et  $u$  est un vecteur de dimension  $(m \times 1)$  Les vecteurs  $x$  et  $u$  peuvent être décomposés comme suit :

$$x = x_0 + \tilde{x} \quad (\text{III.13})$$

$$u = u_0 + \tilde{u} \quad (\text{III.14})$$

Les valeurs  $x_0$  et  $u_0$  étant des valeurs opérationnelles nominales vérifiant :

$$x_0 = f(x_0, u_0) \quad (\text{III.15})$$

Les grandeurs  $\tilde{x}$  et  $\tilde{u}$  représentent les variations respectives (c.à.d.  $\tilde{x} = \delta x$  et  $\tilde{u} = \delta u$ ) des vecteurs  $x$  et  $u$  autour des valeurs nominales ou points de fonctionnements  $x_0$  et  $u_0$  Si les grandeurs  $\tilde{x}$  et  $\tilde{u}$  sont suffisamment petites que l'on peut procéder à l'approximation suivante :

$$f_i(x_0 + \tilde{x}, u_0 + \tilde{u}) = f_i(x_0, u_0) + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right|_{x, u_0} \tilde{x}_1 + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right|_{x, u_0} \tilde{x}_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right|_{x, u_0} \tilde{x}_n + \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \right|_{x, u_0} \tilde{u}_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_m} \right|_{x, u_0} \tilde{u}_m \quad (\text{III.16})$$

Avec  $f_i$  comme l'i-ème composant de  $f$ .

Dans cette expression les termes comprenant les puissances de,  $\tilde{x}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  ou de  $\tilde{u}_j$ ,  $j = 1, \dots, m$  sont négligés.

Il s'ensuit que :

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{x}_0 \quad (\text{III.17})$$

$$\dot{\tilde{x}} = f(x_0 + \tilde{x}, U_0 + \tilde{U}) - f(x_0, U_0) \quad (\text{III.18})$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0} \tilde{x} + \left. \frac{\partial f}{\partial U} \right|_{u_0} \tilde{U} \quad (\text{III.19})$$

Pour chaque  $x_j$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) composant du vecteur  $\tilde{x}$ , on peut réécrire l'équation (III.19) comme suit :

$$\dot{\tilde{x}}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{i_0} \quad (\text{III.20})$$

$$\dot{\tilde{x}}_i = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right|_{x_0} \tilde{x}_k + \left. \frac{\partial f_i}{\partial U_j} \right|_{U_0} \tilde{U}_j \quad (\text{III.19})$$

Pour  $i = 1, 2 \dots n$ ;  $k = 1, 2 \dots n$  et  $j = 1, 2 \dots m$   $x_0 = [x_{10}, x_{20} \dots x_{n0}]$  et  $U_0 = [U_{10}, U_{20} \dots U_{m0}]$ .(1.5)

Avec

$$A = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_0, U_0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}_{x_0, U_0} \quad \text{Et} \quad B = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{x_0, U_0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{pmatrix}$$

Les matrices  $A$  et  $B$  sont dénommées les Jacobéennes de la fonction  $f$  par rapport aux variables  $x$  et  $u$  respectivement. Elles sont évaluées au point d'équilibre  $x_0$  et  $u_0$  elles sont de dimension  $(n, n)$  et  $(n, m)$  et peuvent servir à représenter la dynamique des perturbations autour des valeurs nominales comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x}(t) + B\tilde{U}(t) \quad (\text{III.20})$$

De manière générale, les éléments de la matrice  $A$  et  $B$  se calculent par les expressions suivantes :

$$A_{ik} = \frac{\partial f_i}{\partial x_k} \Big|_{x_0, U_0} = \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_k} \Big|_{x_0, U_0} \quad \text{et} \quad B_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial U_j} \Big|_{x_0, U_0} = \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial U_j} \Big|_{x_0, U_0} \quad (\text{III.21})$$

avec  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$  et  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Montrer que le système non linéaire (III.4) est donné par le modèle linéaire suivant autour des points

$$l_{10} = 40cm, l_{20} = 10cm, l_{30} = 30cm$$

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_1(t) \\ \tilde{x}_2(t) \\ \tilde{x}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k & 0 & k_1 \\ 0 & -k_3 - k_2 & k_3 \\ k_1 & k_3 & -k_1 - k_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{pmatrix} + \frac{1}{s} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_1(t) \\ \tilde{u}_2(t) \end{pmatrix} \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{pmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \end{pmatrix} = I_{3 \times 3} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{pmatrix} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Où } k_1 = \frac{S_p u_{13} \sqrt{2g}}{2S \sqrt{l_{10} - l_{30}}}, \quad k_2 = \frac{S_p u_{20} \cdot \sqrt{2g}}{2S \sqrt{l_{20}}}, \quad k_3 = \frac{S_p u_{32} \sqrt{2g}}{2S \sqrt{l_{30} - l_{20}}}$$

Les valeurs numériques qui caractérisent notre système sont :

$$u_{13} = u_{32} = 0.8, S = 0.0154m, S_p = 5 \cdot 10^{-5} m, g = 9.81m.s^{-2}$$

Ce modèle s'écrit donc de façon générale :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

Tels que :

$$A = \begin{pmatrix} -0.0136 & 0 & 0.0136 \\ 0 & -0.0278 & 0.0036 \\ 0.0136 & 0.0096 & -0.0233 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 \\ 0 & 64.9351 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ce modèle mathématique représentant le système réel n'est valide que sur un domaine de validité autour de point de fonctionnement qui est illustré par la Figure ci-après.

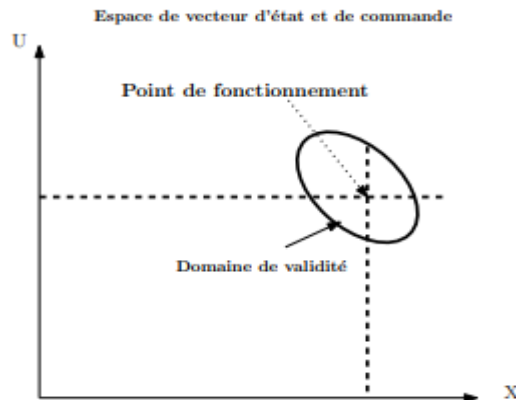


Figure III.3 : domaine de validité

### III.3 La synthèse et la construction d'un observateur de luenberger pour le diagnostic

#### III.3.1 La synthèse d'un observateur de luenberger

La synthèse de ce type d'observateurs est réalisable pour les modèles de systèmes déterministes décrits par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (III.25)$$

La structure de l'observateur de Luenberger d'ordre plein est comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \\ \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \end{cases} \quad (III.26)$$

Avec  $\hat{x} \in R^n$  et  $K \in R^{n \times p}$  : gain d'observateur

Ou comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (A - KC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ky(t) - \hat{y}(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \\ \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \end{cases} \quad (III.27)$$

On veut voir si notre observateur est robuste vis-à-vis de la perturbation sur la mesure.

L'observateur de Luenberger décrit par l'équation (III.26) est illustré par la figure suivante :

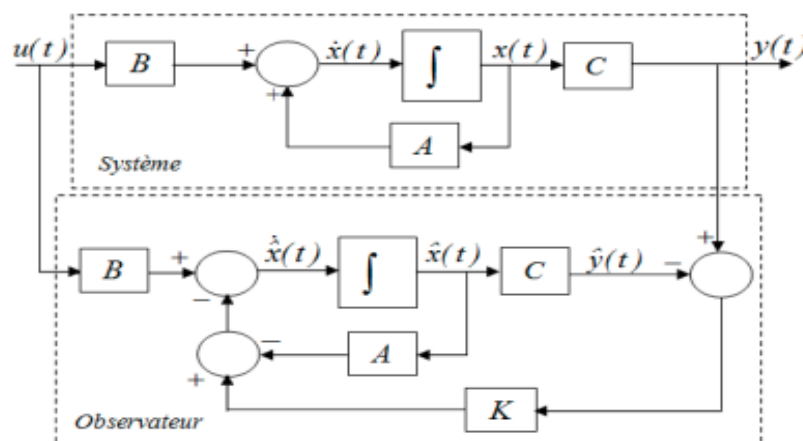


Figure III.4 : L'observateur de Luenberger

### III.3.2 La construction d'un observateur de Luenberger

L'observateur de Luenberger existe si la matrice d'observabilité :

$$O = (C^T \dots (CA)^T \dots (CA^{n-1})^T)^T = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad \text{Est de rang } n \quad (\text{III.28})$$

Mathématiquement:  $\text{rang}O = n = \dim(x(t))$

$$\Rightarrow \det(O) \neq 0$$

On calcule  $O$  :

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

$$O = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \\ -0.0136 & 0 & 0.0136 \\ 0 & -0.0278 & 0.0096 \\ 0.0136 & 0.0096 & -0.0233 \\ 0.0004 & 0.0001 & -0.0005 \\ 0.0001 & 0.0009 & -0.0005 \\ -0.0005 & -0.0005 & 0.0008 \end{pmatrix} \quad (\text{III.30})$$

On a :

$$\det \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 1 \quad (\text{III.31})$$

Alors :  $\det(O) \neq 0$  donc  $\text{rang}(O) = 3$  et le système est observable.

Le gain de l'observateur  $K$  est choisi tel que les valeurs propres de  $A - KC$  soient toutes à parties réelles strictement négatives.

