



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Université Toulouse III - Paul Sabatier*  
Discipline ou spécialité : *Automatique*

---

Présentée et soutenue par *Dimitrios FRAGKOULIS*  
Le 13 novembre 2008

**Titre :** *Détection et localisation des défauts provenant des actionneurs et des capteurs : application sur un système non linéaire*

---

### JURY

*Joseph AGUILAR MARTIN, Directeur de Recherche au LAAS CNRS, Président*  
*Mondher FARZA, Professeur à l'Université de Caen, Rapporteur*  
*Joseba QUEVEDO CASIN, Professeur à l'Université Polytechnique de Catalogne, Rapporteur*  
*Georgios CHAMILOTHORIS, Professeur à l'Institut Technologique du Pirée, Examineur*  
*Naly RAKOTO, Professeur Assistant à l'Ecole des Mines de Nantes, Examineur*

---

**Ecole doctorale :** *Ecole Doctoral Système*

**Unité de recherche :** *PCA*

**Directeur(s) de Thèse :** *Prof. Boutaib DAHOU et Prof. Gilles ROUX*

**Rapporteurs :** *Prof. Mondher FARZA et Prof. Joseba QUEVEDO CASIN*



## Remerciements

Je remercie l'organisme « Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (IKY) » du gouvernement grec pour m'avoir donné l'opportunité de préparer mon doctorat en France, grâce à une bourse de thèse.

Ma thèse a été réalisée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique (LAAS-CNRS) dans le groupe Diagnostic, Supervision et CONduite qualitatifs (DISCO). Je tiens tout d'abord à remercier Messieurs Malik GHALLAB et Raja CHATILA, respectivement ancien et actuel Directeurs du LAAS pour m'avoir accueilli au LAAS. Je tiens également à remercier Madame Louise TRAVE-MASSUYES, responsable du groupe DISCO, pour m'avoir accueilli au sein du groupe.

Mes remerciements chaleureux à mes deux directeurs, Boutaib DAHHOU et Gilles ROUX, pour leur soutien, leur aide, la réponse à mes diverses questions, mais avant tout pour m'avoir proposé ce sujet très intéressant. J'espère qu'en regardant cette thèse après coup, j'aurai rempli toutes leurs attentes. Aussi, c'est un honneur pour moi d'avoir eu l'occasion de travailler et d'apprendre aux côtés de personnes ayant des qualités humaines exceptionnelles.

J'aimerais également remercier l'ensemble des personnes qui ont participé au jury de cette thèse et qui m'ont fait, j'en suis persuadé, des retours intéressants et une vision peut être différente de mes travaux et de leurs implications :

- Messieurs Mondher FARZA, Professeur à l'Université de Caen et Joseba QUEVEDO CASIN, Professeur à l'Université Polytechnique de Catalogne pour avoir accepté de rapporter mes travaux et de leurs précieuses et judicieuses remarques qui ont été pour moi d'une grande aide et valeur.

- Messieurs Georgios CHAMILOTHORIS Professeur à l'Institut Technologique du Pirée et Naly RAKOTO Professeur Assistant à l'Ecole des Mines de Nantes pour avoir participé à mon jury en tant qu'examineurs.

- Monsieur Joseph AGUILAR MARTIN, Directeur de Recherche au LAAS-CNRS pour avoir accepté d'y assister et être président de ce jury.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collègues Panos, Youssef et Zetao pour leur aide scientifique et leur sympathie à mon égard.

Enfin, il y a un grand nombre de personnes qui malgré la distance m'ont apporté un soutien émotionnel très fort. D'abord **ma famille** qui pendant toute ma vie a été à mes côtés pour m'encourager à atteindre mes objectifs académiques et personnels. Ma reconnaissance va aussi à mes amis Alexandros, Athanasia, Eleni, Georges, Katerina, Kostas, Nadia, Sandy et Vassilis.

# Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>Chapitre 1 : Motivation</b> .....	<b>- 5 -</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>- 5 -</b>
<b>1.1 Les diverses approches</b> .....	<b>- 6 -</b>
<b>1.2 Terminologie</b> .....	<b>- 9 -</b>
<b>1.3 Types de défauts</b> .....	<b>- 11 -</b>
<b>1.3.1 Défaut abrupt</b> .....	<b>- 11 -</b>
<b>1.3.2 Défaut intermittent</b> .....	<b>- 12 -</b>
<b>1.3.3 Défaut graduel</b> .....	<b>- 12 -</b>
<b>Chapitre 2 : Méthodes de détection et d'isolation de défaut basées sur le modèle</b> .....	<b>- 13 -</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>- 13 -</b>
<b>2.1 Redondance analytique</b> .....	<b>- 14 -</b>
<b>2.2 Modélisation des défauts</b> .....	<b>- 15 -</b>
<b>2.3 Génération et évaluation des résidus</b> .....	<b>- 16 -</b>
<b>2.3.1 Génération des résidus</b> .....	<b>- 16 -</b>
<b>2.3.2 Evaluation des résidus</b> .....	<b>- 18 -</b>
<b>2.3.3 Résidus structurés</b> .....	<b>- 19 -</b>
<b>2.4 Robustesse</b> .....	<b>- 20 -</b>
<b>2.5 Performance</b> .....	<b>- 21 -</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>- 23 -</b>
<b>Chapitre 3 : Analyse des modèles de simulation</b> .....	<b>- 25 -</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>- 25 -</b>
<b>3.1 Modèle d'un système non linéaire académique</b> .....	<b>- 25 -</b>
<b>3.2 Modèle d'un procédé de traitement des eaux usées</b> .....	<b>- 27 -</b>
<b>3.2.1 Introduction</b> .....	<b>- 27 -</b>
<b>3.2.2 Motivation</b> .....	<b>- 27 -</b>
<b>3.2.3 Le processus de traitement d'eaux usées</b> .....	<b>- 28 -</b>
<b>3.2.4 Description d'une station de traitement des eaux usées par boues activées</b> .....	<b>- 28 -</b>
<b>3.2.5 Modélisation mathématique du procédé de traitement des eaux usées</b> .....	<b>- 31 -</b>
<b>3.2.5.1 Types de modèle</b> .....	<b>- 31 -</b>
<b>3.2.5.2 Variables d'état du modèle</b> .....	<b>- 33 -</b>
<b>3.2.5.3 Dynamique du procédé</b> .....	<b>- 33 -</b>
<b>3.2.5.4 Variables d'entrée</b> .....	<b>- 35 -</b>
<b>3.2.5.5 Modèle dynamique du procédé</b> .....	<b>- 35 -</b>
<b>3.2.6 Interactions entrées et sorties</b> .....	<b>- 37 -</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>- 39 -</b>

<b>Chapitre 4 : Méthodes à base d'observateurs .....</b>	<b>- 41 -</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>- 41 -</b>
<b>4.1 Différents types d'observateurs .....</b>	<b>- 42 -</b>
<b>4.2 Modèle d'étude .....</b>	<b>- 43 -</b>
<b>4.3 Observabilité non linéaire .....</b>	<b>- 45 -</b>
<b>4.4 Conditions analytique d'observabilité .....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>4.5 Structures des observateurs .....</b>	<b>- 48 -</b>
<b>4.5.1 Observateur pour un système linéaire .....</b>	<b>- 49 -</b>
<b>4.5.1.1 Observateur de Luenberger pour les systèmes linéaires stationnaires (LTI)</b>	<b>- 49 -</b>
<b>4.5.1.2 Observateur de Kalman pour les systèmes linéaires variant dans le temps</b>	<b>(LTV) - 50 -</b>
<b>4.5.1.3 Filtre de Kalman Étendu (EKF).....</b>	<b>- 51 -</b>
<b>4.5.2 Observateurs pour un système non linéaire .....</b>	<b>- 51 -</b>
<b>4.5.2.1 Observateurs basés sur l'approche de Luenberger .....</b>	<b>- 51 -</b>
<b>4.5.2.2 Observateurs basés sur l'approche de Kalman.....</b>	<b>- 53 -</b>
<b>4.6 Observateurs adaptatifs .....</b>	<b>- 55 -</b>
<b>4.6.1 Observateur de FDI pour une classe de systèmes non linéaires particuliers-</b>	<b>58 -</b>
<b>4.6.2 Génération et évaluation des résidus.....</b>	<b>- 63 -</b>
<b>4.6.3 Filtrage des résidus .....</b>	<b>- 68 -</b>
<b>4.6.4 Calculs des matrices de gain .....</b>	<b>- 69 -</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>- 72 -</b>
<b>Chapitre 5 : Détection et isolation de défauts dans les actionneurs.....</b>	<b>- 73 -</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>- 73 -</b>
<b>5.1 Méthode à base d'observateurs adaptatifs pour défauts simples .....</b>	<b>- 74 -</b>
<b>5.1.1 Présentation de la méthode .....</b>	<b>- 75 -</b>
<b>5.1.2 Application au modèle non linéaire académique.....</b>	<b>- 77 -</b>
<b>5.1.3 Application au modèle de traitement des eaux usées.....</b>	<b>- 79 -</b>
<b>5.1.3.1 Absence de défaut .....</b>	<b>- 79 -</b>
<b>5.1.3.2 Défauts simples.....</b>	<b>- 81 -</b>
<b>5.1.3.3 Défaut simple en présence de bruit .....</b>	<b>- 85 -</b>
<b>5.2 Méthode des observateurs adaptatifs pour les défauts multiples.....</b>	<b>- 87 -</b>
<b>5.2.1 Présentation de la méthode .....</b>	<b>- 88 -</b>
<b>5.2.1.1 Détection et Identification de défauts.....</b>	<b>- 89 -</b>
<b>5.2.1.2 L'isolation des défauts .....</b>	<b>- 90 -</b>
<b>5.2.1.3 Procédure pour la FDI.....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>5.2.1.4 Étude du cas d'un défaut sur le <math>l^{ème}</math> actionneur du système.....</b>	<b>- 92 -</b>
<b>5.2.1.5 Évaluation des résidus en présence du bruit .....</b>	<b>- 92 -</b>
<b>5.2.2 Application au modèle non linéaire académique.....</b>	<b>- 94 -</b>
<b>5.2.3 Application au modèle du système de traitement des eaux usées.....</b>	<b>- 96 -</b>
<b>5.2.3.1 Défauts simples.....</b>	<b>- 97 -</b>
<b>5.2.3.2 Défauts multiples.....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>5.2.3.3 Défauts simples en présence de bruit .....</b>	<b>- 104 -</b>
<b>5.3 Comparaison des deux méthodes .....</b>	<b>- 106 -</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>- 109 -</b>

---

<b>Chapitre 6 : Détection et isolation des défauts dans les capteurs .....</b>	<b>- 111 -</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>- 111 -</b>
<b>6.1 Méthode à base d'observateurs adaptatifs classiques .....</b>	<b>- 112 -</b>
6.1.1 <i>Présentation de la méthode .....</i>	<i>- 113 -</i>
6.1.2 <i>Application au modèle non linéaire académique.....</i>	<i>- 115 -</i>
6.1.3 <i>Application au modèle de traitement des eaux usées.....</i>	<i>- 117 -</i>
6.1.3.1 Absence de défaut .....	- 119 -
6.1.3.2 Défauts simples.....	- 120 -
6.1.3.3 Défauts simples en présence de bruit .....	- 123 -
<b>6.2 Méthode basée sur l'augmentation d'espace.....</b>	<b>- 125 -</b>
6.2.1 <i>Présentation de la méthode .....</i>	<i>- 125 -</i>
6.2.2 <i>Application au modèle non linéaire académique.....</i>	<i>- 128 -</i>
6.2.3 <i>Application au modèle du système de traitement des eaux usées.....</i>	<i>- 130 -</i>
6.2.3.1 Absence de défaut .....	- 131 -
6.2.3.2 Défauts simples.....	- 133 -
6.2.3.3 Défauts multiples.....	- 135 -
6.2.3.4 Défauts simultanés .....	- 137 -
6.2.3.5 Défauts simples en présence bruit .....	- 138 -
<b>6.3 Comparaison entre les deux méthodes.....</b>	<b>- 139 -</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>- 142 -</b>
<b>Conclusions et Perspectives .....</b>	<b>- 143 -</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>- 147 -</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>- 153 -</b>



# Liste des figures

Figure 1.1 : Système de commande .....	- 5 -
Figure 1.2 : Evolutions temporelles de différents types de défauts .....	- 12 -
Figure 2.1 : Modélisation de défauts : a) défaut additif; b) défaut multiplicatif .....	- 15 -
Figure 2.2 : Schéma général pour le module de FDI basé sur le modèle .....	- 17 -
Figure 2.3 : Caractéristiques temporelles de la FDI .....	- 23 -
Figure 3.1 : Sorties du système académique .....	- 26 -
Figure 3.2 : Cycle de l'eau dans une station d'épuration .....	- 29 -
Figure 3.3 : Schéma descriptif d'une station d'épuration par boues activées .....	- 30 -
Figure 3.4 : Processus de boues activées .....	- 31 -
Figure 3.5 : Les actionneurs à surveiller .....	- 35 -
Figure 3.6 : Sorties du système .....	- 39 -
Figure 4.1 : Observateur au cœur d'un système de conduite .....	- 41 -
Figure 4.2 : Différents types d'observateurs .....	- 42 -
Figure 4.3 : Ensemble des observateurs pour la surveillance de paramètres .....	- 56 -
Figure 4.4 : Ensemble des observateurs pour la surveillance du vecteur d'entrée .....	- 57 -
Figure 4.5 : Seuil adaptatif .....	- 64 -
Figure 4.6 : Norme 2 des résidus .....	- 66 -
Figure 4.7 : Réinitialisation des résidus .....	- 67 -
Figure 4.8 : Résidus .....	- 69 -
Figure 4.9 : Variation de H à P et $\gamma$ constants .....	- 70 -
Figure 4.10 : Variation de P à H et $\gamma$ constants .....	- 71 -
Figure 4.11 : Variation de $\gamma$ à H et P constants .....	- 71 -
Figure 5.1 : Système de surveillance de défauts pour les actionneurs .....	- 73 -
Figure 5.2 : Résidus sans défaut .....	- 78 -
Figure 5.3 : Défaut simple .....	- 78 -
Figure 5.4 : Résidus des observateurs (cas sans défaut) .....	- 80 -
Figure 5.5 : Sorties du système (défaut simple) .....	- 82 -
Figure 5.6 : Résidus des observateurs (défaut simple) .....	- 83 -
Figure 5.7 : Estimation du défaut .....	- 83 -
Figure 5.8 : Sorties du système en présence du bruit (défaut simple) .....	- 85 -
Figure 5.9 : Résidus des observateurs en présence du bruit (défaut simple) .....	- 86 -
Figure 5.10 : Estimation du défaut en présence du bruit .....	- 86 -
Figure 5.11 : Actionneur en défaut .....	- 88 -
Figure 5.12 : Résidus $r_i$ de l'ensemble de détection et d'identification .....	- 95 -
Figure 5.13 : Résidus $s_{k,i}$ des ensembles d'isolation .....	- 95 -
Figure 5.14 : Résidus $r_i$ de l'ensemble de détection et d'identification .....	- 99 -
Figure 5.15 : Résidus $s_{k,i}$ des ensembles d'isolation .....	- 100 -
Figure 5.16 : Résidus $r_i$ de l'ensemble de détection et d'identification .....	- 102 -
Figure 5.17 : Résidus $s_{k,i}$ des ensembles d'isolation .....	- 103 -
Figure 5.18 : Résidus $r_i$ de l'ensemble de détection/identification (en présence de bruit) ..	- 104 -
Figure 5.19 : Résidu $s_{k,i}$ du première ensemble d'isolation (en présence de bruit) .....	- 105 -
Figure 6.1 : Système de surveillance de défauts pour les capteurs .....	- 111 -