On calcule le gain de l'observateur d'après nos trois valeurs propres.

$$P = [-0.2 \quad -0.7 \quad -0.3]$$

On calcule K gain d'observateur par l'instruction PLACE sous Matlab.

$$K = \begin{pmatrix} 0.1864 & 0 & 0.0136 \\ 0 & 0.6722 & 0.0096 \\ 0.0136 & 0.0096 & 0.2767 \end{pmatrix} \quad (\text{III.32})$$

Notre structure de l'observateur d Luenberger devient comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}}(t) = \begin{pmatrix} -0.0136 & 0 & 0.0136 \\ 0 & -0.0278 & 0.0036 \\ 0.0136 & 0.0096 & -0.0233 \end{pmatrix} \hat{x}(t) + \begin{pmatrix} 0.1864 & 0 & 0.0136 \\ 0 & 0.6722 & 0.0096 \\ 0.0136 & 0.0096 & 0.2767 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}(t) + \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 \\ 0 & 64.9351 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(t) \\ + \begin{pmatrix} 0.1864 & 0 & 0.0136 \\ 0 & 0.6722 & 0.0096 \\ 0.0136 & 0.0096 & 0.2767 \end{pmatrix} y(t) - \hat{y}(t) \\ \hat{y}(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \end{array} \right. \quad (\text{III.32})$$

Alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}}(t) = \begin{pmatrix} -0.2000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7000 & 0 \\ 0 & 0 & -0.3000 \end{pmatrix} \hat{x}(t) + \begin{pmatrix} 64.9351 & 0 \\ 0 & 64.9351 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 0.1864 & 0 & 0.0136 \\ 0 & 0.6722 & 0.0096 \\ 0.0136 & 0.0096 & 0.2767 \end{pmatrix} y(t) - \hat{y}(t) \\ \hat{y}(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{x}(0) = \hat{x}_0 \end{array} \right. \quad (\text{III.33})$$

### III.3.2 simulation de la détection d'un défaut actionneur à base d'un observateur de Luenberger

#### III.3.2.1 simulation en absence des défauts

Après la simulation du système sur MATLAB/Simulink (Figure III.5). Nous avons obtenu les résultats présentés dans les Figure (III.7) et (III.8) ci-dessous :

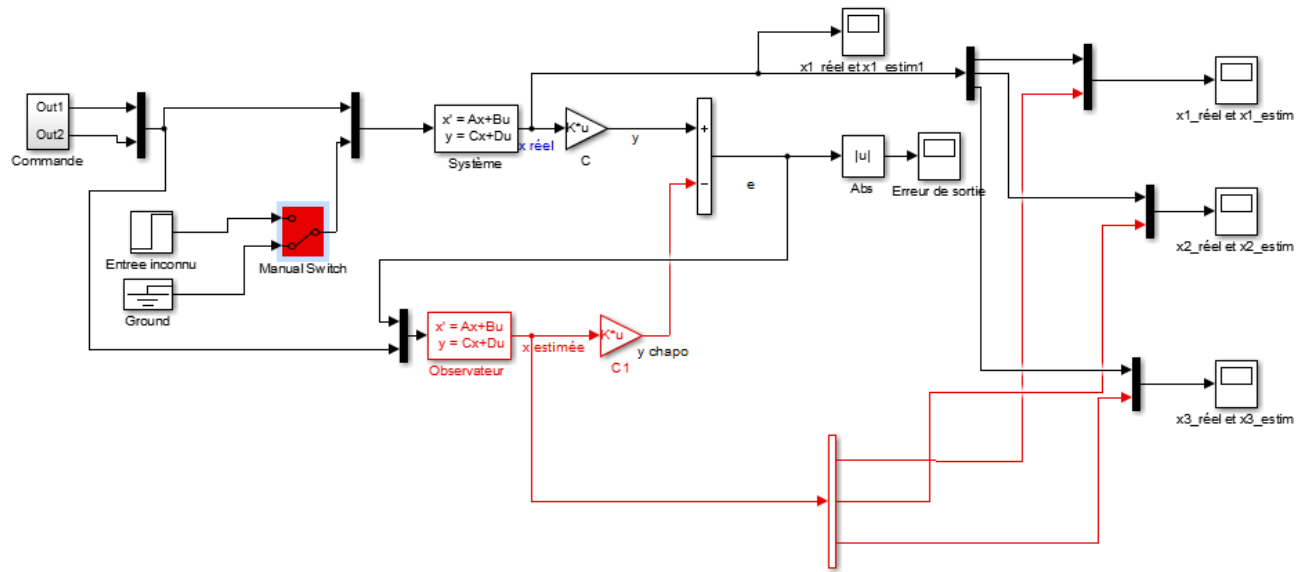


Figure III.5 : Schéma de Simulink du système sans défauts.

Tels que notre manuel switch reliée avec (ground) c.-à-d. absence de défauts comme présente dans la Figure III.6

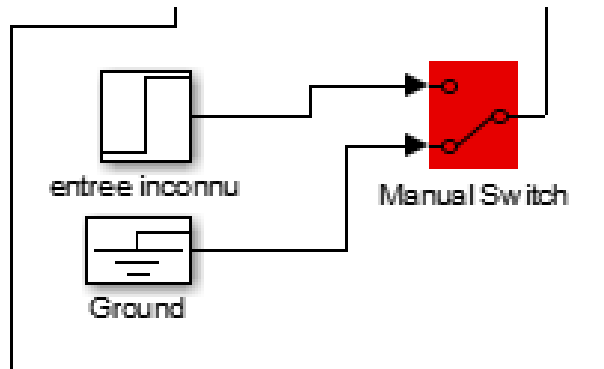


Figure III.6 : schéma de manuel switch

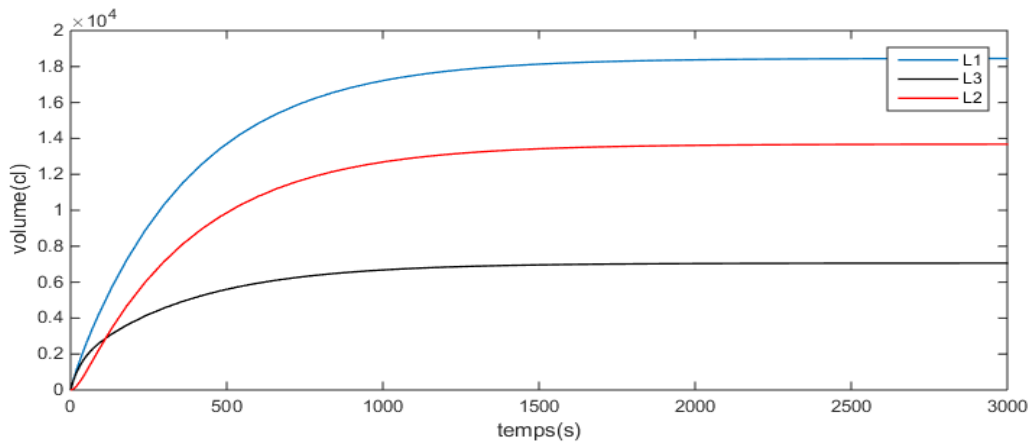


Figure III.7 : Les sorties du système

On remarque que les sorties du système augmente jusqu'à point ils stabilisent.

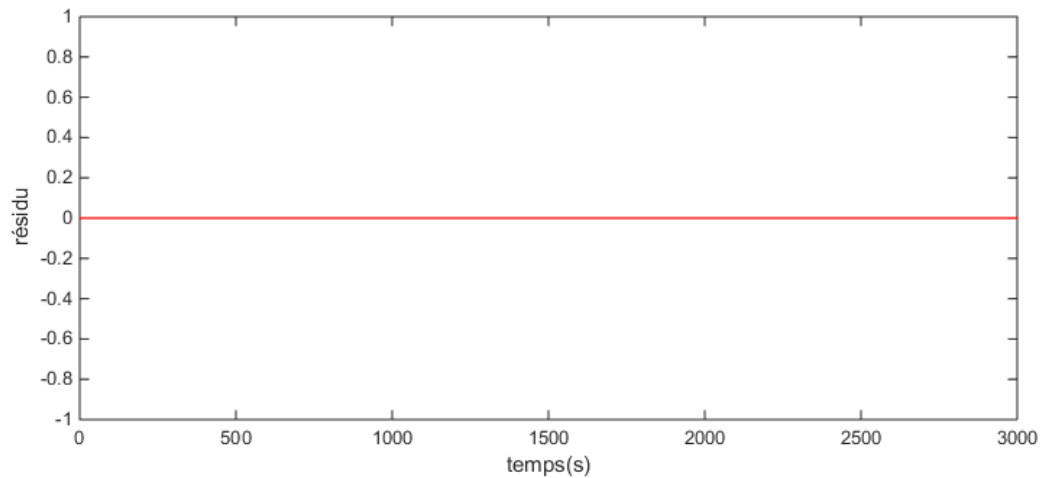


Figure III.8 : Le résidu.

**-Interprétations**

Remarque : on considère le seuil =0

La figure précédente représente le résidu du système on absence de défaut et de perturbation. Le résidu est zéro.

On peut conclure que notre observateur proposé à une bonne convergence des états reconstruit vers leurs états réels.