---

Figure 6.2 : Résidus sans défaut.....	- 116 -
Figure 6.3 : Défaut simple (sur le deuxième capteur).....	- 117 -
Figure 6.4 : Défaut simple (premier capteur).....	- 117 -
Figure 6.5 : Résidus des observateurs (sans défaut).....	- 119 -
Figure 6.6 : Sorties du système (défaut simple).....	- 120 -
Figure 6.7 : Résidus des observateurs (défaut simple).....	- 121 -
Figure 6.8 : Estimation du défaut.....	- 122 -
Figure 6.10 : Résidus des observateurs en présence du bruit (défaut simple).....	- 124 -
Figure 6.11 : Estimation du défaut en présence du bruit.....	- 124 -
Figure 6.12 : Capteur en défaut.....	- 127 -
Figure 6.13 : résidus sans défaut.....	- 128 -
Figure 6.14 : résidus avec un défaut simple.....	- 129 -
Figure 6.15 : Résidus des observateurs (sans défaut).....	- 133 -
Figure 6.16 : Résidus des observateurs (défaut simple).....	- 134 -
Figure 6.17 : Résidus des observateurs (défauts multiples).....	- 136 -
Figure 6.18 : Résidus des observateurs (défauts simultanés).....	- 137 -
Figure 6.19 : Résidus des observateurs en présence du bruit (défaut simple).....	- 138 -
Figure A1 : Représentation schématique d'un réacteur.....	- 147 -

## Liste des tableaux

Tableau 3.1: Interaction entrées et sorties .....	- 26 -
Tableau 3.2: Interaction entrées-sorties .....	- 38 -
Tableau 3.3: Interaction sorties-sorties .....	- 38 -
Tableau 5.1: Effet du défaut actionneur (système académique) .....	- 74 -
Tableau 5.2: Effet du défaut actionneur (système de traitement des eaux usées).....	- 75 -
Tableau 5.3: Valeurs de $H_i$ , $P_i$ et $\gamma$ .....	- 80 -
Tableau 5.4: Défaut simple pour chaque actionneur.....	- 84 -
Tableau 5.5: Défaut simple pour chaque actionneur (en présence du bruit).....	- 87 -
Tableau 5.6: Valeurs de $H_i$ , $P_i$ et $\gamma$ .....	- 98 -
Tableau 5.7: Défaut simple pour chaque actionneur.....	- 101 -
Tableau 5.8: Défaut simple pour chaque actionneur (en présence du bruit).....	- 106 -
Tableau 5.9: Caractéristiques des deux méthodes.....	- 107 -
Tableau 5.10: Caractéristiques des deux méthodes (en présence de bruit).....	- 108 -
Tableau 6.1: Effet du défaut capteur .....	- 112 -
Tableau 6.2: Effet du défaut capteur .....	- 112 -
Tableau 6.3: Valeurs de $H_i$ , $P_i$ et $\gamma$ .....	- 119 -
Tableau 6.4: Défaut simple pour chaque capteur .....	- 122 -
Tableau 6.5: Défaut simple pour chaque capteur (en présence du bruit).....	- 125 -
Tableau 6.6: Valeurs de $H_i$ , $P_i$ et $\gamma$ .....	- 131 -
Tableau 6.7: Défaut simple pour chaque capteur .....	- 135 -
Tableau 6.8: Défaut simple pour chaque capteur (en présence du bruit).....	- 139 -
Tableau 6.9: Performances des deux méthodes .....	- 140 -
Tableau 6.10: Performances de deux méthodes(en présence de bruit) .....	- 141 -
Tableau A1 : Conditions initiales.....	- 149 -
Tableau A2 : Conditions d'alimentation et valeurs des paramètres.....	- 150 -



# Introduction

L'automatisation de procédés dans l'industrie et dans la vie quotidienne a atteint un niveau élevé. Le nombre de tâches qu'effectuent les ordinateurs s'accroît chaque jour que ce soit dans les domaines de l'aéronautique, des applications biomédicales, de l'automobile, de l'électronique et de la robotique. On dit qu'il y a un défaut dans un système dynamique lorsque la différence entre le comportement du système et son modèle nominal est importante. Cependant, dans la plupart des applications, les défauts ne sont pas pris en compte, et souvent un petit défaut peut avoir un grand impact sur l'évolution d'un système. Avec la demande croissante de disponibilité, d'efficacité, de qualité, de fiabilité et de sûreté, des approches de traitement et de prise en compte de défauts sont devenues une question cruciale. Ces approches sont également connues sous l'appellation des systèmes de commande insensibles aux défaillances (l'acronyme en anglais FTCS). Le but est de traiter les défauts de telle manière que le système puisse fonctionner d'une façon acceptable afin d'éviter l'arrêt du système.

La conception des systèmes de commande insensibles aux défaillances comporte plusieurs étapes ; nous allons citer les étapes le plus importantes. D'abord, les divers défauts qui peuvent apparaître dans le système considéré doivent être inventoriés et modélisés (modélisation du défaut). Ensuite, une analyse de propagation de défaut (FPA) est effectuée pour étudier l'effet des défauts sur le système. En conséquence, suivant la sévérité du défaut, il est possible de mettre en œuvre diverses stratégies. Un point essentiel pour une conception de FTCS est la détection et l'isolation de défaut. Sa conception est exigée pour juger quand et quel défaut s'est produit afin de lancer la stratégie la plus pertinente au bon moment.

De manière générale, le diagnostic de défaut peut être interprété comme suit : Dans un procédé, il y a des variables ou des comportements observés qui permettent de savoir si le

procédé est en fonctionnement normal. En couplant une observation et la connaissance acquise sur le procédé il est possible de générer, un rapport de diagnostic, afin de décider s'il y a un défaut ou non et de l'identifier. Ainsi les problèmes de base, dans le secteur du diagnostic de défaut sont la formulation du rapport de diagnostic ; quels sont les paramètres qui sont appropriés à l'étude et comment dériver et représenter la connaissance de ce qui est normal ou anormal. A titre d'exemples, quelques applications importantes ont été étudiées dans la littérature [Venkatasubramanian *et al.* (2003)], à savoir:

- Les systèmes aéronautiques (système de commande d'avion, système de navigation et moteurs)
- Systèmes de commande embarqués dans des véhicules
- Systèmes nucléaires
- Usines chimiques
- Turbines à gaz
- Biotechnologie
- Robots industriels
- Moteurs électriques

Dans ce travail nous nous sommes intéressés au diagnostic basé sur le modèle dynamique continue du procédé et plus précisément nous avons focalisé notre recherche sur les défauts provenant des capteurs et des actionneurs du système. Nous développons des algorithmes de détection, d'isolation et d'identification de défauts basés sur des observateurs adaptatifs, en supposant que nous disposons de l'état du système, pour une classe particulière de modèle non linéaire. Nous proposons deux algorithmes, un pour chaque type de défaut, et nous les comparons avec d'autres méthodes de la littérature. Les approches proposés doivent être capables de traiter de défaut multiple tout en réduisant le temps nécessaire pour l'isolation des défauts ; ce dernier point est un aspect particulièrement intéressante dans le cas du développement d'algorithmes de FTC [Li et Dahhou (2006)]. Nous allons appliquer les algorithmes proposés sur un modèle académique et un modèle d'un système de traitement des eaux usées afin de mettre en avant la pertinence de cette approche comme l'épuration des eaux usées est devenue un des aspects indispensables à la préservation de l'environnement,

les directives ont été établies pour réguler la qualité de l'eau traitée et un grand nombre de stations d'épuration des eaux usées ont adopté le procédé par boues activées.

Le manuscrit est organisé comme suit :

**Chapitre 1 :** Les principales directions de recherche sur la thématique de la détection et de l'isolation de défaut sont présentées. Ensuite la terminologie du domaine et l'analyse du terme diagnostic est donné. A la fin du chapitre nous donnons les différents types de défauts qui peuvent se produire dans un procédé.

**Chapitre 2 :** Une brève description des méthodes de détection et d'isolation de défaut basée sur le modèle est donnée. L'idée d'un module de FDI basé sur un observateur est brièvement passée en revue.

**Chapitre 3 :** Deux modèles de systèmes non linéaires représentant l'un, un système académique [Chen et Saif (2005)] et l'autre un procédé de traitement des eaux usées [Nejjari (2001)] sont employés comme exemples d'applications. Ils nous permettront d'illustrer et de valider, en simulation, l'approche proposée.

**Chapitre 4 :** Quelques observateurs qui existent dans la littérature sont décrits et leurs principales caractéristiques sont mises en avant. La structure d'un ensemble d'observateurs qui servira du module pour la FDI est décrite.

**Chapitre 5 :** Les méthodes utilisées dans le module de FDI pour les défauts au niveau des actionneurs sont présentés. Ces méthodes seront testées sur un modèle académique et ensuite sur le modèle du système de traitement des eaux usées. Une comparaison de ces méthodes terminera ce chapitre.

**Chapitre 6 :** Après l'analyse de deux méthodes de FDI pour les défauts au niveau des capteurs, nous présenterons les résultats obtenus sur les deux modèles de simulation. Comme dans le chapitre précédent une comparaison permettra de quantifier la potentialité de chacune des méthodes.



# Chapitre 1 : Motivation

## Introduction

Le diagnostic manuel est utilisé depuis de nombreuses années, mais le diagnostic automatique a commencé à apparaître en même temps que les calculateurs. Dans le début des années 70, les premiers travaux de recherche concernant le diagnostic basé sur les modèles ont été édités. Les premiers secteurs, dans lesquels le diagnostic a été appliqué, étaient les usines chimiques et les applications aérospatiales. Les travaux de recherche concernant le diagnostic basé sur un modèle ont été intensifiés pendant les années 80 et les années 90. Aujourd'hui, c'est toujours un secteur de recherche en expansion avec beaucoup de questions non résolues. Les principaux travaux de référence dans le secteur sont : [Patton *et al.* (1989) ; Basseville et Nikiforov (1993) ; Gertler (1998) ; Chen et Patton, (1999)].

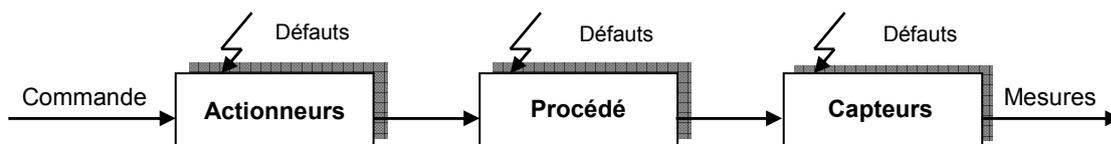


Figure 1.1 : Système de commande

Jusqu'ici, de nombreuses méthodes pour le diagnostic ont été développées, mais beaucoup d'approches sont plus ad-hoc que systématiques. Il est juste d'indiquer que peu de théories générales existent et une connaissance complète des relations entre les différentes méthodes est absente. Ceci est le fait qu'aucune terminologie générale n'a été largement acceptée, cependant l'importance du diagnostic est avérée. Ceci a été illustré par les systèmes de gestion automatisés pour les moteurs de véhicules. Pour ces systèmes, pas moins de 50%

du logiciel est consacré au diagnostic, le restant est par exemple dédié pour la commande [Nyberg (1999) ; Nijmeijer et Fossen (1999)].

Un système de commande se compose habituellement de trois parties : le procédé, les capteurs et les actionneurs. Les défauts peuvent provenir essentiellement de chacune de ces trois parties, comme l'illustre la figure 1.1. Dans cette travail, nous étudions la détection, l'isolation et l'identification des défauts issus des actionneurs et des capteurs. Un défaut est donc un mauvais fonctionnement du système conduisant à une dégradation de ses performances. En d'autres termes, un défaut est une modification suffisante des caractéristiques d'un système ou d'un de ses composants pour qu'une fonction ne puisse plus être correctement remplie.

## **1.1 Les diverses approches**

La détection et l'isolation de défaut (l'acronyme en anglais FDI) sont l'objet de recherche depuis le début des années 70. Au début, la recherche a été principalement concentrée sur le secteur de l'aéronautique. La littérature sur le sujet s'est enrichie grâce à l'apport de plusieurs secteurs de recherches. Les différents groupes de recherche ont proposé des approches de FDI basées sur l'expertise de leur propre champ et/ou expérience sur une classe spécifique de systèmes. La diversité des solutions a été également enrichie par l'intérêt croissant de l'industrie dans le domaine de la FDI. Ceci est principalement dû à l'espoir d'améliorer l'efficacité, la sûreté, et la fiabilité de l'automatisation du procédé étudié. Les systèmes de FDI et de diagnostic basés sur le modèle ont trouvé une utilisation assez étendue en raison de leur réponse rapide aux défauts additifs et à l'exécution du module de FDI basé sur le modèle dans des algorithmes en temps réel.

Nous allons, à présent, décrire les méthodes de détection et d'isolation de défaut basée sur le modèle. L'idée est d'employer la redondance analytique donnée par un modèle du système, cela veut dire vérification entre le comportement nominal et celui mesuré. Ces méthodes utilisent un modèle du système et les variables observables du système (des signaux de commande et de mesure) pour calculer les résidus. Les résidus sont des quantificateurs

d'anomalie entre le comportement prévu et celui mesuré du système. Leur analyse amène à la détection et l'isolation de défaut basée sur le modèle. Cependant, il existe également beaucoup d'autres méthodes qui ne sont pas considérées comme basées sur le modèle, par exemple l'approche floue [Kiupel et Frank (1997)], l'approche à base de réseau de neurones artificiels [Köppen-Seliger et Frank (1996)] ou l'analyse stochastique des signaux [Basseville et Nikiforov (1994)].