**III.3.2.2 simulation en présence d'un défaut**

Cette étape permet de décider si le système se trouve ou non dans l'état de fonctionnement normal cela en détectant la présence des défauts.

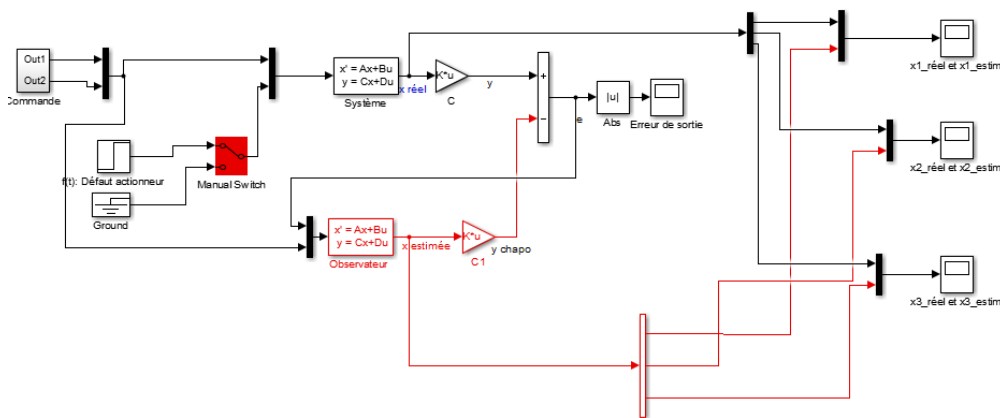


Figure III.9 : Schéma de Simulink du système avec défaut.

Tels que le manuel switch reliée avec défaut actionneur c.-à-d. présence de défauts comme présente dans la Figure III.10

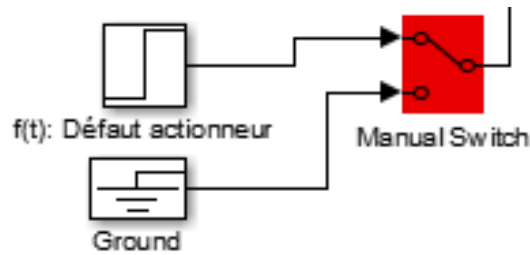


Figure III.10 : schéma de manuel switch

Nous avons obtenu les résultats présentés dans les Figure (III.11) et) ci-dessous :

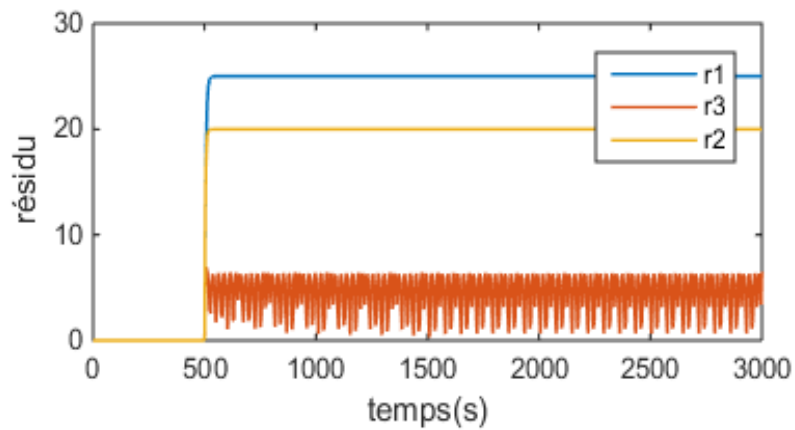


Figure III.11 : le résidu en présence d'un défaut

### III.3.2.3 simulation en présence d'une entrée inconnue

Le Schéma de simulation du système en présence d'une entrée inconnue et présenter dans la figure III.12



### -Interprétations

Notre observateur détecte la perturbation (entrée inconnue), la même chose pour un défaut.

Alors on peut dire que l'observateur de Luenberger sensible aux entrées inconnues  $d(t)$ .et aussi aux défauts  $f(t)$ .et il ne distingue pas entre les deux

Donc il n'est pas valide pour ce genre de problème (possibilité de découplage). Donc on utilise un observateur robuste aux entrées inconnues pour la reconstruction d'état afin de rendre le résidu indépendant des perturbations.

On propose un observateur dit UIO observateur a entrée inconnue.

## III.4 La synthèse et la construction et la simulation d'un observateur à entrées inconnues pour le diagnostic

### III.4.1 La synthèse d'un observateur à entrées inconnues pour le diagnostic

La synthèse de ce type d'observateurs est réalisable pour les modèles de systèmes décrits par :

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

$M_x$  ,  $M_y$  sont respectivement les matrices de distribution de défauts actionneurs et défauts capteurs. Dans ce travail nous considérons que le système est soumis à des défauts actionneurs seulement.  $E$  La matrice de distribution des entrées inconnues sur l'état.

Le système linéaire décrit par les équations suivantes :

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

La structure de l'observateur UIO d'ordre plein comme suit :

$$\sum_{obs} = \begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t) \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Où  $\hat{x} \in R^n$  est l'estimation du vecteur d'état et  $z \in R^n$  un vecteur d'état de l'observateur,  $F, T, K, H$  sont des matrices de dimensions compatibles avec celles des signaux  $z$ ,  $u$  et  $y$ .

Ces matrices sont déterminées afin de pouvoir réaliser un découplage des entrées inconnues et autres exigences de conception. L'observateur UIO décrit par l'équation (III.36) est illustré par la figure suivante :

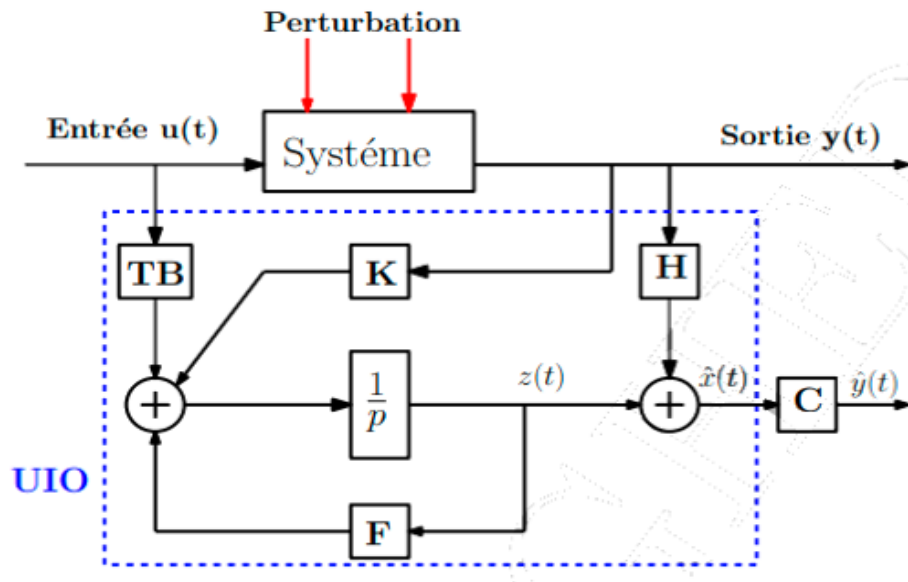


Figure III.15 : observateur entrée inconnue

Vous trouvez dans la page Annexe la synthèse d'algorithme de l'observateur à entrée inconnue

### III.4.2 Construction de l'observateur à entrée inconnue

Pour construire l'observateur il est important de s'assurer de ces deux conditions :

- 1-  $\text{rang}(CE) = \text{rang}(E) = n_d$
- 2- la paire  $(C, A)$  est détectable.
  - soit  $E = [1; -3; 0]$  .

Comme  $A$  est Hurwitz et la paire  $(C, A)$  est observable, pour que la construction de l'observateur soit possible on trouve :

$$\text{rang}(CE) = \text{rang}(E) = 1$$

Comme la condition est satisfaite, il faut faire le calcul des matrices  $F, K, Z, H, T^*B$  :

$$F = \begin{pmatrix} -0.2000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7000 & 0 \\ 0 & 0 & -0.3000 \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} 0.1678 & 0.0517 & 0.0151 \\ 0.2059 & 0.0672 & 0.0050 \\ 0.0136 & 0.0096 & 0.2767 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 0.1000 & -0.3000 & 0 \\ -0.3000 & 0.9000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$T = \begin{pmatrix} 0.9000 & 0.3000 & 0 \\ 0.3000 & 0.1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000 \end{pmatrix}$$

$$T^* B = \begin{pmatrix} 58.4416 & 19.4805 \\ 19.4805 & 6.4935 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Alors (III.36) devient :

$$\dot{z}(t) = \begin{pmatrix} -0.2000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.7000 & 0 \\ 0 & 0 & -0.3000 \end{pmatrix} z(t) + \begin{pmatrix} 58.4416 & 19.4805 \\ 19.4805 & 6.4935 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} 0.1678 & 0.0517 & 0.0151 \\ 0.2059 & 0.0672 & 0.0050 \\ 0.0136 & 0.0096 & 0.2767 \end{pmatrix} y(t)$$

$$\hat{x}(t) = z(t) + \begin{pmatrix} 0.1000 & -0.3000 & 0 \\ -0.3000 & 0.9000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} y(t) \quad (\text{III.37})$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \hat{x}(t) \quad (\text{III.38})$$