Le domaine de la FDI basé sur un modèle dans le cas des systèmes linéaires est bien étudié. Les principaux résultats peuvent être trouvés dans [Zhang (2000) ; Chen et Patton (1999) ; Gertler (1998) ; Isermann et Ballé (1997) ; Patton (1997) ; Frank (1996) ; Massoumnia *et al.* (1989) ; Willsky (1976)]. Par contre, la FDI pour les systèmes non linéaires est encore un champ de recherche important. Pour quelques systèmes non linéaires particuliers, des auteurs [Sreedhar *et al.* (1993)] ont employé la linéarisation autour des points de fonctionnement afin d'appliquer des méthodes linéaires de FDI. En général, cela n'est pas toujours réaliste dû aux non linéarités fortes (par exemple des effets de saturation ou comportement non analytique) ou à l'inefficacité de la linéarisation. Par conséquent, plusieurs approches de FDI ont été améliorées pour manipuler également les systèmes non linéaires plus généraux, par exemple l'approche basée sur les observateurs, l'approche de l'espace de parité et l'estimation paramétrique. Les observateurs flous et les réseaux de neurones artificiels ont été également considérés comme des outils potentiellement pertinents dans le cas des systèmes non linéaires. Récemment, de nouvelles approches ont été proposées pour la classe de systèmes non linéaires à entrée affine. Plus particulièrement une approche de FDI basée sur les observateurs pour les systèmes non linéaires a été bien étudiée et développée [Åström *et al.* (2000) ; Iserman (1994) ; Venkatasubramanian *et al.* (2003)]. Egalement, nous trouvons les observateurs à modes glissants et les observateurs à grand gain [Edwards et Spurgeon (1994) ; Xing-Gang et Edwards (2005) ; Hammouri *et al.* (1999)] et les observateurs adaptatifs [García et Frank (1997) ; Chen et Saif (2005) ; Li (2006) ; Zhang (2000)].

Une question intéressante pour la conception d'observateur est de décider quel sous système doit être observé pour la génération de résidus. Izadi-Zamanabadi et Blanke (1999)

donne un exemple de résolution en appliquant l'analyse structurale [Staroswiecki et Declerck (1989) ; Cassar *et al.* (1994)]. Une autre solution est l'application de l'approche géométrique ; elle a été à l'origine présentée par Massoumnia *et al.* (1989) pour le cas linéaire. Ces dernières années, elle a été étendue aux systèmes non linéaires [Hammouri *et al.* (1998, 1999) ; DePersis et Isidori (1999) ; DePersis (1999)]. Le problème de la diminution du temps d'isolation dans un module de FDI a fait l'objet d'étude dernièrement pour un système non linéaire [Li et Dahhou (2006)].

Dans la pratique, l'étude de la FDI est rarement considérée pendant la phase de conception de la commande, mais souvent elle apparaît plus tard dans une couche de supervision. Par conséquent, dans cette approche il est impossible que le concepteur de la FDI influence la conception du contrôleur, par exemple en ajoutant des capteurs pour améliorer les possibilités de la FDI. Cependant, comme l'a précisé Bøgh (1997), cette démarche est inévitable si l'on souhaite concevoir des systèmes de commande insensibles aux défaillances ; ceci est également décrit en détail dans Patton (1997).

Le diagnostic basé sur les modèles des systèmes a gagné beaucoup d'intérêt industriel récemment. La raison est qu'avec cette approche, il est possible d'améliorer la sûreté, la protection de l'environnement, la protection du procédé, la disponibilité et la réparabilité, de plus l'exécution en temps réel du module de FDI devient à présent possible.

L'intérêt porté à la détection et l'isolation de défaut (FDI) pour les systèmes non linéaires s'est développé sensiblement ces dernières années. Sa conception est une étape importante vers les systèmes de commande insensibles aux défaillances (FTCS). Les systèmes de commande insensibles aux défaillances ont la capacité de tolérer l'occurrence d'un défaut et continuent l'opération en cours tandis qu'une dégradation d'exécution peut être acceptée [Blanke (1999)]. La sûreté de l'opération est assurée en caractérisant les temps d'occurrence de défauts; pour effectuer ce traitement de manière correct, il est essentiel d'avoir l'information donnée par le module de FDI. Ils existent plusieurs méthodes pour la FDI. Notre travail se concentre sur la FDI basée sur des observateurs pour les systèmes non linéaires. C'est donc une approche qui appartient au groupe des méthodes basées sur le modèle.

Avant d'aller plus en avant, il est nécessaire de décrire la terminologie propre au domaine de la FDI et les types de défauts pouvant apparaître sur une installation.

## 1.2 Terminologie

Comme étape vers une terminologie unifiée, le *Technical Committee of International Federation of Automatic Control (IFAC) SAFEPROCESS* a suggéré des définitions préliminaires dans le domaine du diagnostic de défaut [Isermann et Ballé (1997)]. Certaines des définitions sont modifiées selon la terminologie présentée par [Blanke *et al.* (2000)] ; la liste suivante présente des définitions communes à ces deux références :

- **Analyse structurale :**  
Analyse des propriétés structurales des modèles, c'est-à-dire des propriétés qui sont indépendantes des valeurs réelles du paramètre.
- **Défaillance :**  
Une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées.
- **Défaut :**  
Un écart non permis d'au moins une propriété structurale ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport au comportement nominal (usuel ou acceptable).
- **Détection de défaut :**  
La détermination de la présence de défauts et de l'instant de leurs occurrences.
- **Isolation de défaut :**  
La détermination du type, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut.
- **Identification :**  
La détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut.
- **Diagnostic :**  
La détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut ; il suit la détection de défauts et inclut l'isolation et l'identification.
- **Effet de défaillance :**  
La conséquence d'un mode de défaillance sur l'opération, la fonction, ou le statut d'une variable.

- **Modèle qualitatif :**  
Un modèle de système décrivant le comportement avec des relations entre des variables et des paramètres du système en termes heuristiques tels que des causalités ou des règles.
- **Modèle quantitatif :**  
Un modèle de système décrivant le comportement avec des relations entre des variables et des paramètres du système en termes analytiques tels que des équations différentielles ou aux différences.
- **Modélisation du défaut :**  
Détermination d'un modèle mathématique pour décrire un effet spécifique du défaut.
- **Reconfiguration :**  
Changement de la structure et des paramètres du contrôleur. L'objectif original de commande est atteint bien que l'exécution puisse être dégradée.
- **Redondance analytique :**  
Détermination d'une variable par la mesure ou par l'utilisation d'un modèle mathématique du processus considéré.
- **Résidu :**  
Les signaux portants de l'information, basés sur l'écart entre les mesures et les calculs basés sur le modèle.
- **Seuil :**  
La valeur limite de l'écart d'un résidu avec le zéro, ainsi s'il est dépassé, un défaut est déclaré comme détectée.

Pour la définition du diagnostic de défaut, une définition légèrement différente existe également dans la littérature. Cette définition peut être trouvée par exemple dans [Gertler (1991)] et indique que le diagnostic de défaut inclut également la détection de défaut. C'est également la position adoptée dans cette thèse. Si la détection de défaut est exclue du diagnostic, comme dans SAFEPROCESS, on est confronté à un problème de terminologie afin de trouver un mot décrivant le secteur entier. Ceci a été en partie résolu en présentant l'abréviation FDI (détection et isolation de défaut); c'est une abréviation utilisée par beaucoup de journaux et d'ouvrages. Dans ce contexte, il est intéressant également de voir comment un dictionnaire général définit le mot *diagnostic*. L'information suivante peut être trouvée dans le dictionnaire de Webster :

**diagnostic**

Étymologie : Nouveau latin, du grec *diagnOsis*, du *diagignOskein* à distinguer, de dia + gignOskein à savoir.

Date : 1655

**1 a** : l'art ou l'acte d'identifier une maladie à partir de ses signes et symptômes, **b** : la décision obtenue par diagnostic,

**2 a** : recherche ou analyse de la cause ou nature d'une condition, d'une situation, ou d'un problème < *diagnostic d'un défaut de moteur* >, **b** : un rapport ou une conclusion d'une telle analyse.

**1.3 Types de défauts**

Selon Isermann *et al.* (2002), les défauts peuvent être différenciés selon leur forme (systématique ou aléatoire), selon l'extension du défaut (local ou global) ou selon leur comportement dans le temps (cf. figure 1.2). La notation  $t_f$  représente l'instant d'occurrence du défaut.

**1.3.1 Défaut abrupt**

Ce défaut a un comportement temporel discontinu:

$$f(t-t_f) = \begin{cases} \delta & t \geq t_f \\ 0 & t < t_f \end{cases} \quad (1.1)$$

Où  $f(t-t_f)$  représente le comportement temporel du défaut et  $\delta$  un seuil constant. Ce type de défauts est caractérisé par une discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable. Cette évolution, si elle ne correspond pas aux évolutions dynamiques normales attendues pour la variable, est caractéristique d'une panne brutale de l'élément en question: arrêt total ou partiel, déconnexion.

### 1.3.2 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.

### 1.3.3 Défaut graduel

Ce défaut a un comportement temporel lent:

$$f(t-t_f) = \begin{cases} \delta(1 - e^{-\alpha(t-t_f)}) & t \geq t_f \\ 0 & t < t_f \end{cases} \quad (1.2)$$

Où  $\alpha$  et  $\delta$  sont des constantes positives. Il est très difficile à détecter car son évolution temporelle a la même signature que celle d'une modification paramétrique lente représentant une non stationnarité du procédé. Ce type de défauts est caractéristique d'un encrassement ou d'une usure de pièce.

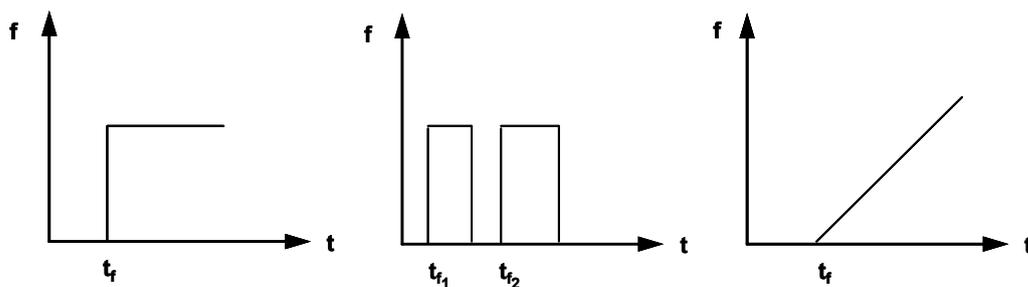


Figure 1.2 : Evolutions temporelles de différents types de défauts

Notre travail sera principalement focalisé sur les défauts abrupts.

# Chapitre 2 : Méthodes de détection et d'isolation de défaut basées sur le modèle

## Introduction

Les systèmes de commande insensibles aux défaillances (FTCS) ont la capacité de tolérer l'occurrence d'un défaut tout en continuant l'opération tandis qu'une dégradation de l'opération peut être acceptée, [Blanke (1999)]. La poursuite de l'opération est assurée en traitant les défauts ; pour lancer un traitement correct des défauts, l'information issue du module de FDI est indispensable. Comme mentionné dans l'introduction, il existe plusieurs approches de FDI. Ce travail se concentre sur la méthode de FDI basée sur les observateurs pour les systèmes non linéaires.

Le domaine de la FDI basée sur le modèle est bien étudié. Il existe une grande variété d'approches de la FDI basées sur le modèle pour les systèmes linéaires, par exemple les approches basées sur les observateurs, à base d'espace de parité et l'approche d'estimation des paramètres. Des références principales peuvent être trouvées dans [Chen et Patton (1999) ; Gertler (1998) ; Isermann et Ballé (1997) ; Patton (1997) ; Frank (1996) ; Willsky (1976)]. En outre, pour les systèmes non linéaires, il existe plusieurs méthodes de FDI basées sur le modèle [García et Frank (1997) ; Chen et Patton (1999) ; Åström *et al.* (2000)]. Plus particulièrement l'approche basée sur les observateurs a suscité beaucoup d'intérêt récemment [García et Frank (1997) ; Frank *et al.* (1999) ; Hammouri *et al.* (1999) ; Nijmeijer et Fossen (1999) ; De-Persis (1999) ; Zhang (2000) ; Chen et Saif (2005) ; Li (2006)]. Cependant, la plupart de ces méthodes sont développées pour une classe spécifique de systèmes non linéaires. Ceci est principalement dû au fait qu'il existe différentes classes de systèmes non

linéaires qui peuvent inclure également des phénomènes comme des effets de saturation ou des comportements non-analytique.

Dans ce chapitre, différents aspects de la FDI basée sur le modèle sont discutés, nous commencerons par la redondance analytique et l'utilisation des résidus structurés. Ensuite, nous présenterons des caractéristiques de robustesse et des critères de performance.

## 2.1 Redondance analytique

Une possibilité pour réaliser la FDI est l'utilisation de la *redondance analytique*. La redondance analytique est basée sur la combinaison des signaux d'information disponibles (les entrées et les mesures connues) et d'un modèle mathématique du système. Une contre-vérification des signaux d'information est effectuée pour détecter et isoler les défauts. Pour les systèmes avec *redondance matérielle*, cette contre-vérification peut être effectuée en comparant les signaux d'information et l'information redondante disponible fournie par le matériel approprié. Utiliser la redondance analytique signifie calculer l'information de redondance exigée en utilisant le modèle et les signaux d'information disponibles. Par conséquent, on peut trouver cette approche également sous le nom : FDI basée sur le modèle. Une description détaillée de la FDI basée sur le modèle est donnée dans [Chen et Patton (1999)].

Les méthodes de FDI basées sur le modèle possèdent un inconvénient important, elles ont besoin d'un modèle précis afin d'obtenir une FDI suffisante. Dans la pratique, ces modèles précis ne sont pas toujours disponibles. Par conséquent, d'autres méthodes ont été considérées, par exemple l'approche à base de réseau de neurones artificielle, l'approche floue ou l'approche qualitative. Elles sont connues dans la littérature sous les noms de méthodes basées sur la connaissance qualitatives [Frank (1996)].

La restriction des méthodes basées sur la connaissance est qu'elles sont dépendantes de l'acquisition de connaissance du système sous la forme d'ensembles de données [Frank (1996)]. Dans la pratique, il est difficile d'obtenir ces ensembles, en effet ils doivent fournir

des données du système tandis que les défauts considérés se produisent. Cependant, il est difficile de convaincre le propriétaire d'une installation de simuler tous les défauts possibles. Ces méthodes peuvent, malgré tout, être employées pour estimer des mesures basées sur l'information du signal disponible, par conséquent, fournir de la redondance. L'avantage principal de ces méthodes est qu'elles n'exigent pas un modèle analytique précis.

## 2.2 Modélisation des défauts

Un défaut est défini comme un écart non permis d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport au comportement nominal (usuel ou acceptable). Pour cette raison, le défaut peut conduire à un mauvais fonctionnement ou dans certains cas à une panne du système.

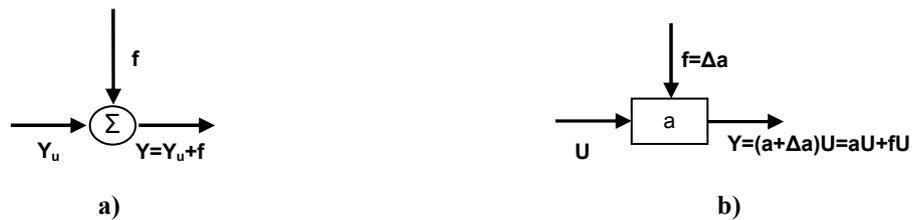


Figure 2.1 : Modélisation de défauts : a) défaut additif; b) défaut multiplicatif

La modélisation de défauts est une représentation formelle de la connaissance que l'on a sur les défauts possibles et de leur influence sur le système. Partant du modèle, les défauts peuvent être classés conformément à la figure 2.1 [Isermann (2004)]. Les *défauts additifs* influencent une variable  $Y$  par l'ajout du défaut  $f$ , alors que les *défauts multiplicatifs* le font par l'intermédiaire du produit d'une autre variable  $U$  avec  $f$ . Les défauts sont donc modélisés comme des termes additifs dans le modèle du système, ou comme des changements de paramètres. La première modélisation est habituellement appropriée aux défauts de capteurs et d'actionneurs, alors que la seconde est destinée aux défauts au niveau de la dynamique du procédé.

## 2.3 Génération et évaluation des résidus

Normalement, le contrôle de cohérence basé sur la redondance analytique est réalisé en comparant les signaux mesurés avec leurs évaluations. On désigne par *résidu* l'expression suivante;  $r_i = R(y_i - \hat{y}_i)$ ,  $i \in k$ , où  $r_i$  dénote le  $i^{\text{ème}}$  résidu ;  $R$  représente un opérateur mathématique (norme, moyenne, dérivé etc.),  $y_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  sortie mesurée du système,  $\hat{y}_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  sortie estimée du système et  $k$  est le nombre de résidus. Les résidus sont conçus pour être égaux ou converger vers zéro, dans le cas sans défaut ( $r_i \approx 0$ ) et quitter de manière significative la valeur zéro après l'occurrence d'un défaut ( $|r_i| > \delta_i > 0$ , où  $\delta_i \in \mathfrak{R}$  dénote un *seuil*). Par conséquent, les résidus représentent les effets du défaut. Selon le nombre de résidus et l'expression de l'opérateur  $R$ , il est possible de détecter et d'isoler les défauts. La plupart des méthodes de FDI basées sur le modèle incorporent deux étapes séquentielles afin d'obtenir la FDI:

1. génération du résidu.
2. évaluations du résidu.

Ces deux étapes sont expliquées dans les deux sous-sections suivantes.

Selon Gertler (1998), un résidu structuré est caractérisé par la propriété suivante : *le résidu répond seulement à un sous-ensemble de défauts spécifique, et pour chaque défaut seul un sous-ensemble spécifique de résidus répond.*

Il existe des méthodes également basées sur le modèle qui ne sont pas basées sur la génération du résidu, par exemple l'approche d'automates statistique [Lunze (2000)]. Elles fournissent des informations directes du défaut et ne produisent pas des résidus, afin de les évaluer dans une deuxième étape pour prendre une décision de FDI.

### 2.3.1 Génération des résidus

La génération des résidus pour la FDI est une étape cruciale qui dépend de la redondance analytique disponible. Dans la plupart des approches, la redondance analytique est représentée par un ensemble d'équations. Le but est de produire des *résidus structurés* pour obtenir une FDI

satisfaisante. Une manière commune de produire des résidus est d'estimer le vecteur de sortie du système  $y$  ou le vecteur de paramètre du système  $\theta$ . Puis les évaluations  $\hat{y}$  et  $\hat{\theta}$  sont soustraites de la vraie mesure  $y$  et de la valeur nominale des paramètres  $\theta_{nom}$ ; nous obtenons donc les vecteurs de résidus suivants :

$$r_y = R(y - \hat{y}) \text{ et } r_\theta = R(\theta_{nom} - \hat{\theta}) \quad (2.1)$$

Le vecteur de résidus  $r_\theta$  correspond à l'approche d'estimation paramétrique. Le vecteur de résidus  $r_y$  est typique pour l'approche à base d'observateur, mais est également utilisé dans l'approche à base de relation de parité. Une bonne comparaison de ces trois méthodes basées sur le modèle peut être trouvée dans Chen et Patton (1999). Par la suite et dans le reste de notre travail seule l'approche à base d'observateurs sera considérée.

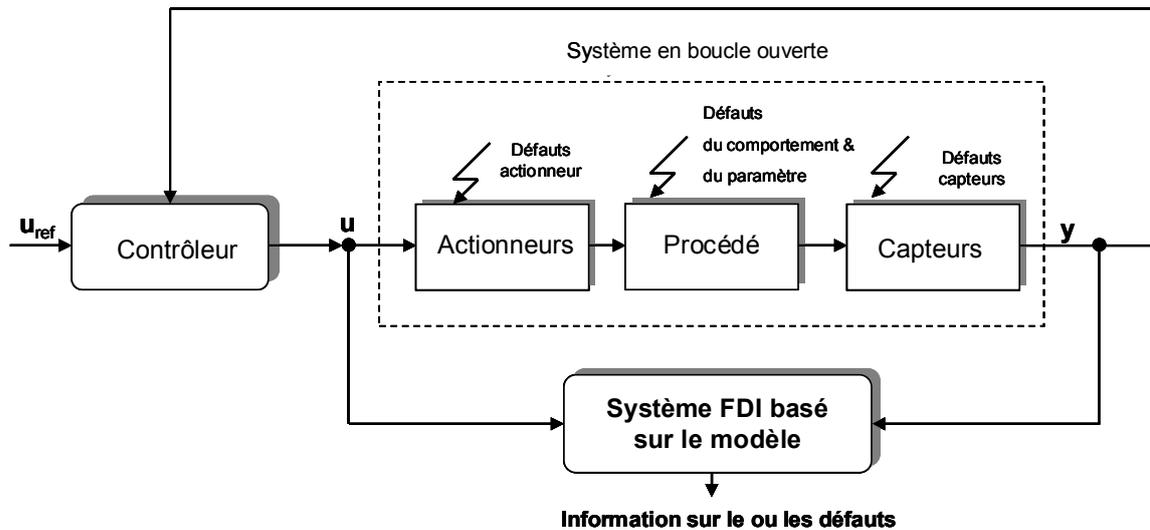


Figure 2.2 : Schéma général pour le module de FDI basé sur le modèle

L'idée principale de la génération de résidus basée sur le modèle est illustrée sur la Figure 2.2. Elle montre le procédé, les capteurs et les actionneurs :

- Le contrôleur assure la performance du procédé sur la base d'un signal de référence externe  $u_{ref}$ .

- Les trois sous-systèmes constituant le système à commander : actionneurs, procédé et capteurs.
- Le système de FDI basé sur le modèle.

Les défauts peuvent affecter les actionneurs, le procédé et les capteurs. Le système de FDI a deux entrées différentes : l'entrée du système  $u$  et la sortie mesurée du système  $y$ .

Le principe de l'approche de FDI basée sur l'observateur est de concevoir une structure d'observateur qui produit des résidus structurés qui permettent la détection et l'isolation des défauts considérés. Les observateurs actuels produisent des estimations qui peuvent être soustraites des mesures disponibles pour obtenir les résidus (par exemple  $r_y$ ). Il existe différentes approches d'observateurs pour les systèmes linéaires généraux et pour différentes classes de systèmes non linéaires. Les références principales peuvent être trouvées dans [Chen et Patton (1999) ; Patton (1997) ; García et Frank (1997) ; Frank (1996) ; Nijmeijer et Fossen (1999) ; Zhang (2000)].

### 2.3.2 Evaluation des résidus

L'évaluation du résidu doit permettre de répondre aux questions suivantes:

1. Y a-t-il un défaut ?
2. Si oui, quel défaut est présent.

La réponse à cette deuxième question dépendra du type de défauts considérés : défaut simple ou défauts multiples. Les défauts simultanés sont peu probables, à moins qu'il y ait un défaut grave dans le système qui entraîne plusieurs défauts. La difficulté de traiter des défauts multiples se situe dans le fait que le premier défaut est encore présent quand le second apparaît. Par conséquent, ils pourraient se compenser ou se recouvrir et entraîner dans certains cas, l'isolation d'un seul défaut.

Par conséquent, il est important d'obtenir une *structure du résidu* permettant son évaluation correcte. Les résidus devraient être produits de telle manière que pour chaque défaut un ensemble différent de résidus soit affecté (c.-à-d. les résidus s'écartent du zéro). Pour les défauts multiples, 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.

### 2.3.3 Résidus structurés

Selon Gertler (1998), nous pouvons représenter un ensemble de  $p$  résidus et de  $k$  défauts de deux manières différentes:

- d'une manière géométrique en considérant le vecteur  $r(t) = (r_1(t) \ r_2(t) \ \dots \ r_p(t))^T$ , où  $r(t) \in \mathfrak{R}^p$ .
- et d'une manière booléenne en définissant  $p$  vecteurs de code de défaut de la façon suivante:

$$a_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } |r_i(t)| \geq \delta_i \\ 0 & \text{if } |r_i(t)| < \delta_i \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_j(t) = (a_1(t) \ a_2(t) \ \dots \ a_p(t)) \quad (2.3)$$

pour  $i \in p$ ,  $j \in k$  et  $\delta_i$  représentent les seuils.

Évidemment, le vecteur de code du défaut  $\varepsilon(t)$  fournit l'information si le  $i^{\text{ème}}$  résidu  $r_i(t)$  atteint un seuil défini  $\delta_i$  ou non. Si nous suivons cette notation booléenne, une *matrice de structure*  $\Phi$  peut être définie de la façon suivante, en utilisant le vecteur de défauts  $f(t) = (f_1(t) \ f_2(t) \ \dots \ f_k(t))^T$  :

$$r_s \leftarrow - \Phi f \quad (2.4)$$

où la  $i^{\text{ème}}$  ligne du vecteur  $\Phi$  est définie comme  $\Phi^i = \varepsilon_i$ , ou  $\varepsilon_i$  décrit le vecteur de code  $\varepsilon(t)$  qui concerne le  $i^{\text{ème}}$  défaut. Donc,  $\Phi$  est une matrice de dimension  $p \times k$  qui contient seulement des uns ('1') et des zéros ('0'). L'opérateur ' $\leftarrow$ ' signifie 'est affecté par'. L'expression  $r_s \leftarrow - 0$  est un cas particulier et il faut le lire comme : le résidu structuré  $r_s$  n'est affecté par aucun défaut. Pour illustrer cette notion, un exemple simple est donné représentant le résidu structuré  $r_s$  où le  $i^{\text{ème}}$  résidu  $r_i(t)$  est seulement affecté par le  $i^{\text{ème}}$

défaut  $f_i(t)$ , et le nombre de défauts  $k$  est égal au nombre de résidus  $p$ . Pour exemple nous choisissons donc  $k = p = 3$ , la présentation en fonction du temps est omise pour une meilleure lisibilité. Nous définissons les 3 vecteurs de code de défaut :

$$\varepsilon_1 = (1 \ 0 \ 0)$$

$$\varepsilon_2 = (0 \ 1 \ 0)$$

$$\varepsilon_3 = (0 \ 0 \ 1)$$

Ce qui peut s'exprimer sous la forme matricielle :

$$r_s = \begin{pmatrix} r_{s1} \\ r_{s2} \\ r_{s3} \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

où  $\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$  et  $f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix}$ , dans ce cas particulier le résidu structuré  $r_{s1}$  est affecté par

le défaut  $f_1$ , le résidu structuré  $r_{s2}$  par le défaut  $f_2$  et le résidu structuré  $r_{s3}$  par le défaut  $f_3$ .

## 2.4 Robustesse

Ces méthodes de FDI sont basées sur un modèle mathématique. Cependant, un modèle précis et exact d'un système réel ne peut pas être obtenu. Ceci peut avoir différentes causes, par exemple une structure de perturbations inconnue, les différents effets de bruit et des variables incertaines. Les méthodes de FDI qui peuvent tenir compte de ce type *d'incertitude de modèle* sont connues sous le qualificatif de *résidu de robustesse*.

L'incertitude du modèle peut causer soit des fausses alarmes ou des alarmes manquées, par conséquent, cette incertitude doit être prise en compte pendant la réalisation de la FDI. Si elle n'est pas prise en compte, elle peut avoir un impact grave et le système de FDI peut devenir inutile. Il existe plusieurs approches pour traiter ces aspects de robustesse. Elles sont divisées en

deux approches de robustesse : *active* et *passive*. L'approche de robustesse active traite l'incertitude du modèle dans la phase de la génération de résidus. Le but est d'éviter ainsi les effets des incertitudes du modèle sur les résidus. L'approche de robustesse passive est mise en application lors de l'évaluation du résidu, par exemple en utilisant des seuils variables dans le temps  $d(t)$  également connus sous la dénomination de seuils adaptatifs [Clark (1994) ; Chen et Patton (1999)].

Les détails concernant ces approches sont donnés dans les références suivantes : Chen et Patton (1999) ; Patton (1997).

## **2.5 Performance**

Un autre aspect important lors de la conception du module de FDI est la performance du système obtenu. Afin de quantifier cette performance il est nécessaire de définir certains aspects importants pour obtenir une bonne exécution :

### **2.5.1 Pourcentage de fausse détection :**

Une *fausse détection* (alarme fausse) correspond à la détection d'un défaut bien qu'aucun défaut ne se soit produit. Le système de FDI doit être conçu de telle manière que le nombre de fausses alarmes soit le plus bas possible. Ceci pourrait signifier que par exemple un seuil élevé est choisi pour éviter la détection fausse provoquée par des perturbations ou du bruit de mesure. Évidemment, une détection fausse mène aux actions inadéquates dans un schéma FTCS, en effet un traitement de défaut est lancé alors qu'aucun défaut n'est présent.

### **2.5.2 Pourcentage de détection manquée :**

Une *détection manquée* (alarme manquée) décrit la situation où aucune alarme n'est activée bien qu'un défaut soit présent. Le taux d'alarmes manquées doit être le plus bas possible. Pour cela, il faut choisir un seuil assez bas pour assurer également que les défauts de petite taille puissent être détectés. Cependant, c'est évidemment l'opposé de la solution pour éviter de fausses détections. Une alarme manquée a un effet sérieux sur le schéma FTCS car le défaut ne peut pas être traité.

### 2.5.3 Dynamique du résidu :

À côté du problème de la détection de fausses alarmes et de détections manquées, le temps pour la détection, ou mieux, le temps pour la réaction des résidus, joue un rôle très important. Ceci a principalement deux raisons:

1. Afin de tenir compte des défauts dans un schéma FTCS, ceux-ci doivent être détectés et isolés assez rapidement. Dans le cas contraire, la performance du système pourrait atteindre un niveau inacceptable avant que le traitement ne soit lancé.

2. Lorsque certains résidus ont des temps de réaction sensiblement différents (période de détection d'un changement du résidu), le résultat pourrait être une isolation fautive. Pour illustrer ceci, l'exemple suivant est considéré: deux défauts sont considérés  $f_1$  et  $f_2$  avec les vecteurs de code correspondants  $\varepsilon_1 = (1 \ 0)$  et  $\varepsilon_2 = (1 \ 1)$ . Le deuxième résidu  $r_2$  réagit sensiblement plus lentement que le premier résidu  $r_1$ . Quand le défaut  $f_2$  se produit et que l'évaluation des résidus est effectuée, le premier résidu  $r_1$  a réagi, mais le second  $r_2$  ne l'a pas encore fait, ceci mène à une évaluation fautive du résidu. En conséquence le défaut  $f_1$  est détecté à la place de  $f_2$ .