III.4.3 simulation d'un défaut actionneur à base d'un observateur entrée inconnu

III.4.3.1 Simulation de l'observateur en absence de défauts et en présence d'une entrée inconnue

Après la simulation du système en présence de entrées inconnues (échelon, sinusoïdale) sur MATLAB/Simulink (Figure III.16) nous avons obtenu les résultats présentés dans les Figure III.18 et III.19 ci-dessous :

UIO pour la détection est présentée dans la figure suivant :

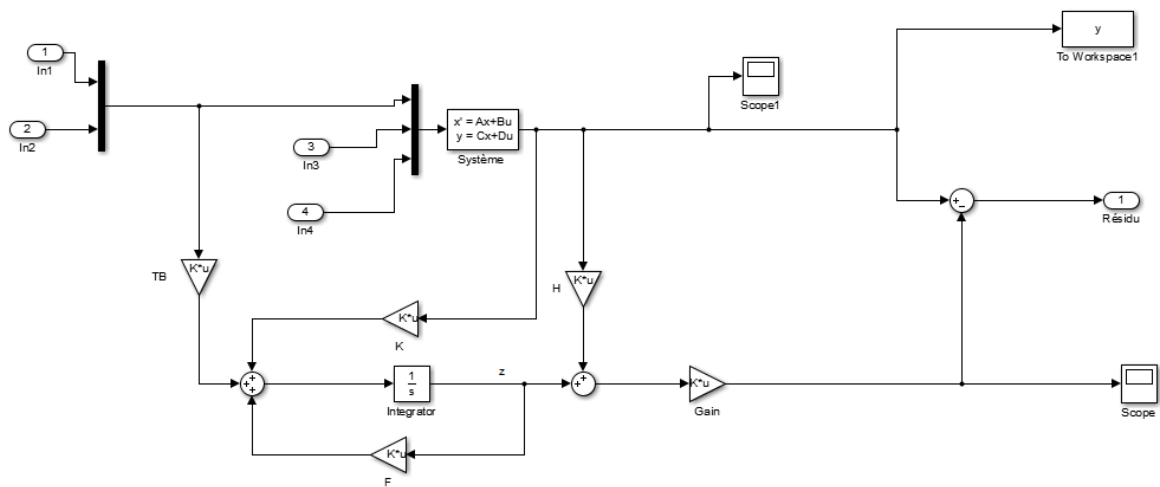


Figure III.16 : Schéma de simulation du système sans défauts.

Le manuel switch est relie avec l'entrée inconnue comme suit :

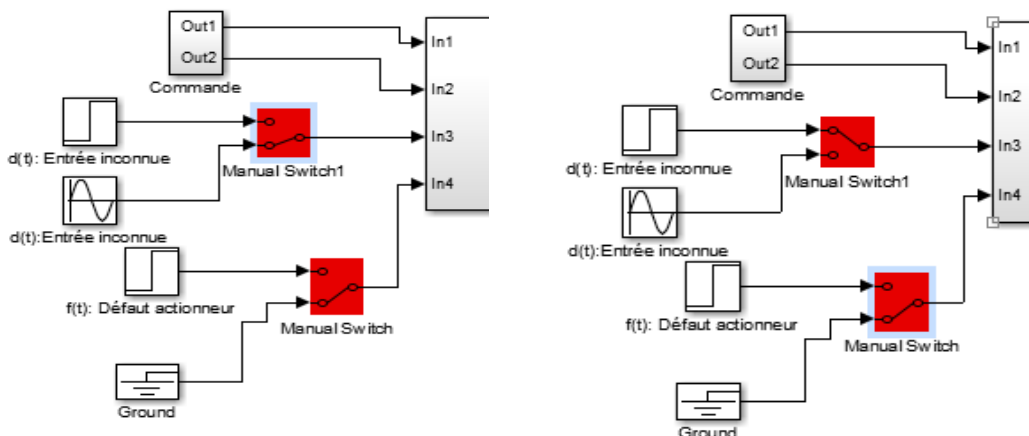
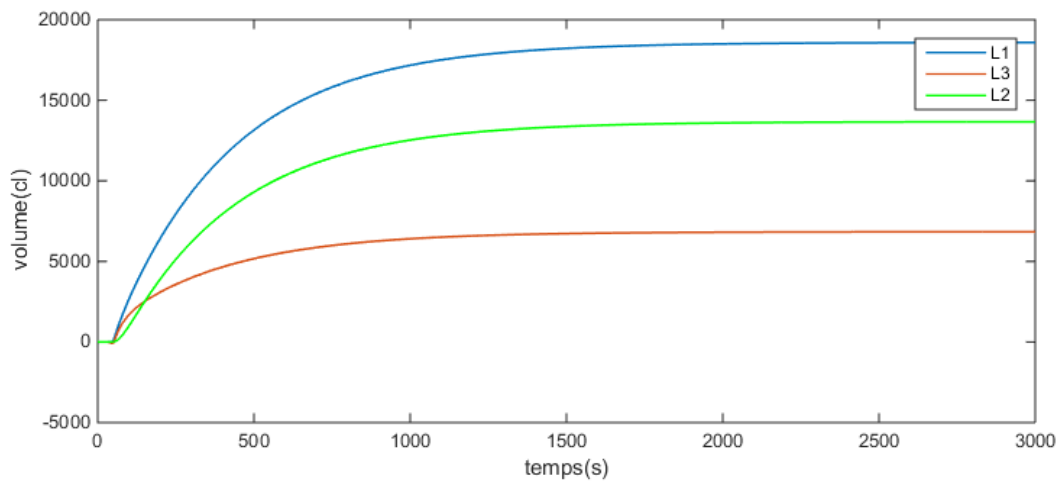


Figure III.17 : schéma de manuel switch en cas d'entrée inconnue

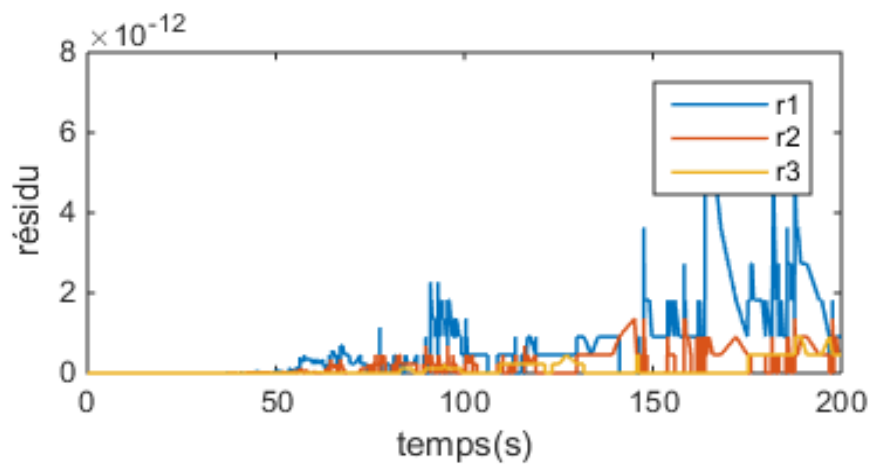
Les sorties du système sont présentées dans la figure suivant :



**Figure III.18:** Les sorties du système

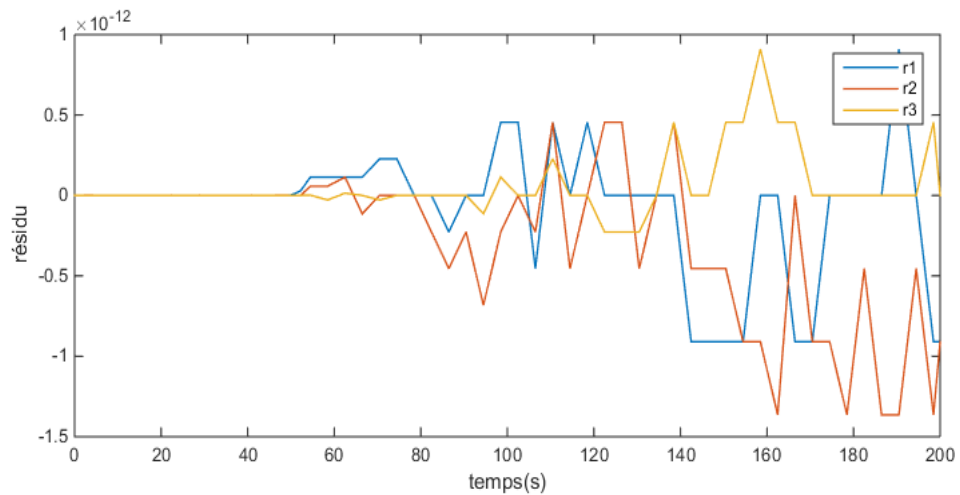
Pour notre résidu est présente dans la figure suivant :

- Les cas de  $e(t)$  : échelon



**Figure III.19 :** Le résidu en absence de défaut et en présence d'entrée inconnue

- Le cas de  $e(t)$  : sinusoïdale



**Figure III.20 :** Le résidu en absence de défaut et en présence d'entrée inconnue

### -Résultats et commentaires

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation, en absence des défauts et en présence d'une entrée inconnue.

Le résidu est tendu vers zéro (nul) (le seuil toujours =0) que ce soit la nature de signal d'entrée inconnue. Donc l'observateur UIO robuste aux entrées inconnues, et distinguer entre une entrée inconnue affectant le système et un défaut d'actionneur.

#### III.4.3.2 Simulation de l'observateur en présence de défauts

Cette étape permet de décider si le système se trouve ou non dans l'état de fonctionnement normal cela en détectant la présence des défauts.

Nous avons obtenu les résultats présentés dans Figure III.23 ci-dessous :

Le manuel switch est relie avec un défaut actionneur comme presente dans la figure suivant :

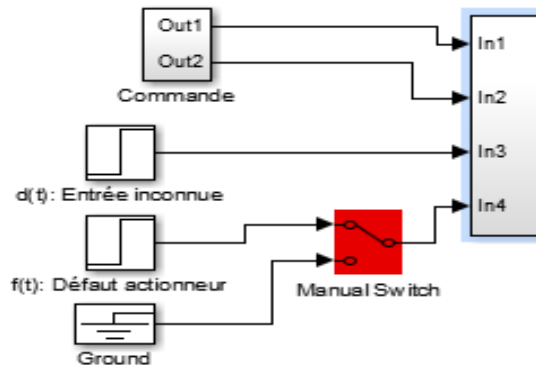


Figure III.21 : schéma de manuel switch

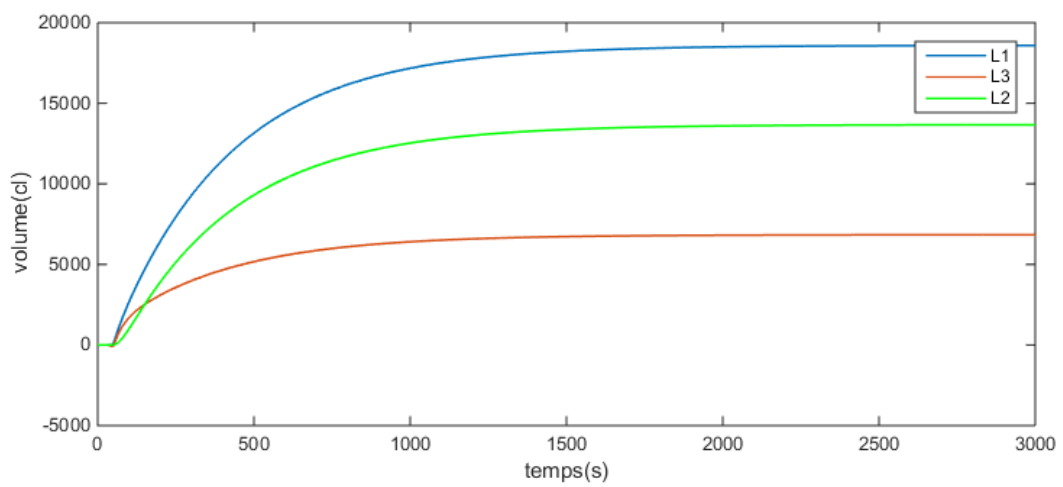


Figure III.22 : les sorties du système en présence des défauts

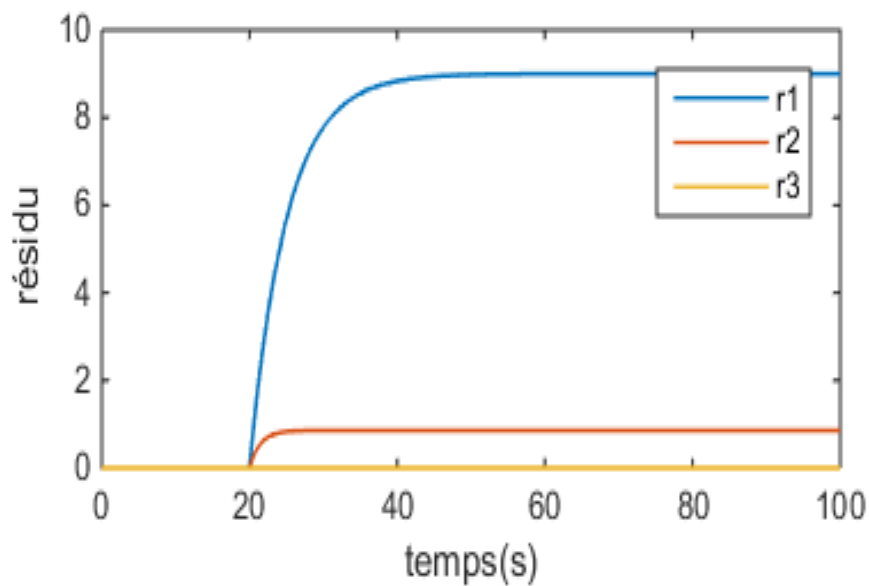


Figure III.23 : le résidu de système en présence des défauts

### -Résultats et commentaires

Les figures précédentes représentent les résidus obtenus après la simulation, en présence des défauts.

La figure III.23 représente le résidu en cas de présence de défauts actionneur, on remarque que le résidu est différent de zéro aux moments d'apparition de défaut alors le défaut est bien détecté.

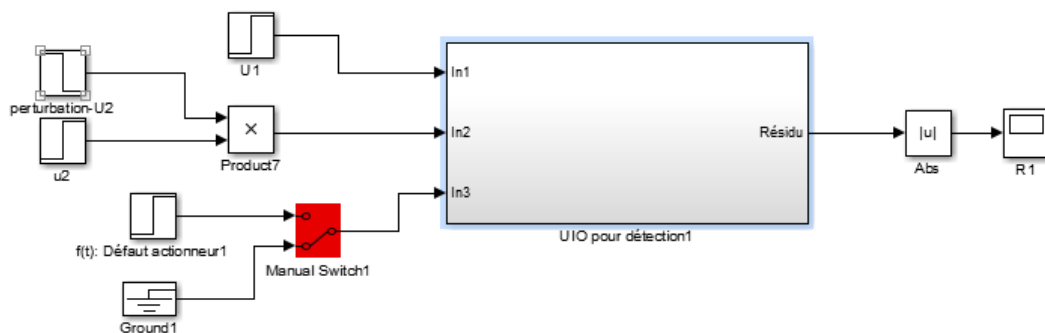
D'après les résultats obtenus on remarque que la détection des défauts est assurée contrairement à leurs localisations. Alors pour y remédier on propose d'isoler ces défauts avec deux observateurs UIO.

#### III.4.3.3 Simulation de l'isolation des défauts actionneurs

Dans cette étape on va utiliser deux observateurs UIO pour localiser le défaut

- **Le premier scénario**
  - ❖ **Défaut actionneur 1**

On veut localiser le défaut actionneur 1. Malgré l'existence d'une perturbation sur le deuxième actionneur comme il est présenté dans la figure III.24.



**Figure III.24 :** Schéma d'isolation de défaut actionneur 1

Le résultat de simulation en absence de défaut actionneur 1 est représenté dans la figure III.26.

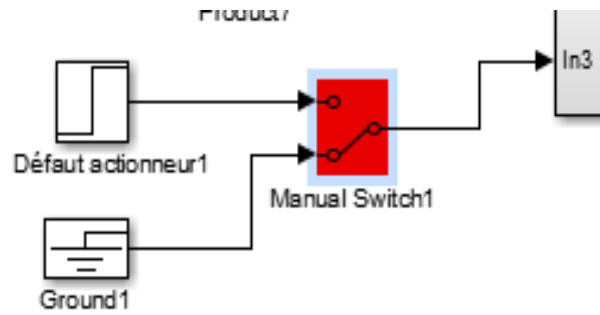


Figure III.25 : Schéma de manuel switch

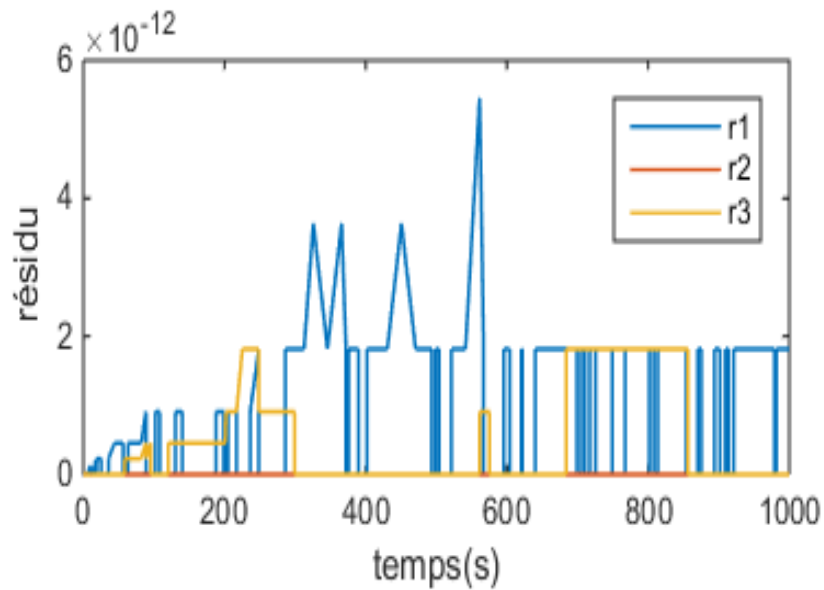


Figure III.26 : Le résidu en absence de défaut actionneur 1

Le résultat de simulation en présence de défaut actionneur 1 est représenté dans la figure III.28.