À côté du temps de réaction, la réponse du résidu à un défaut d'occurrence est importante. Si le résidu atteint le seuil tandis que le défaut est présent, une *déteabilité forte* est obtenue. Cependant, quand il atteint le seuil pendant la transition du défaut, il est difficile de le détecter en présence du bruit de mesure. Ceci pourrait provoquer une isolation fautive ou une détection manquée. Une possibilité pour améliorer l'exécution de FDI pourrait être le filtrage du résidu.

### 2.5.4 Caractéristiques temporelles :

Afin de quantifier temporellement la FDI, nous définissons le temps de détection et d'isolation d'un défaut mais aussi le temps minimum entre deux défauts multiples (temps de réinitialisation). Le temps de détection ( $t_{det}$ ) correspond à la différence entre l'instant de détection ( $t_D$ ) et l'instant d'occurrence du défaut ( $t_f$ ). Le temps d'isolation ( $t_{iso}$ ) se

détermine en faisant la différence entre l'instant d'isolation ( $t_I$ ) et l'instant  $t_f$ . Le temps de réinitialisation ( $t_{rei}$ ) se quantifie par la différence entre l'instant de retour des résidus à leurs valeurs initiale ( $t_R$ ) et l'instant  $t_f$ , dans le cas où la méthode proposée est capable de réinitialiser le module de FDI.

$$t_{det} = t_D - t_f$$

$$t_{iso} = t_I - t_f$$

$$t_{rei} = t_R - t_f$$

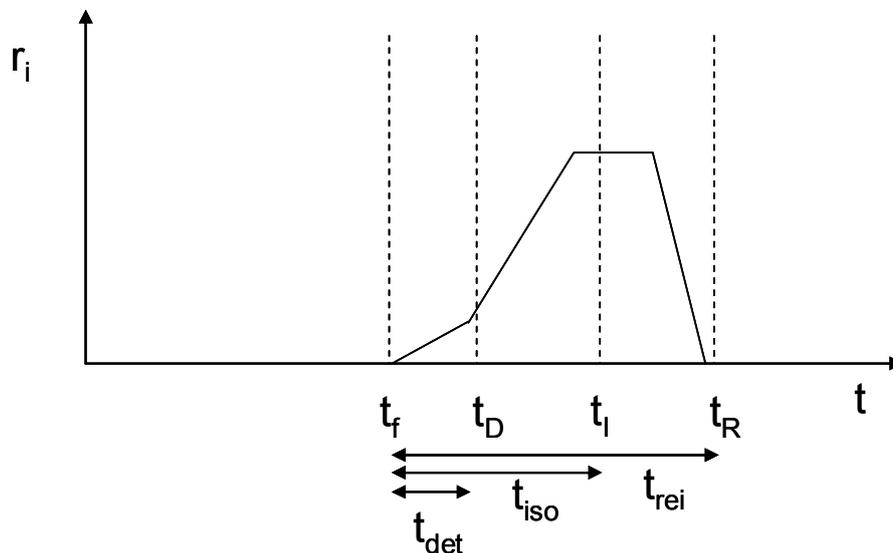


Figure 2.3 : Caractéristiques temporelles de la FDI

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un bref aperçu des aspects importants de la FDI basée sur le modèle. Les aspects de performance et de robustesse sont cruciaux, ils présentent des indications sur la qualité et l'applicabilité d'un système de FDI. Dans ce travail, nous allons concentrer notre étude sur l'aspect de la performance et ses caractéristiques. Nous avons également montré que la conception de la FDI est plus complexe que la génération des résidus. Une méthode de conception complète est une méthode d'optimisation qui optimise les critères indiqués ci-dessus. La conception basée sur les observateurs inclut plusieurs aspects :

- structure d'observateur appropriée,
- obtention de résidus structurés,
- stabilité de l'observateur,
- aspect de robustesse,
- optimisation de la performance.

## Chapitre 3 : Analyse des modèles de simulation

### Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier les systèmes sur lesquels nous allons appliquer le module de FDI présentés dans les chapitres suivants. Nous considérons deux systèmes : un modèle d'un système académique extrait de la littérature et un système représentant une unité pilote de traitement des eaux usées. Nous avons choisi de montrer les résultats dans un premier temps sur un système simple parce qu'il est plus facile d'analyser et d'expliquer les méthodes que nous allons développer.

### 3.1 Modèle d'un système non linéaire académique

Nous considérons l'exemple proposé par [Chen et Saif (2005)] qui est de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{Où } f(x) = \begin{bmatrix} -2x_1 + 0,2 \ln(x_1^2 + 1) \\ -2x_2 + 0,1 \sin(x_2) \\ -2x_3 \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = B \text{ et } C = B^T$$

C'est un système non linéaire avec trois états, deux entrées et deux sorties, c'est-à-dire que nous devons surveiller deux actionneurs et deux capteurs. Si nous choisissons  $u_1 = y_1$  et  $u_2 = -y_2 - (y_1^2 + y_2^2)$ , il est facile de montrer que le système en boucle fermée est un système stable. La matrice  $g(x)$  est une matrice constituée d'éléments constants, donc le critère de

bornitude est satisfait. Les valeurs initiales des trois états du système sont  $x(0) = [0,3 \ 0,3 \ 0,3]^T$  et le vecteur des entrées est  $u = \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix}$ . Sur la figure 3.1, nous avons représenté les deux sorties du système en boucle fermée  $y_1$  et  $y_2$  où nous voyons quelles demeurent à une valeur constante.

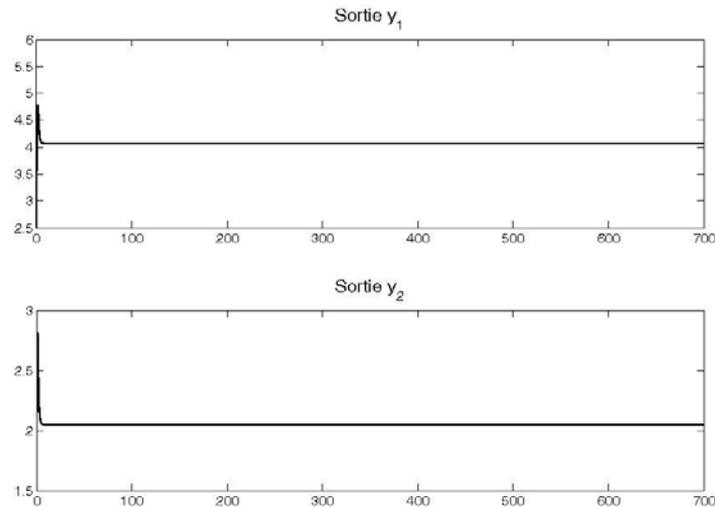


Figure 3.1 : Sorties du système académique

Nous allons analyser brièvement, pour le système décrit, l'interaction entre les entrées et les sorties et aussi les sorties entre elles, via la dynamique du système. Cette étude montrera l'effet d'un défaut actionneur ou capteur sur le vecteur de sortie du système, c'est-à-dire sur le fonctionnement du procédé. Les tableaux suivants montrent les interactions ; la lettre « **x** » symbolise là où nous avons une interaction et la lettre « **n** » symbolise là où nous n'en avons pas. Le tableau 3.1 présente l'interaction entre les entrées et les sorties du système considéré. Les deuxième et troisième colonnes correspondent aux entrées du système et les deux colonnes suivantes aux deux sorties du système ; les lignes représentent les sorties du système.

Tableau 3.1: Interaction entrées et sorties

	Entrées		Sorties	
Sorties	$u_1$	$u_2$	$y_1$	$y_2$
$y_1$	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
$y_2$	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>

Comme nous pouvons le constater toutes les entrées et toutes les sorties ont une forte interaction sur toutes les sorties du système.

## **3.2 Modèle d'un procédé de traitement des eaux usées**

### **3.2.1 Introduction**

La détérioration progressive des ressources d'eau et la grande quantité d'eau polluée produite dans les sociétés industrialisées, donne aux processus de traitement des eaux usées (WWT) une importance fondamentale dans la préservation de la qualité de l'eau. Les nouvelles directives et les réglementations (la directive 91/271/CEE se rapportant aux pays Européens) imposent l'adoption d'index spécifiques pour la qualité des eaux usées traitées. Tenant compte des problèmes écologiques courants, il est réaliste de croire que cette tendance continuera. En même temps les usines existantes augmentent grâce à la croissance des secteurs urbains, cette situation exige des processus de traitement des eaux usées plus efficaces.

À l'intérieur d'une usine de traitement biologique des eaux usées, le processus par boues activées (ASP en anglais ou PBA en français) est la technologie la plus généralement utilisée, pour enlever le polluant organique de l'eau usée, bien que le processus ait été développé au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Les raisons en sont qu'il est plus rentable, très flexible (il peut être adapté à n'importe quel genre d'eau usée), fiable et capable de produire des effluents de haute qualité. Ces diverses raisons nous encouragent à étudier plus en détail cette technologie.

### **3.2.2 Motivation**

Plusieurs motivations peuvent expliquer l'intérêt que présentent les usines de traitement des eaux usées ; nous pouvons les classer dans deux principales catégories :

- Motivation environnementale : Puisque l'eau est quelque chose de rare et nous devons la préserver.

- Motivations économiques : Puisqu'une usine de traitement des eaux usées peut être considérée comme la plus grande industrie en termes de traitement de matière première.

Par conséquent, il serait souhaitable qu'une telle industrie fonctionne à son efficacité maximum. Généralement l'évolution récente de la législation de certains pays, au sujet de l'utilisation des eaux de surface ou des eaux souterraines, est telle que la réutilisation de la totalité de l'eau issue du processus de traitement est indispensable. Dans un tel contexte, le traitement des eaux usées est devenu une partie du procédé de production où le contrôle de la qualité d'effluent est très important puisqu'un faible rendement du processus de traitement peut mener aux pertes de production importantes et entraîner des problèmes écologiques.

### **3.2.3 Le processus de traitement d'eaux usées**

Dans ce paragraphe, nous présentons le modèle mathématique qui décrit le procédé de traitement des eaux usées par boues activées (PBA). Le PBA est le traitement biologique des eaux usées le plus largement répandu, essentiellement parce que c'est une technologie peu coûteuse et qui peut être adaptée à n'importe quel genre d'eau usée. Dans le processus par boues activées, une suspension bactérienne de biomasse (les boues activées) est responsable de l'épuration des polluants. Selon la conception et l'application spécifique, une usine de traitement des eaux usées, qui utilise les boues activées, peut réaliser l'épuration biologique de l'azote et du phosphore, et en plus le déplacement des substances organiques carbonées. Les configurations des procédés par boues activées ont évolué pendant de nombreuses années ; Jeppsson (1996) fournit une revue approfondie sur l'évolution historique des procédés par boues activées. Dans notre travail, nous allons considérer la configuration traditionnelle d'un PBA.

### **3.2.4 Description d'une station de traitement des eaux usées par boues activées**

Une station d'épuration des eaux usées par boues activées est composée généralement d'un système de prétraitement, qui comprend principalement le dégraissage, le dessablage et

le déshuilage, et de trois réacteurs placés en cascade (figures 3.2 et 3.3). L'unité de prétraitement permet d'extraire les graisses et les huiles ainsi que les particules lourdes. A la suite de ce prétraitement, le premier réacteur appelé décanteur primaire reçoit l'eau polluée provenant des milieux urbains ou industriels.

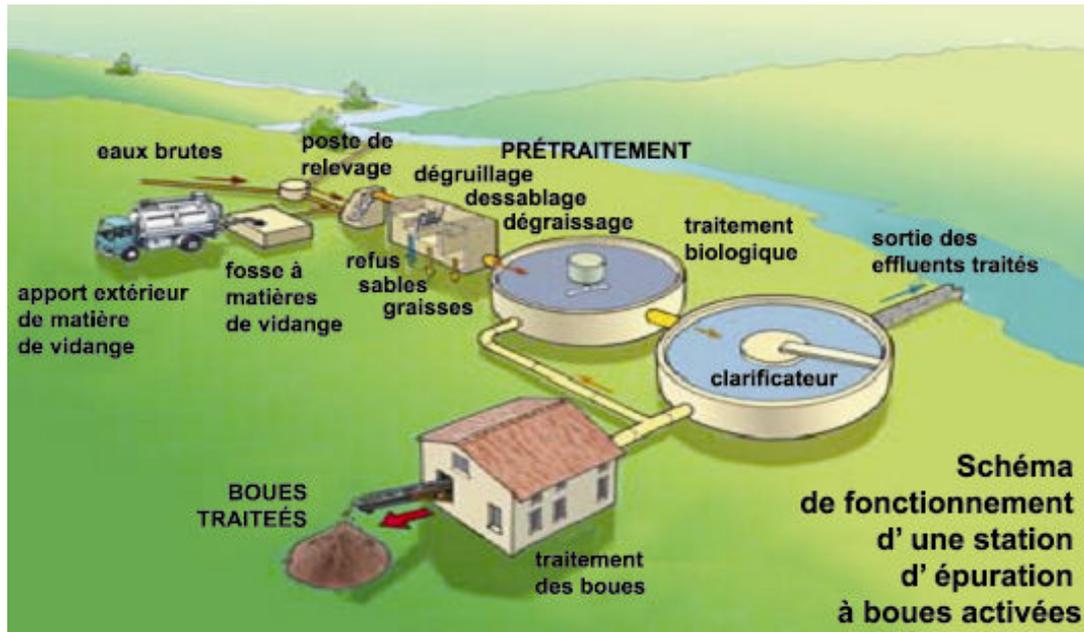


Figure 3.2 : Cycle de l'eau dans une station d'épuration

C'est à ce niveau que s'effectue la première phase du traitement qui consiste à éliminer la pollution en suspension. L'eau pénètre ensuite dans un second réacteur appelé bassin d'aération qui constitue le cœur de la station. Ce traitement est basé sur la mise en contact d'une population bactérienne (micro-organismes) avec des matières organiques contenues dans l'effluent à traiter.

Dans le bassin d'aération, se produit d'abord une adsorption rapide et une floculation des matières colloïdales en suspension et des matières organiques solubles par les boues activées. Arrive ensuite une oxydation progressive de la synthèse des matières organiques adsorbées et des matières organiques extraites. Enfin, l'eau subit un dernier traitement dans le troisième réacteur appelé décanteur secondaire ou clarificateur. Celui-ci délivre de l'eau épurée après décantation des boues. Une partie de ces dernières est recyclée judicieusement

dans le bassin d'aération (boues recyclées) et les boues en excès sont évacuées pour un traitement extérieur approprié.