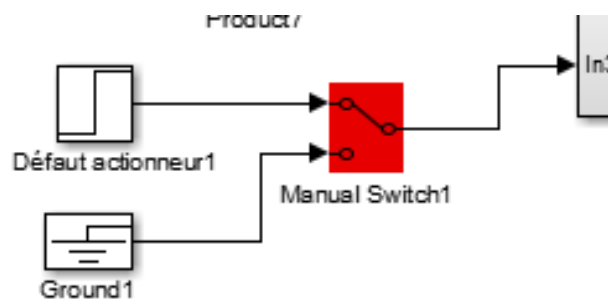


Figure III.27: Schéma de manuel switch

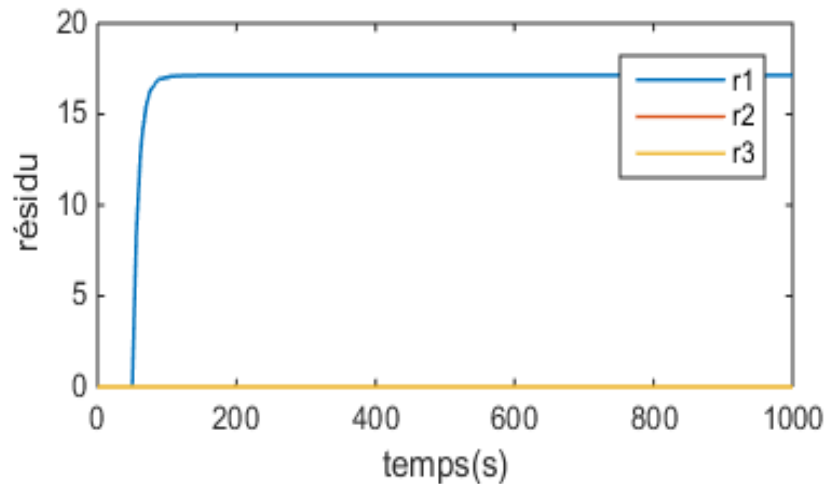


Figure III.28 : Le résidu en présence de défaut actionneur 1

### -Résultats et commentaires

La figure III.22 représente Le résidu en absence de défaut actionneur 1, et la figure III.28 représente Le résidu en présence de défaut actionneur 1.

D'après les résultats obtenus on remarque que le résidu en absence de défaut actionneur 1 est tant vers zéro (nul), et a la présence de défaut le résidu est différent de zéro aux moments d'apparition de défaut actionneur 1.

D'après les résultats obtenus on conclure que UIO 1 est sensible que au défaut actionneur 1.

### ❖ Défaut actionneur 2

On veut localiser le défaut actionneur 2. Malgré l'existence d'une perturbation sur le premier actionneur comme il est présenté dans la figure III.29.

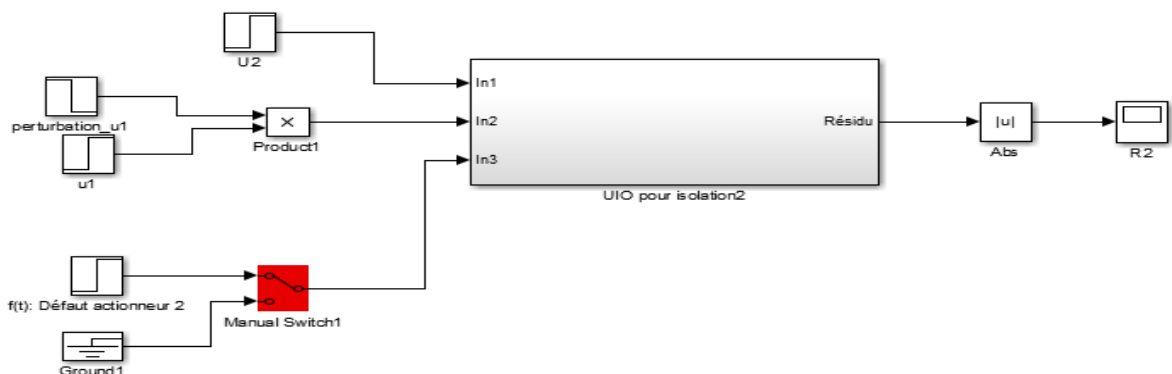
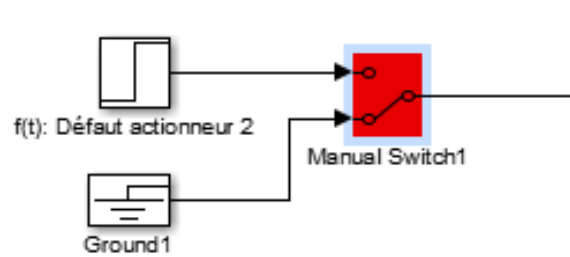
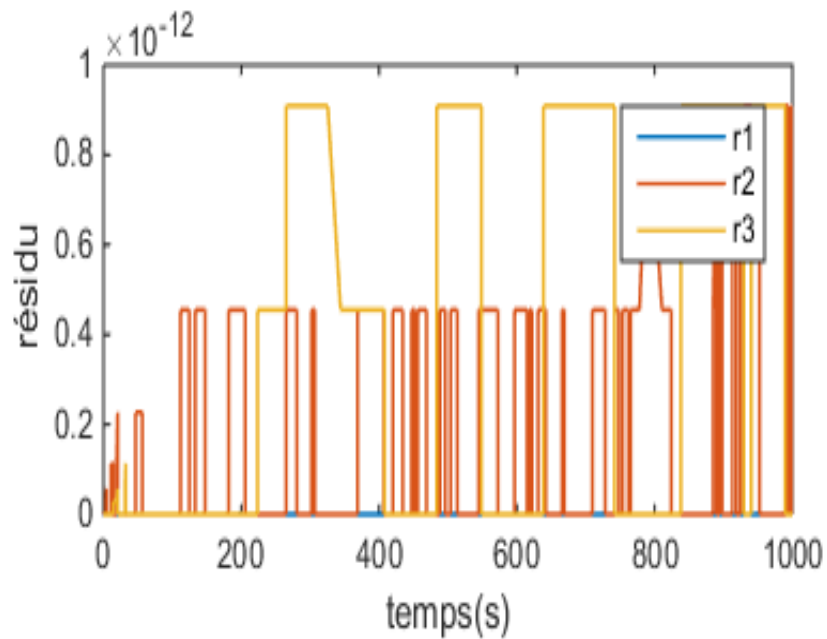


Figure III.29 : Schéma d'isolation de défaut actionneur 2

Le résultat de simulation en absence de défaut actionneur 2 est représenté dans la figure III.31.

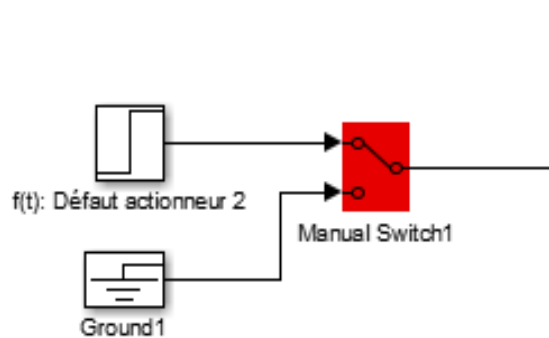


**Figure III.30 :** Schéma de manuel switch en absence des défauts

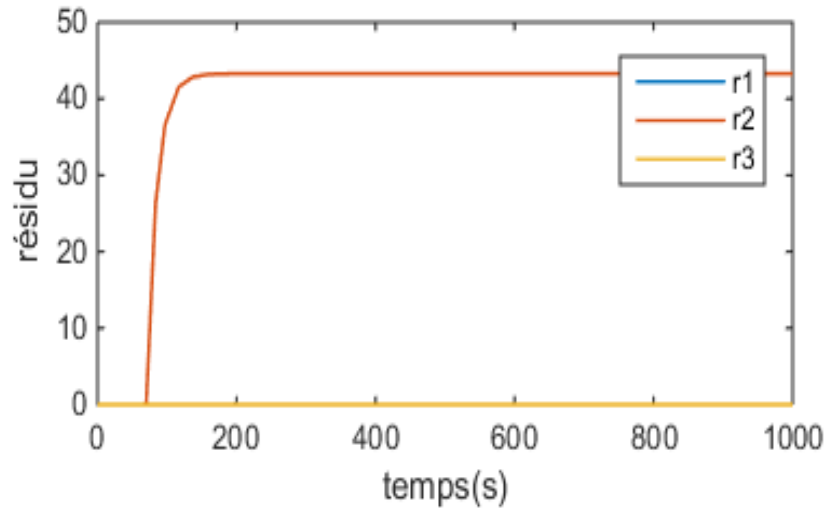


**Figure III.31:** Le résidu en absence de défaut actionneur 2

Le résultat de simulation en présence de défaut actionneur 2 est représenté dans la figure III.33