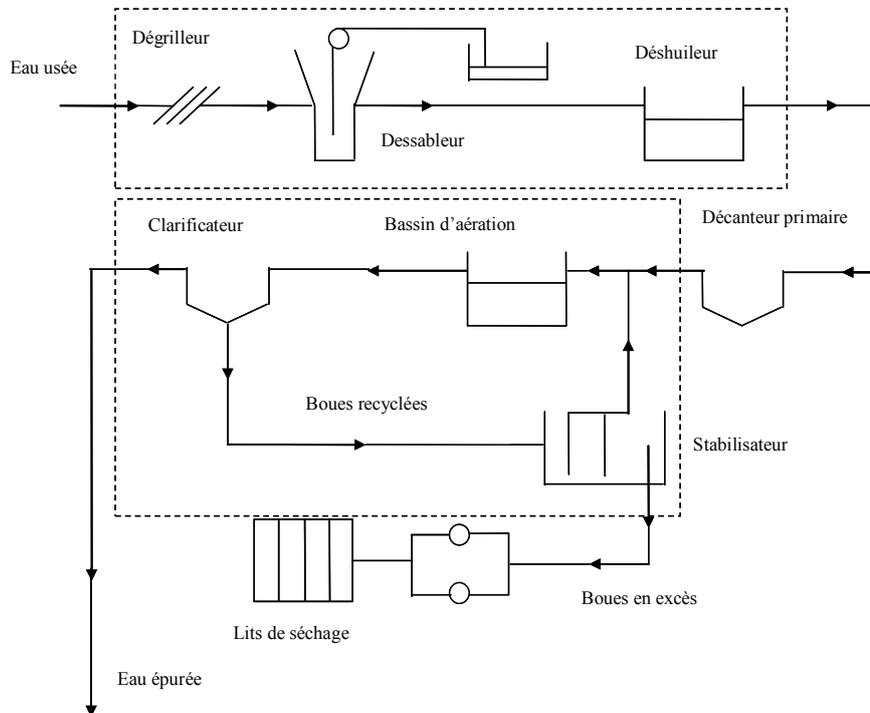


Figure 3.3 : Schéma descriptif d'une station d'épuration par boues activées

Dans la figure 3.4, nous nous focalisons sur le cœur du dispositif, à savoir la base du procédé par boues activées considéré qui est constituée du bassin d'aération et du clarificateur ; les boues sont partiellement recyclées vers le bassin d'aération l'autre partie est considérée comme des boues activées en excès. Le PBA est un processus biologique dans lequel les micro-organismes oxydent et minéralisent la matière organique. Les micro-organismes dans les boues activées sont principalement des bactéries, qui peuvent également être présentes dans l'eau usagée à l'entrée de l'usine. La composition et les espèces dépendent non seulement des eaux à traiter mais également de la conception et de l'opération de l'usine de traitement des eaux usées.

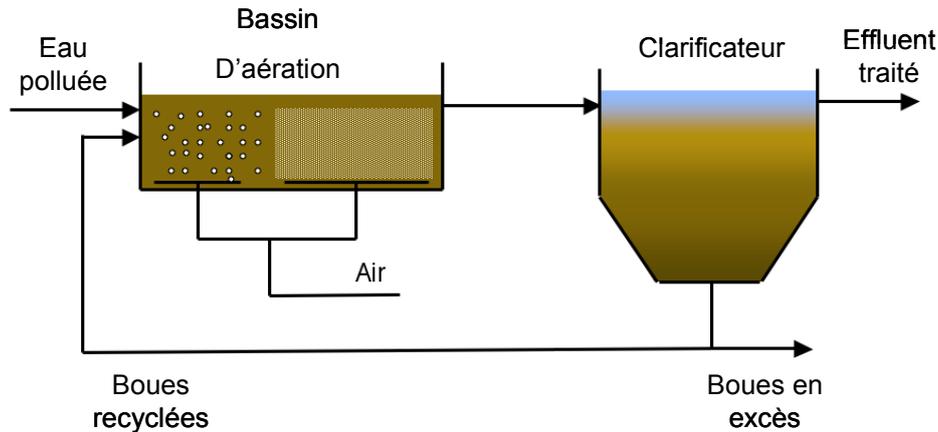


Figure 3.4 : Processus de boues activées

Le procédé de traitement par boues activées consiste en un système biologique aérobie dans lequel les floccs biologiques (biofloccs) sont continuellement recyclés et remis en contact avec les eaux usées organiques en présence d'oxygène. L'oxygène est habituellement fourni par des bulles d'air insufflées dans le mélange de liquide et de boues dans des conditions de turbulence ou par des unités d'aération de surface mécaniques ou d'autres types.

### 3.2.5 Modélisation mathématique du procédé de traitement des eaux usées

#### 3.2.5.1 Types de modèle

L'étape fondamentale de la modélisation mathématique des procédés de traitement par boues activées consiste à déterminer les vitesses de réactions des variables macroscopiques du système à savoir les vitesses : de croissance de la biomasse, de dégradation de substrat et de consommation de l'oxygène dissous. La deuxième étape permet de déterminer les équations d'états du système dont les variables d'états sont les concentrations en micro-organismes, en substrat, en biomasse recyclée et en oxygène dissous. Ces variables ainsi que les variables d'entrée et de sortie sont regroupées dans des expressions mathématiques constituant ainsi le modèle du procédé. Ce modèle est établi à partir de l'écriture des bilans matière relatifs aux différents composés de la réaction biochimique pendant un certain intervalle de temps. Ce bilan est basé sur l'égalité suivante :

$$Accumulation = \pm Conversion + Alimentation - Soutirage$$

Il y a plusieurs modèles décrivant le processus biologique par boues activées, les développements proposés par l'association internationale pour la qualité de l'eau (IAW) représentent une contribution majeure :

- **ASM1** : le modèle du processus par boues activées No.1 [Henze *et al.* (1987)] peut être considéré comme le modèle de référence puisque il a déclenché l'acceptation générale de la modélisation des processus biologiques. Le modèle a été principalement développé pour décrire l'épuration des composés et de l'azote organiques avec consommation simultanée de l'oxygène et du nitrate comme accepteur d'électron. Le modèle, en outre, vise à rapporter une bonne description de la production de boues. La DCO (demande chimique en oxygène) a été adoptée comme mesure de la concentration de la matière organique.
- **ASM2** : le modèle du processus par boues activées No.2 [Henze *et al.* (1995)] complète la modélisation ASM1 en incluant la description du phosphore biologique.
- **ASM2d** : le modèle du processus par boues activées No.2d [Henze *et al.* (1999)] est basé sur le modèle ASM2 en y incluant l'activité de dénitrification des PAO (Accumulation de Polyphosphate Organique) pour permettre une meilleure description de la dynamique du phosphate et du nitrate.
- **ASM3** : le modèle du processus par boues activées No.3 [Gujer *et al.* (1999)] a été également développé pour l'épuration biologique d'azote, avec fondamentalement le même but que l'ASM1. La principale différence entre les modèles ASM1 et ASM3 est que ce dernier identifie l'importance des polymères de stockage dans la conversion hétérotrophe des boues activées.

Dans ce travail, le modèle adopté est le modèle ASM1, qui sera brièvement expliqué dans la section 3.5.3.

### 3.2.5.2 Variables d'état du modèle

Le matériel carboné dans le modèle ASM1 est divisé en DCO biodégradable, DCO non-biodégradable (matériel inerte) et biomasse. La DCO biodégradable est encore subdivisée en substrat aisément biodégradable  $S_S$  et substrat lentement biodégradable  $X_S$ .

La DCO non-biodégradable est subdivisée en matériel soluble  $S_I$  et particulaire  $X_I$ . Le matériel soluble est considéré inchangé par l'action biologique d'effluent du purificateur, tandis que le matériel particulaire inerte s'accumule en tant que solides en volatiles suspension. Le matériel particulaire inerte traversera l'installation sans changement dans sa composition. La biomasse active est constituée par les microorganismes hétérotrophes  $X_H$ . Enfin une variable d'état supplémentaire  $X_p$  est introduite pour la modélisation des produits particuliers inertes résultant de la mort de cellulaire.

### 3.2.5.3 Dynamique du procédé

Les différents processus incorporés dans le modèle ASM1 sont brièvement décrits ci-dessous :

*Croissance aérobie des hétérotrophes* : Une fraction du substrat aisément biodégradable est employée pour la croissance de la biomasse et l'équilibre est oxydé par l'énergie provoquant une demande associée de l'oxygène. La croissance est modélisée en utilisant la cinétique de Monod qui est la plus utilisée et la plus répandue dans la littérature. Ce modèle dit de Monod (1949), ne prend en compte que le facteur limitant dû à un manque de substrat  $S_S$  et s'exprime sous la forme :

$$\mu(S_S) = \mu_{\max} \frac{S_S}{K_S + S_S} \quad (3.2)$$

Où  $\mu_{\max}$  est le taux maximum de croissance et  $K_S$  est la constante d'affinité appelée paramètre de Michaelis-Menten ; elle traduit la facilité d'assimilation du substrat par la

biomasse. Une autre forme du taux spécifique de croissance à été élaborée en tenant compte de l'inhibition par la concentration en oxygène dissous  $S_O$ .

$$\mu(S_S, S_O) = \mu_{\max} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_O + S_O} \quad (3.3)$$

C'est cette dernière structure que nous allons utiliser pour la modélisation de la limitation en ces substrats. Les concentrations  $S_S$  et  $S_O$  peuvent limiter le taux de croissance. Ce processus est la principale voie de production de la nouvelle biomasse et de l'élimination de la DCO.

*Décomposition des hétérotrophes* : Le processus est modélisé selon l'hypothèse de régénération et de mortalité. Les organismes meurent à un certain taux et une partie du matériel est considérée comme non-biodégradable et s'ajoute à la fraction de produit particulaire inerte  $X_p$ . Le reste s'ajoute à la quantité de substrat lentement biodégradable.

*Hydrolyse de la matière organique absorbée* : Le substrat lentement biodégradable correspond aux substances polluantes, il est décomposé par un mécanisme extra cellulaire, en produisant du substrat aisément biodégradable utilisable par la biomasse. Le taux d'hydrolyse se sature quand la concentration du substrat absorbée devient grande par rapport à la biomasse.

Dans la formulation du modèle, les hypothèses suivantes sont considérées :

- Aucune réaction biologique n'a lieu dans le clarificateur.
- Les bassins sont considérés comme parfaits.
- Le bassin d'aération est considéré comme étant parfaitement mélangé de sorte que la concentration de chaque composant soit homogène dans l'espace.
- Les substrats et l'oxygène dissous sont considérés comme masse limitant avec une cinétique bi-substrat du type de Monod.
- Le produit particulaire inerte  $X_p$  est considéré comme matière organique inerte  $X_I$ .

### 3.2.5.4 Variables d'entrée

Un procédé par boues activées est constitué de quatre actionneurs :  $Q_{in}$  le débit d'entrée,  $Q_r$  débit du recyclage entre le décanteur et le réacteur,  $Q_w$  le débit de purge et  $Q_L$  le débit d'air dans le bassin d'aération (figure 3.5). Les concentrations de la matière organique soluble inerte ( $S_{I,in}$ ) et particulaires inerte ( $X_{I,in}$ ) dans l'alimentation qui arrive au niveau du bassin d'aération sont considérées comme des variables d'entrée du modèle.

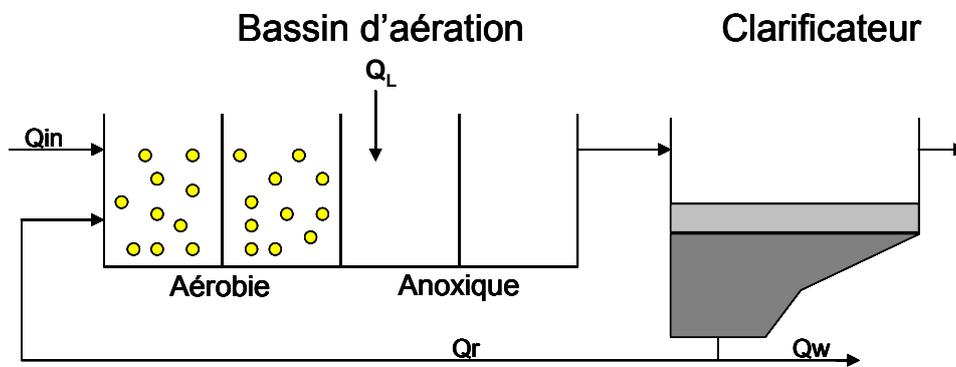


Figure 3.5 : Les actionneurs à surveiller

### 3.2.5.5 Modèle dynamique du procédé

Par l'application du bilan massique au niveau du bassin d'aération, les équations différentielles qui décrivent l'évolution de la concentration de biomasse hétérotrophe ( $X_H$ ), de substrat facilement biodégradable ( $S_S$ ), de substrat lentement biodégradable ( $X_S$ ), de la matière organique soluble inerte ( $S_I$ ) et particulaire inerte ( $X_I$ ) ainsi que de l'oxygène dissous ( $S_O$ ) au sein du procédé de dépollution ont été établies. Tous les détails du modèle sont donnés dans l'annexe [Nejjari (2001)] ; ce modèle représente une variante du modèle ASM1 proposé par [Henze *et al.* (1987)].

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_r} (S_{I,in} - S_I) \quad (3.4)$$

$$\frac{dS_S}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_r} (S_{S,in} - S_S) - \frac{1}{Y_H} \mu_1 + \mu_3 \quad (3.5)$$

$$\frac{dX_I}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_r} (X_{I,in} - X_I) + \frac{Q_r}{V_r} (X_{I,rec} - X_I) + f_{X_I} \mu_2 \quad (3.6)$$

$$\frac{dX_S}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_r} (X_{S,in} - X_S) + \frac{Q_r}{V_r} (X_{S,rec} - X_S) + (1 - f_{X_I}) \mu_2 - \mu_3 \quad (3.7)$$

$$\frac{dX_H}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_r} (X_{H,in} - X_H) + \frac{Q_r}{V_r} (X_{H,rec} - X_H) + \mu_1 - \mu_2 \quad (3.8)$$

$$\frac{dS_O}{dt} = \frac{Q_{in}}{V_r} (S_{O,in} - S_O) + Q_L \frac{\beta}{C_S} (C_S - S_O) - \frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu_1 \quad (3.9)$$

Ou :

$$\mu_1 = \mu_{H,max} \frac{S_S}{(K_S + S_S)} \frac{S_O}{(K_O + S_O)} \quad (3.10)$$

$$\mu_2 = b_H X_H \quad (3.11)$$

$$\mu_3 = K \frac{X_S}{(K_X X_H + X_S)} \frac{S_O}{(K_O + S_O)} X_H \quad (3.12)$$

Les équations différentielles qui décrivent l'évolution de la concentration en biomasse recyclée et en substrat recyclé au niveau du clarificateur sont les suivantes :

$$\frac{dX_{H,rec}}{dt} = \frac{Q_{in} + Q_r}{V_{dec}} X_H - \frac{Q_r + Q_W}{V_{dec}} X_{H,rec} \quad (3.13)$$

$$\frac{dX_{I,rec}}{dt} = \frac{Q_{in} + Q_r}{V_{dec}} X_I - \frac{Q_r + Q_W}{V_{dec}} X_{I,rec} \quad (3.14)$$

$$\frac{dX_{S,rec}}{dt} = \frac{Q_{in} + Q_r}{V_{dec}} X_S - \frac{Q_r + Q_W}{V_{dec}} X_{S,rec} \quad (3.15)$$

L'installation pilote [Nejjari (2001)] qui reproduit les conditions de fonctionnement et la configuration géométrique de ce processus est installée dans le département chimique de l'école technique de Vilanova (Espagne) et sert d'appui expérimental. L'installation pilote de Vilanova est une reproduction à échelle réduite d'une usine conventionnelle de boues

activées pour l'épuration des matériaux carbonés. Elle se compose d'un bassin d'aération (8,15 l) aéré par un système submergé de bulle d'air et d'un clarificateur (5,2 l). En présence d'oxygène dissous, l'eau usée qui est mélangée aux boues activées recyclées, est biodégradée dans le réacteur. L'effluent traité est séparé des boues activées dans le clarificateur. Une partie des boues activées est stockée tandis qu'une grande fraction est recyclée vers le bassin d'aération pour maintenir un rapport approprié entre le substrat et la biomasse. Le choix des valeurs pour les coefficients cinétiques et stœchiométriques du modèle mathématique se fait par calibrage du modèle.