**Figure III.32:** Schéma de manuel switch



**Figure III.33 :** Le résidu en présence de défaut actionneur 2

### -Résultats et commentaires

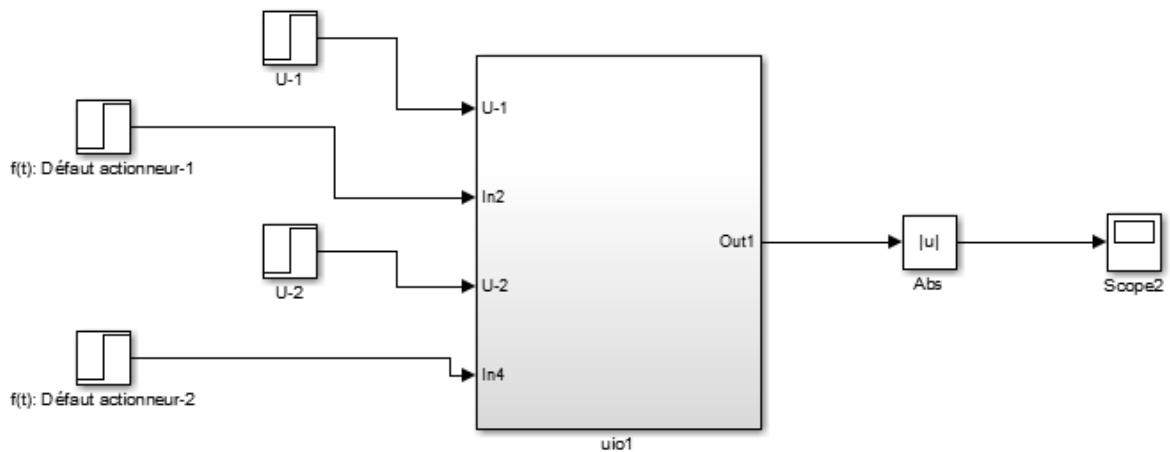
La figure III.31 représente Le résidu en absence de défaut actionneur 2, et la figure III.33 représente Le résidu en présence de défaut actionneur 2.

D'après les résultats obtenus on remarque que le résidu en absence de défaut actionneur 2 est tant vers zéro (nul), et a la présence de défaut le résidu est différent de zéro aux moments d'apparition de défaut actionneur 2.

D'après les résultats obtenus on conclure que UIO 2 est sensible que au défaut actionneur 2.

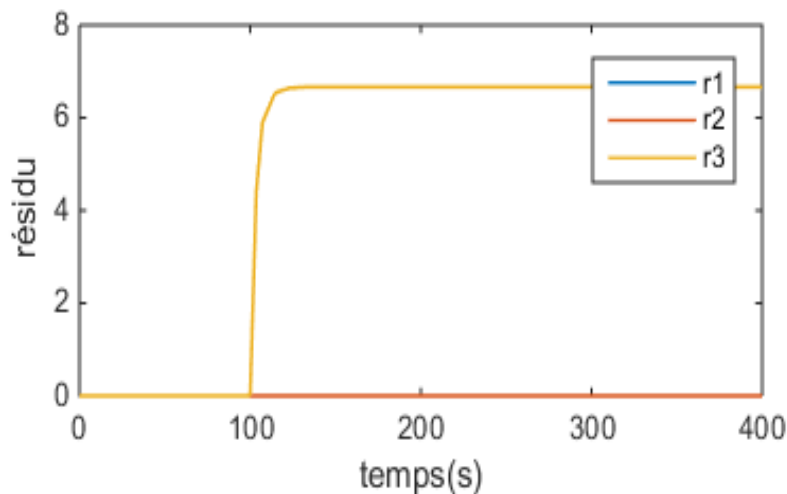
- **Deuxième scénario**
  - ❖ **Défaut additif 1**

On veut localiser le défaut actionneur 1. Malgré l'existence d'un défaut additif sur U2 comme il est présenté dans la figure III.34



**Figure III.34 :** Schéma d'isolation de défaut actionneur 1 en présence de défaut additif sur U2

Le résultat de simulation en présence de défaut actionneur 1 en présence de défaut additif sur U2 est représenté dans la figure III.35



**Figure III.35 :** Le résidu du défaut actionneur 1 en présence de défaut additif sur U2

### Résultat et commentaires :

La figure III.35 représente le résultat de simulation, on remarque que le résidu est différent de zéro aux moments d'apparition de défaut actionneur 1 a (100s), alors le défaut est bien localisé. D'après les résultats obtenus nous concluons que le défaut additif sur U2 est considéré comme une déviation inconnue d'un signal, C'est ta dire l'observateur UIO1 ne détecte que le défaut actionneur 1 donc localisations de défaut actionneur 1 est assurée.

❖ Défaut additif 2

Maintenant On veut localiser le défaut actionneur 2. Malgré l'existence d'un défaut additif sur U1 comme il est présenté dans la figure III.36

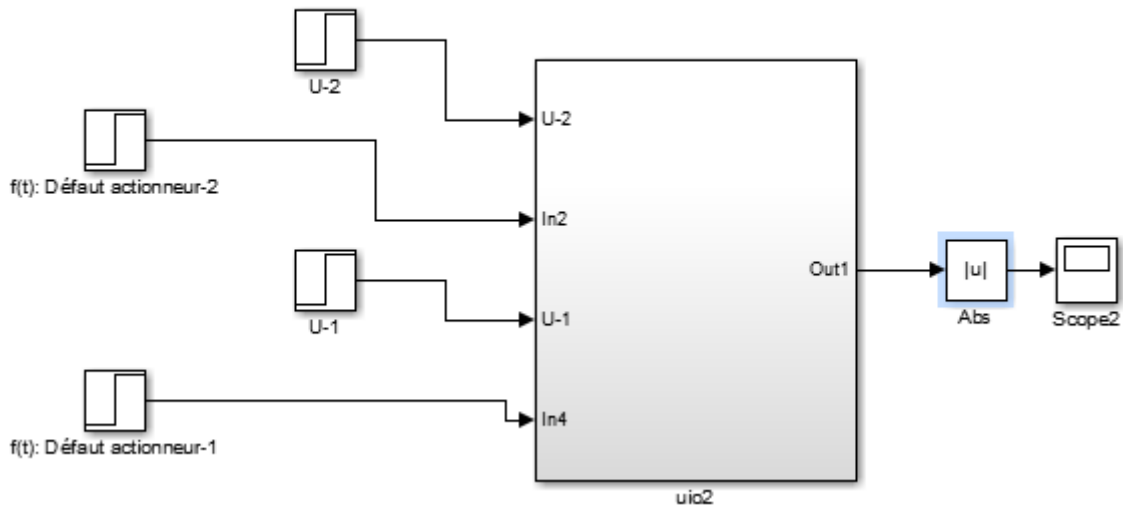


Figure III.36 : Schéma d'isolation de défaut actionneur 2 en présence de défaut additif sur U1

Le résultat de simulation en présence de défaut actionneur 2 en présence de défaut additif sur U1 est représenté dans la figure III.37.

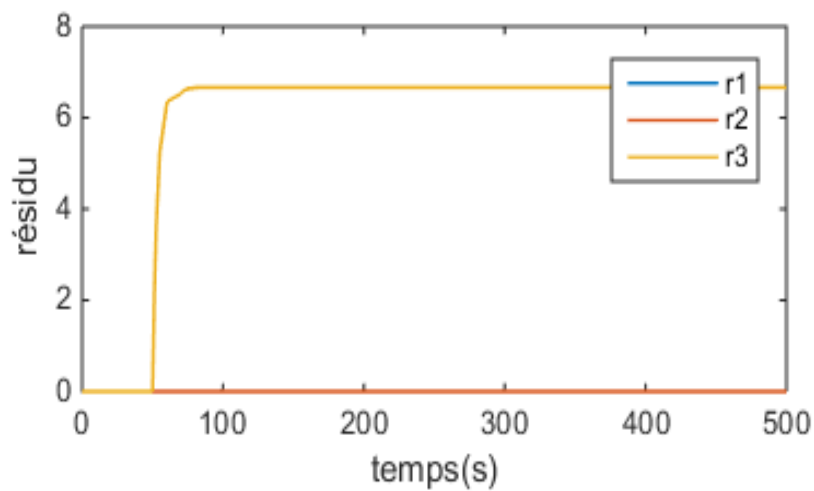


Figure III.37 : Le résidu du de défaut actionneur 2 en présence de défaut additif sur U1

**Résultat et commentaires :**

La figure III.37 représente le résultat de simulation, on remarque que le résidu est différent de zéro aux moments d'apparition de défaut actionneur 2 a (50s), alors le défaut est bien localisé.

D'après les résultats obtenus nous concluons que le défaut additif sur U1 est considéré comme une déviation inconnue d'un signal, c'est à dire l'observateur UIO2 ne détecte que le défaut actionneur 2 donc localisations de défaut actionneur 2 est assurée.

**III.4 Conclusion**

Après avoir présenté le modèle système hydraulique trois bacs, nous avons estimé les états du système considéré en utilisant un observateur de Luenberger en absence des défauts et en présence d'une entrée inconnue. On conclure que l'observateur de Luenberger est sensible pour n'importe qu'elle entrée au système.

On utilise aussi un observateur à entrées inconnues en absence de défauts. Nous avons montré que l'observateur à entrée inconnue convergent asymptotiquement et que les sorties estimées sont pratiquement confondues avec les sorties réelles.

Puis, nous avons considéré la présence des défauts actionneurs, les défauts sont bien été détectés et bien localisés .