Dans le cas des modèles ASM, le calibrage est traditionnellement effectué par des expériences spécifiques sur un pilote et sur les usines afin d'assumer des conditions de fonctionnement constantes. Les valeurs pour les paramètres des modèles suggérés par le groupe IAWQ sont utilisées pour les simulations, tous les détails du modèle sont présentés dans l'Annexe.

### 3.2.6 Interactions entrées et sorties

Dans cette section, nous présentons l'interaction entre les entrées et les sorties pour le système de traitement des eaux usées. Les tableaux sont construits de la même manière que celle du tableau 3.1 ; sur le tableau 3.2 nous présentons l'interaction entrées-sorties. La première colonne du tableau représente les entrées du système et les colonnes suivantes représentent les 6 sorties du système. Nous constatons que la première entrée  $Q_{in}$  affecte toutes les sorties du système, nous pouvons donc conclure que c'est une entrée dominante pour le modèle et aussi l'entrée  $Q_r$  affecte presque tous les états du système. La deuxième entrée affecte directement la sortie  $S_o$  (eq. 3.9) mais par l'interaction des états du système elle affecte aussi indirectement trois autres sorties via les équations de  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  et  $\mu_3$  (eq. 3.10-3.12). Finalement l'entrée  $Q_w$  n'apparaît pas directement sur les sorties du système ; par contre nous avons un effet indirect de cet entrée sur quatre sorties du système. Les entrées du système ont une interaction, directe ou indirecte, assez forte avec toutes les sorties du système.

Tableau 3.2: Interaction entrées-sorties

Entrées	Sorties					
	$S_I$	$S_S$	$X_I$	$X_S$	$X_H$	$S_O$
$Q_{in}$	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
$Q_L$	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
$Q_r$	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>n</b>
$Q_w$	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>n</b>

Sur le tableau 3.3, nous montrons l'interaction de chaque sortie du système avec les autres sorties ; les lignes et les colonnes du tableau représentent les six sorties du modèle. Nous constatons que la sortie  $S_I$  n'a aucune influence sur les autres sorties. Les cinq autres sorties ( $S_S$ ,  $X_I$ ,  $X_S$ ,  $X_H$  et  $S_O$ ) ont au moins un effet sur une autre sortie du système soit directement soit indirectement. Ces résultats représentent l'interaction en boucle ouverte et c'est normal qu'il puisse exister des sorties totalement indépendantes entre elles.

Tableau 3.3: Interaction sorties-sorties

Sorties	$S_I$	$S_S$	$X_I$	$X_S$	$X_H$	$S_O$
$S_I$	<b>x</b>	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>
$S_S$	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
$X_I$	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>n</b>
$X_S$	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
$X_H$	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
$S_O$	<b>n</b>	<b>x</b>	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>n</b>	<b>x</b>

L'installation considérée est un système en boucle fermée où un simple contrôleur proportionnel avec un gain constant  $K$  a été conçu. Ainsi la présence du contrôleur rend le problème plus complexe au niveau de l'interaction des sorties. Dans ce cas, les sorties n'affectent pas seulement des capteurs dépendants mais également la dynamique du système (les autres sorties du système). Dans ce travail, nous ne nous sommes pas focalisés sur la

commande d'un tel système. Le lecteur intéressé peut trouver plus de détails sur l'interaction des entrées-sorties et sur la commande d'un procédé de traitement des eaux dans [Mulas (2006) ; Ekman (2003) ; Ben Youssef (1997)]. La figure 3.6 montre les sorties du système en boucle fermée où nous observons que toutes les sorties se stabilisent vers des valeurs constantes après un certain temps.

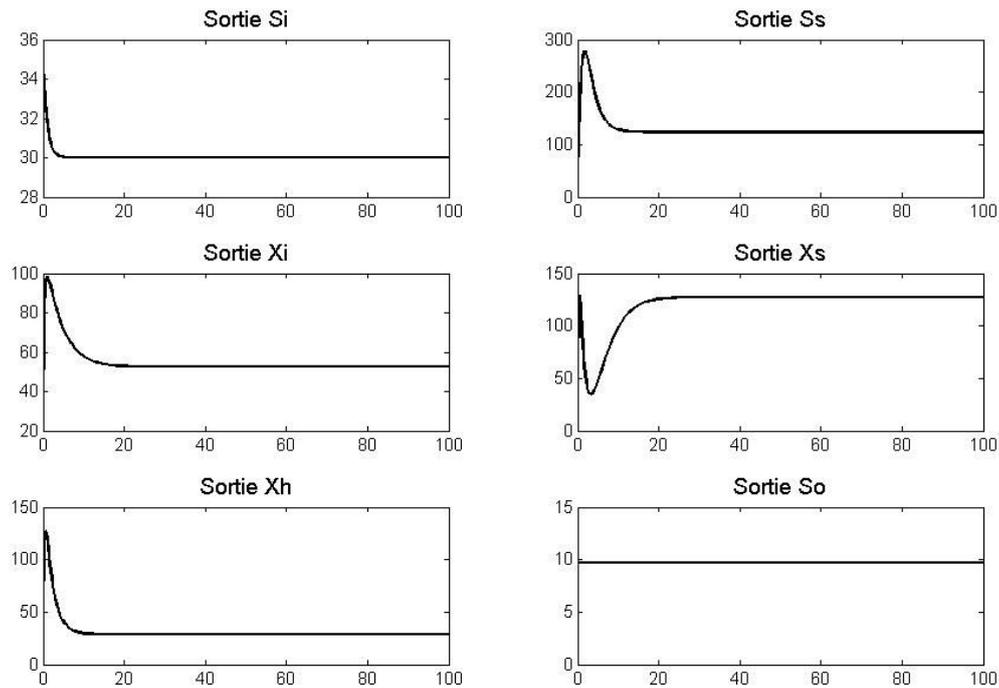


Figure 3.6 : Sorties du système

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et défini les deux systèmes qui nous serviront de modèle de simulation afin de tester les approches de surveillance proposées. Tout d'abord, un système simple que nous avons extrait de la littérature ; ensuite le modèle d'un procédé de traitement biologique des eaux usées. Pour ces deux modèles nous avons étudié les interactions entrées sorties afin de matérialiser les influences de chacune. Le modèle établi nous servira de support pour le développement des algorithmes de détection et d'isolation des défauts dans les actionneurs et capteurs qui seront présentés dans les chapitres suivants. Enfin

nous avons montré l'interaction entre le vecteur des entrées et celui des sorties du système et le contrôleur créé pour le modèle.

## Chapitre 4 : Méthodes à base d'observateurs

### Introduction

La conception d'un observateur nécessite la connaissance de certaines informations internes et/ou externes du système (directement disponibles). Ces informations internes sont, dans certains cas, nécessaires pour des raisons : de modélisation (identification), de surveillance (détection de défauts) ou pour la conduite du système (commande). Afin d'avoir un système de conduite performant, il est nécessaire de disposer de toutes ces informations comme le montre la figure 4.1 [Besançon (2007)].

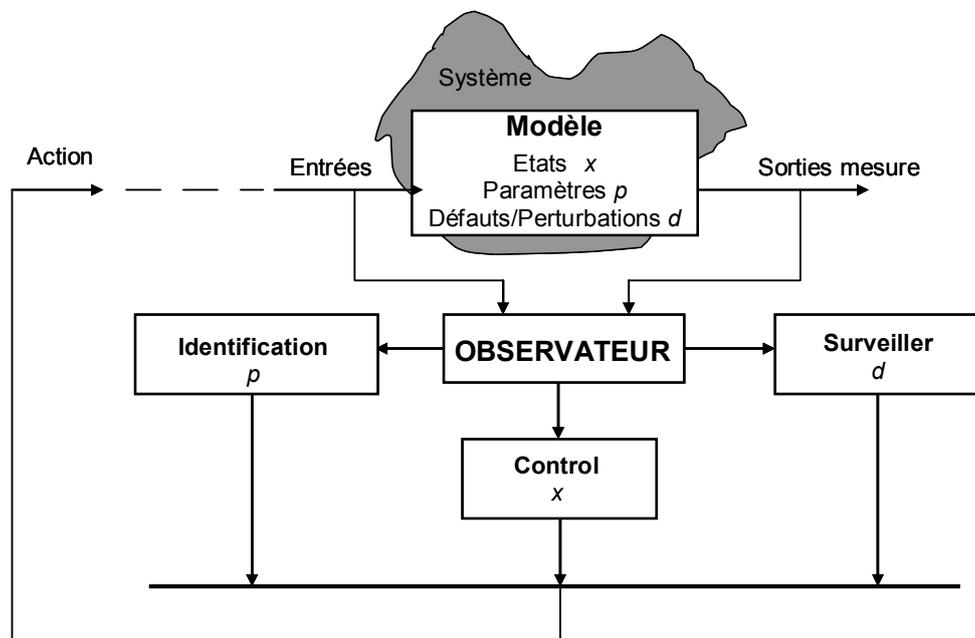


Figure 4.1 : Observateur au cœur d'un système de conduite

## 4.1 Différents types d'observateurs

Un observateur est basé sur le modèle du système avec un terme d'adaptation en ligne qui dépend des mesures disponibles ; son but est la reconstruction de l'information. Le modèle est basé sur une représentation d'état du système et nous supposons que toute l'information, qui va être reconstruite, peut être bornée par les variables d'état. Généralement, le modèle considéré peut être en temps continu ou en temps discret, stochastique ou déterministe, de dimension finie ou infinie, régulier ou singulier. Sur la figure 2 nous avons représenté les trois principales catégories d'observateurs qui sont : les observateurs stochastiques (filtre DMZ [Yao et Hu (2001)] et filtre à particule [Blom et Bloem (2004)]), les observateurs déterministes (observateur à grand gain [Hammouri *et al.* (1999)], observateur algébrique [Ibrir (2003)], observateur à horizon glissant [Mayne et Michalska (1992)] et observateur intelligent [Schröder (2000)]) et finalement les observateurs adaptatifs (observateur par intervalles [Li et Dahhou (2007)], observateur parallèle [Thein et Misawa (1999)] et observateur multi modèles [Morel *et al.* (2006) ; Zhang (1999)]).

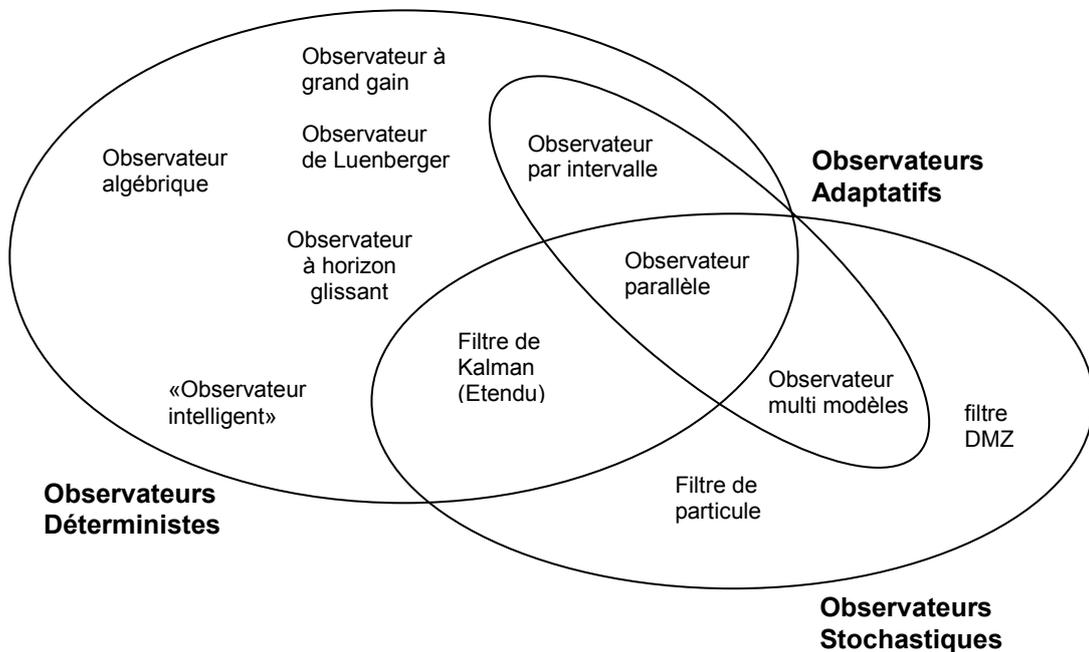


Figure 4.2 : Différents types d'observateurs

Dans chaque groupe, il existe plusieurs types d'observateurs, certains observateurs font partie de plusieurs groupes comme le filtre de Kalman (qui se trouve dans la catégorie déterministe et stochastique) ou l'observateur parallèle (qui fait partie de toutes les catégories). Dans ce travail, nous allons considérer que nous disposons d'un modèle sous forme d'état régulier, de dimension finie, déterministe et en temps continu ; nous nous focalisons sur l'étude des observateurs adaptatifs.

## 4.2 Modèle d'étude

Les systèmes non linéaires que nous allons considérer sont décrits par la représentation suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (4.1)$$

où  $x$  est le vecteur d'état ( $x \in X \subset \mathfrak{R}^n$ ),  $u$  est le vecteur des entrées externes connues ( $u \in U \subset \mathfrak{R}^m$ ) et  $y$  est le vecteur des sorties mesurées ( $y \in Y \subset \mathfrak{R}^p$ ). Les fonctions  $f$  et  $h$  sont de classe  $C^\infty$ .

Plus généralement, les dynamiques peuvent dépendre explicitement du temps, via l'expression  $f(x(t), u(t), t)$ , quant à  $y$ , il peut dépendre explicitement de  $u$  et même de  $t$ , via l'expression  $h(x(t), u(t), t)$ . Ce système, qui est fonction du temps, s'appelle 'à temps variant' et peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \\ y(t) = h(x(t), u(t), t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Nous pouvons retrouver des formes plus spécifiques de représentation d'état comme :

- Système avec entrée affine :

$$\begin{cases} f(x, u) = f(x) + g(x)u \\ h(x, u) = h(x) + k(x)u \end{cases} \quad (4.3)$$

- Système avec état affine :

$$\begin{cases} f(x, u) = A(u)x + B(u) \\ h(x, u) = C(u)x + D(u) \end{cases} \quad (4.4)$$

- Système variant dans le temps (LTV) :

$$\begin{cases} f(x, u, t) = A(t)x + B(t)u \\ h(x, u, t) = C(t)x + D(t)u \end{cases} \quad (4.5)$$

- Système invariant dans le temps (LTI) :

$$\begin{cases} f(x, u) = Ax + Bu \\ h(x, u) = Cx + Du \end{cases} \quad (4.6)$$

Généralement le modèle d'un observateur peut être défini par [Kalman et Bucy (1961) et Luenberger (1966)] :

**Définition 4.1** *Observateur*

Considérons un système de la forme (4.1), un observateur est donné par un système auxiliaire de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) - G(\eta)(h(\hat{x}) - y) \\ \dot{\eta} = \psi(\hat{x}, u, y, \eta) \end{cases} \quad (4.7)$$

tel que :

$$[i] \quad \hat{x}(0) = x(0) \Rightarrow \hat{x}(t) = x(t), \quad \forall t \geq 0 ;$$

$$[ii] \quad \|\hat{x}(t) - x(t)\| \rightarrow 0 \text{ quand } t \rightarrow \infty .$$

Si (ii) est vrai pour tout  $x(0)$  et  $\hat{x}(0)$ , l'observateur est global.