### Conclusion général

Nous avons présenté dans ce mémoire le diagnostic de défauts affectant les actionneurs.

Dans un premier temps, nous avons donné un bref rappel sur les concepts et la terminologie propre au diagnostic, ainsi que les méthodes de diagnostic de défaut sans modèle et avec modèle mathématique.

Par la suite, nous avons présenté la linéarisation des systèmes non linéaires, pour passer à l'estimation d'état en utilisant un observateur de Luenberger, et pour estimer les états en présence de perturbations, nous avons présenté l'observateur à entrées inconnues, dont nous avons estimé les états du système hydraulique trois cuves en utilisant ce dernier type d'observateur.

Pour le diagnostic de défaut actionneur, nous avons présenté l'approche basée sur l'utilisation de l'observateur de Luenberger et l'observateur à entrée inconnue

En premier temps en utilise l'observateur de Luenberger pour voir sa sensibilité pour les entrées inconnues

Puis en utilise l'observateur à entrée inconnue pour la détection et l'isolation des défauts actionneur, tels que dans l'isolation en pratiquant deux scénarios.

Le premier c'est de l'isole d'un défaut actionneur à la présence d'une perturbation.

Le deuxième scénario c'est l'isolation d'un seul défaut actionneur à la présence d'un autre défaut additif sur l'autre défaut actionneur.

Comme perspectives on peut voir :

Une étude comparative de la structure DOS et GOS la génération des résidus.

Etude des différents cas de défauts actionneurs, capteurs et système.

# ANNEXE

---

-la synthèse de l'algorithme de l'observateur UIO :

- Vérifiez la condition de rang pour  $E$  et  $CE$  :

$$\text{Si } \text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$$

-calculer  $H$ ,  $T$  et  $A_1$

$$H = E[(CE)^T CE]^{-1}(CE), T = I - HC, A_1 = TA$$

- Vérifier l'observabilité : si  $(C, A_1)$  observable, UIO existe.

- Construire une matrice de transformation  $P$  pour la décomposition canonique observable :  
pour sélectionner

$$P = [p_1, \dots, p_{n_0} : p_{n_0+1}, \dots, p_n]^T$$

- effectuer une décomposition canonique observable sur  $(C, A_1)$  :

$$PA_1P^{-1} = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}, CP^{-1} = [C^* \ 0]$$

-Vérifier la détectabilité de  $(C, A_1)$ , si l'une des valeurs propres de  $A$  est instable, un UIO ne  
exister pas.

- Sélectionnez  $n$  valeurs propres souhaitables et concevez-les pour  $A_{11} - K_p^1 C^*$  en utilisant le  
placement des poteaux.

- Calculer :  $K_1 = P^{-1}[(K_p^1)^T (K_p^2)^T]^T$  où  $K_p^2$

Peut être n'importe lequel  $(n - n_1) \times m$  matrice non nulle

- Calculer  $F$  et  $K$

$$\begin{cases} F = A_1 - k_1 C \\ K = K_1 + K_2 = K_1 + FH \end{cases}$$

-fin

# Bibliographie

---

- [1] L. ZETAO. Contributions à l'élaboration d'algorithme d'isolation et d'identification de défaut dans un système non linéaires. Thèse, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [2] M. R. Zemouri .Contribution à la surveillance des systèmes de production, thèse doctorat, Université de Franche-Comté, 2003.
- [3] N. Djeghali, « Observation, diagnostic et commande de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.
- [4] S. Djennoune, «Cours diagnostic ».Promotion Automatique et Systèmes, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2018/2019.
- [5] R. Isermann and P. Ballé, Terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis, Technical Committee of Safeprocess 1997.
- [6] Dr.MENIGHED KAMEL «Cours diagnostic » -Automatisation en Industries Pétrochimiques. UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955-SKIKDA 2019.
- [7].N.S.Boukhalfa.Synthèse d'observateurs non linéaires, Application au diagnostic de défauts. Thèse magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi- Ouzou.
- [8]. Y.Derdour. Comparaison des Outils de Diagnostic par l'Analyse Structurale et la Théorie des Observateurs thèse magister, Université D'ORAN 2009/2010.
- [9]. Nelly OLIVIER-MAGET, Surveillance des systèmes dynamiques hybrides, Application aux procédés, Université de Toulouse, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, 12 décembre 2007.
- [10].S. METHNANI. Diagnostic. reconstruction et identification des défauts capteur et actionneurs, application aux stations d'épurations des eaux usées, Université de Sfax, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 17 décembre 2012.
- [11]. AKHENAK. Abdelkader. « Conception d'observateurs non linéaires par approche multi-modèle : application au diagnostic ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.
- [12]. R.J. PATTAN. Fault Detection and Diagnosis in Aerospace Systems using Analytical Redundancy, Computing and Control Engineering Journal, Vol.2, pp127-136, 1991.
- [13]. M.L.LEUSCHEN, I.D. WALKER et J.R. CAVALLARO. Nonlinear Analytical Redundancy for Fault Detection. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002.
- [14]: R. Isermann “Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing”. Automatica, Volume 29, Issue 4, pp 815-835 July (1993).
- [15] R. Patton, P. Frank, R. Clark. “Fault Diagnosis in Dynamic Systems”. Systems and Control Engineering, Prentice Hall, (1989).
- [16]: Frank, P.M.; Alcorta García, E.; Köppen-Seliger, B. “Modelling for fault detection and isolation versus modelling for control”. Mathematics and Computers in Simulation Volume: 53, Issue: 4-6, pp. 259–271 (2000).

# Bibliographie

---

- [17]. H.Y.CHOU. Fault Diagnosis of the Heat Exchanger system using Unknown Input observer.
- [18]. F.Lootsma.Observer-based Fault Detection and Isolation for Nonlinear systems These, Department of Control Engineering, University Aalborg, Denmark, 2001.
- [19] Site web, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Observateur\\_](https://fr.wikipedia.org/wiki/Observateur_) le 27/02/2017 à 7:46.
- [20] Dr.MENIGHED KAMEL «TP manuel des travaux pratique diagnostic » - Automatisation en Industries Pétrochimiques. UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955-SKIKDA 2018.
- [21] BENYOUCEF CHAIBI, CHARAFEDDINE MERADJI « mémoire diagnostic d'un système hydraulique a laide d'observateur » UNIVERSITE DE TLEMCEM.
- [22] A. ZEMOUCHE. Sur l'observation de l'état des systèmes dynamiques non linéaires. Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2007.
- [23] M.HERMAN ET A.J.KRENER. Nolinear controllability and observability. IEEE. Transaction on automatic, 1997.
- [24] B. Nait Slimani, «Synthèse d'observateurs non linéaires: Application au diagnostic de défauts». Thèse magistère université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [25] : Zelmat M. Automatisation des processus industriels Tome 1, Commande modale et adaptative". Office des publications universitaires, Algérie (1999).
- [26] E. CHERRIER. Estimation de l'état et des entrées inconnues pour une classe de systèmes non linéaires. Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [27] S. BACHIR. Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique. Thèse, Université de Poitiers, 2002.
- [28] A. Ammour, Z. Graichi, «Synthèse d'un observateur fractionnaire à mode glissant pour l'estimation de défauts». Mémoire de fin d'études .Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017.
- [29] Rodolfo Orjuela, Benoît Marx, José Ragot et Didier Maquin. « Conception d'observateurs robustes pour des systèmes non linéaires incertains : une stratégie multimodèle». Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2005.
- [30] B. Nait Slimani, «Synthèse d'observateurs non linéaires: Application au diagnostic de défauts». Thèse magistère université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [31] A.H. JAZWINSKI. Stochastic processes and filtering theory. New York Academic.
- [32] G. CHEN. Approximate kalman filtering. World Scientific Series in Approximations and Decompositions, 1993.
- [33] Gauthier, J.P. and Bornard, G., Observability for any  $u(t)$  of a class of bilinear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 26:922-926, 1981.
- [34] Carlsson, B., Salgado, M. and Goodwin, G.C. A new method for fault detection and diagnosis. Technical report EE8842. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Newcastle, Australia, 1988.

# Bibliographie

---

- [35] Deza, F., Busvelle, E., Gauthier, J. P. and Rakotopara, D., High gain estimation for nonlinear systems. *Systems and Control Letters*, 15:313-322, 1990.
- [36] O. ADROT. “Diagnostic à base de modèles incertains utilisant l’analyse par intervalles : l’approche bornante”. Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, (2004)
- [37] H. Oubabas, «contribution au diagnostic et à la commande tolérante aux défauts par l’approche ensembliste ». Thèse doctorat université de Tizi-Ouzou, 2019.
- [38] O. ADROT. Diagnostic à base de modèles incertains utilisant l’analyse par intervalles : l’approche bornante. Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004..
- [39] E. CHERRIER. « Estimation de l’état et des entrées inconnues pour une classe de systèmes non linéaires ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [40] T.M. Laleg, « Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d’Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts : Application à la machine Asynchrone et au Robot SCARA». Thèse d’Ingénieur, ENP d’Alger 2004.
- [41] R. TOSCANO, « Commande et diagnostic des systèmes dynamiques ». Ellipses 2011, France
- [42] : Hassan Noura, Didier Theilliol, Jean-Christophe Ponsart, Abbas Chamseddine. “Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications”, Publisher: Springer 2009-08-03.