Si (ii) est vrai avec une convergence exponentielle, l'observateur est exponentiel.

Si (ii) est vrai avec un taux de convergence qui peut être réglé, l'observateur est réglable.

Où  $G(\eta)$  est appelé gain d'observation et  $G(\eta)(h(\hat{x}) - y)$  est le terme de correction. Nous allons donner dans la suite quelques résultats sur les différents types d'observateurs que l'on rencontre dans la littérature.

**Remarque 4.1 :**

- Il faut noter que nous allons appeler la différence  $\hat{x}(t) - x(t)$  *erreur d'observation* et que nous la noterons  $\tilde{x}(t)$ .
- Le terme,  $\chi_u(t, x_0)$  représente par la suite la solution de l'équation d'état (4.1) lorsque l'on applique l'entrée  $u$  sur l'intervalle  $[0, t]$ .

### 4.3 Observabilité non linéaire

Dans cette partie, nous donnerons quelques conditions nécessaires sur le système afin d'obtenir des solutions possibles pour l'observateur. Toutes ces conditions correspondent à ce qui est connu sous le vocable "conditions d'observabilité". Des références et des détails supplémentaires sur l'aspect de l'observabilité non linéaire se trouvent dans [Hermean et Krener (1977) et Gauthier et Bornard (1981)]. Nous allons, à présent, donner quelques définitions liées au concept d'observabilité.

**Définition 4.2 Indistinguabilité**

La paire  $(x_0, x'_0) \in \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^n$  ou  $x_0 \neq x'_0$  est indistinguishable pour un système de la forme (4.1) si :

$$\begin{aligned} \forall u \in U, \quad \forall t \geq 0 \\ h(\chi_u(t, x_0)) = h(\chi_u(t, x'_0)) \end{aligned} \tag{4.8}$$

Un état  $x$  est indistinguishable de  $x_0$  si la paire  $(x, x_0)$  est indistinguishable.

**Définition 4.3 Observabilité [resp. en  $x_0$ ]**

Un système de la forme (4.1) est observable [resp. en  $x_0$ ], s'il n'admet aucune paire indistinguishable [resp. aucun état indistinguishable de  $x_0$ ].

Cette définition est assez générale car elle permet de distinguer les états dans leur voisinage.

Par exemple, considérons le système de la forme:

$$\dot{x} = u, \quad y = \sin(x) \quad (4.9).$$

Il est évident que la paire  $[x_0, x_0 + 2k\pi]$  est indistinguable et donc le système n'est pas observable. Mais nous pouvons noter que  $y$  nous permet de distinguer les états appartenant à  $]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$ . Ce qui permet de considérer une notion complémentaire : *l'observabilité faible*.

**Définition 4.4** *Observabilité faible [resp. en  $x_0$ ]*

*Un système de la forme (4.1) est faiblement observable [resp. en  $x_0$ ], s'il existe un voisinage  $W$  pour tout  $x$  [resp. tout  $x_0$ ], tel qu'il n'y a pas un état indistinguable de  $x$  [resp.  $x_0$ ] en  $W$ .*

**Définition 4.5** *Observabilité locale faible [resp. en  $x_0$ ]*

*Un système de la forme (4.1) est localement faiblement observable [resp. en  $x_0$ ] s'il existe un voisinage  $W$  pour tout  $x$  [resp. tout  $x_0$ ] tel que pour tout voisinage  $V$  de  $x$  [resp.  $x_0$ ] qui est contenu dans  $W$ , il n'existe aucun état indistinguable de  $x$  [resp.  $x_0$ ] en  $V$  où les trajectoires évoluent à l'intérieur de  $V$ .*

**Définition 4.6** *Espace d'observation*

*L'espace d'observation d'un système de la forme (4.1) est défini comme le plus petit espace vectoriel (noté par  $O(h)$ ) de fonction de classe  $C^\infty$  qui contient les composantes de  $h$  et qui est fermé par la dérivation de Lie où  $f_u := f(\cdot, u)$  pour toutes les entrées constantes  $u \in \mathfrak{R}^m$*

*(de la même façon pour tous les  $\rho \in O(h)$ ,  $L_{f_u} \rho \in O(h)$ , où  $L_{f_u} \rho(x) = \frac{\partial \rho}{\partial x} f(x, u)$ ).*

**Définition 4.7** *Condition du rang d'observabilité [resp. en  $x_0$ ]*

*On dit que un système de la forme (4.1) satisfait la condition du rang d'observabilité [resp. en  $x_0$ ] si :*

$$\forall x, \dim(dO(h)|_x) = n \text{ [resp. } \dim(dO(h)|_{x_0}) = n \text{]}$$

où  $dO(h)|_n$  est l'ensemble  $d\rho(x)$  avec  $\rho \in O(h)$ .

**Théorème 4.1 :** *Un système de la forme (4.1) qui satisfait la condition du rang d'observabilité en  $x_0$ , est localement faiblement observable en  $x_0$ .*

*Plus généralement un système de la forme (4.1) qui satisfait la condition du rang d'observabilité, est localement faiblement observable.*

*Au contraire, un système de la forme (4.1) qui est localement faiblement observable, satisfait la condition du rang d'observabilité dans un espace ouvert compact de  $X$ .*

## 4.4 Conditions analytique d'observabilité

Les notions d'entrée universelle et d'observabilité universelle ont été introduites par [Bornard *et al.* (1995)] :

### Définition 4.8 Entrée Universelle

*Une entrée  $u$  est universelle (resp. sur  $[0, t]$ ) pour un système de la forme (4.1) si :*

$$\forall x_0 \neq x'_0, \exists \tau \geq 0 \text{ (resp. } \exists \tau \in [0, t] \text{) tel que}$$

$$h(\chi_u(\tau, x_0)) \neq h(\chi_u(\tau, x'_0)). \quad (4.10)$$

*Une entrée  $u$  est une entrée singulière si elle n'est pas universelle [Sussmann (1979)].*

### Définition 4.9 Système uniformément observable [resp. localement]

*Un système est uniformément observable (UO) si chaque entrées est universelle (resp. sur  $[0, t]$ ).*

**Proposition 4.1 :** *Une entrée  $u$  est une entrée universelle sur  $[0, t]$  pour un système de la*

*forme (4.1) si et seulement si :  $\int_0^t \|h(\chi_u(\tau, x_0)) - h(\chi_u(\tau, x'_0))\|^2 dt > 0$  pour tout  $x_0 \neq x'_0$ .*

**Définition 4.10** *Entrée persistante*

Une entrée  $u$  est une entrée persistante pour un système de la forme (4.1) si :

$$\begin{aligned} & \exists t_0, T : \forall t \geq t_0, \forall x_t \neq x'_t \\ & \int_t^{t+T} \|h(\chi_u(\tau, x_t)) - h(\chi_u(\tau, x'_t))\|^2 dt > 0. \end{aligned} \quad (4.11)$$

**Définition 4.11** *Entrée régulièrement persistante*

Une entrée  $u$  est une entrée régulièrement persistante pour un système de la forme (4.1) si :

$$\begin{aligned} & \exists t_0, T : \forall x_{t-T}, x'_{t-T}, \forall t \geq t_0 \\ & \int_{t-T}^t \|h(\chi_u(\tau, x_{t-T})) - h(\chi_u(\tau, x'_{t-T}))\|^2 dt > \beta(\|x_{t-T} - x'_{t-T}\|) \end{aligned} \quad (4.12)$$

pour une fonction  $\beta$  de classe  $K$

**Définition 4.12** *Entrée régulièrement locale*

Une entrée  $u$  est une entrée régulièrement locale pour un système de la forme (4.1) si :

$$\begin{aligned} & \exists T_0, \alpha : \forall x_{t-T}, x'_{t-T}, \forall T \leq T_0, \forall t \geq T, \\ & \int_{t-T}^t \|h(\chi_u(\tau, x_{t-T})) - h(\chi_u(\tau, x'_{t-T}))\|^2 dt > \beta(\|x_{t-T} - x'_{t-T}\|, \frac{1}{T}) \end{aligned} \quad (4.13)$$

pour une fonction  $\beta$  de classe  $KL$  [Besançon (2007)].

## 4.5 Structures des observateurs

Les conceptions d'un observateur peuvent être classifiées en “observateurs uniformes” et “observateurs non uniformes” par rapport à l’entrée (ou le temps), et nous pouvons considérer les deux cas suivants :

- Pour un système uniformément observable, nous pouvons construire des observateurs uniformes.
- Pour un système non uniformément observable, nous pouvons construire des observateurs non uniformes.

Le premier cas correspond aux observateurs connus sous l'appellation *observateurs de Luenberger* pour des systèmes LTI [Luenberger (1966)], alors que le second correspond aux observateurs connus sous l'appellation *observateurs de Kalman* pour des systèmes LTV [Kalman (1961)].

#### 4.5.1 Observateur pour un système linéaire

Nous allons traiter le cas des systèmes LTI et LTV.

##### 4.5.1.1 Observateur de Luenberger pour les systèmes linéaires stationnaires (LTI)

Considérons un système LTI de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.15)$$

Pour ces systèmes, nous avons le résultat suivant [Luenberger (1966)] :

**Théorème 4.2** : Si le système (4.15) satisfait la condition du rang d'observabilité alors il existe un observateur de la forme :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) - K(C\hat{x}(t) - y(t)) \quad (4.16)$$

avec  $K$  est déterminé de telle sorte que  $(A - KC)$  soit stable.

**Remarque 4.2** : La vitesse de convergence peut être choisie arbitrairement et dépend des paramètres de la matrice  $K$  [Kwakernaak (1972)].

### 4.5.1.2 Observateur de Kalman pour les systèmes linéaires variant dans le temps (LTV)

Considérons un système LTV de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) \\ y(t) = C(t)x(t) \end{cases} \quad (4.17)$$

où  $A(t)$  et  $C(t)$  sont uniformément bornées.

Pour ces systèmes nous avons le résultat suivant [Kalman (1961) ; Bornard *et al.* (1988) ; Gautier et Kupka (1997)] ; la synthèse de cet observateur suppose que les entrées sont régulièrement persistantes.

**Théorème 4.3 :** *Si le système (4.17) est uniformément observable alors il existe un observateur de la forme suivante :*

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(t)\hat{x}(t) + B(t)u(t) - K(t)(C(t)\hat{x}(t) - y(t)) \quad (4.18)$$

où  $K(t)$  est donné par :

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = A(t)M(t) + M(t)A^T(t) - M(t)C^T(t)W^{-1}C(t)M(t) + V + \delta M(t) \\ M(0) = M_0 = M_0^T > 0 \\ W = W^T > 0 \\ K(t) = M(t)C^T(t)W^{-1} \end{cases} \quad (4.19)$$

avec soit  $\delta > 2\|A(t)\|$  pour tout  $t$ , où  $V = V^T > 0$ .

**Remarque 4.3 :** La vitesse de convergence est réglée par l'intermédiaire du paramètre  $\delta$  ou de la matrice  $V$ .

Une extension peut être faite pour un système *non linéaire* basée sur l'approximation du premier ordre suivant les trajectoires estimées, plus connue sous le vocable de *Filtre de Kalman Étendu* [Gelb (1992)].

### 4.5.1.3 Filtre de Kalman Étendu (EKF)

Soit un système de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (4.20)$$

le filtre de Kalman étendu correspondant est donné par :

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), u(t)) - K(t)(h(\hat{x}(t)) - y(t)) \quad (4.21)$$

où  $K(t)$  est déterminé comme pour l'observateur de Kalman pour le système (4.19) avec :

$$A(t) := \frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}(t), u(t)), \quad C(t) := \frac{\partial h}{\partial x}(\hat{x}(t)).$$

En général la convergence du filtre de Kalman étendu n'est pas garantie. Ce dernier point nous conduit donc à étudier des structures non linéaires plus spécifiques.

## 4.5.2 Observateurs pour un système non linéaire

Quelques observateurs vont être présentés pour des classes spécifiques de systèmes non linéaires en faisant une extension des observateurs de Luenberger et de Kalman présentés dans le cas des systèmes linéaires.

### 4.5.2.1 Observateurs basés sur l'approche de Luenberger

Nous considérons la classe des systèmes dont l'observabilité ne dépend pas de l'entrée, c'est-à-dire des systèmes uniformément observables.

#### Non linéarités additives sur la sortie

Considérons dans ce cas un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + \rho(Cx, u) \\ y = Cx \end{cases} \quad (4.22)$$

Ici, le non linéarité peut être construite à partir des mesures et elle peut donc être prise en compte dans la structure de l'observateur.

**Théorème 4.4 :** *Si la paire  $(A, C)$  est observable, le système (4.22) admet un observateur de la forme :*

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \rho(y, u) - K(C\hat{x} - y) \quad (4.23)$$

où  $K$  est déterminé de telle sorte que  $(A - KC)$  soit stable.

**Remarque 4.4 :** Dans ce cas, il est clair que l'erreur d'observation est linéaire, alors le taux de convergence peut être réglé arbitrairement par un choix approprié de la matrice  $K$  [Krener et Isidori (1983)], comme dans le cas des systèmes linéaires.

#### Non linéarités additives triangulaires

Considérons un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_0 x + \rho(x, u) \\ y = C_0 x \end{cases} \quad (4.24)$$

avec  $A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \\ 0 & & & 0 \end{pmatrix}$  et  $C_0 = (1 \ 0 \ \dots \ 0)$ .

En utilisant l'observabilité uniforme nous pouvons assurer que la dynamique linéaire de l'erreur d'observation domine celle non linéaire.

**Théorème 4.5 :** *Si  $\rho$  est globalement Lipschitzienne par rapport à  $x$ , uniforme par rapport à  $u$  et tel que :*

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial x_j}(x, u) = 0 \text{ pour } j \geq i + 1, \quad 1 \leq i, j \leq n$$

alors le système (4.24) admet un observateur de la forme [Bornard et al. (1995)] :

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + \rho(\hat{x}, u) - \begin{pmatrix} \lambda & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda^n \end{pmatrix} K_0 (C_0 \hat{x} - y) \quad (4.25)$$

avec  $K_0$  est déterminé de telle manière que  $(A_0 - K_0 C_0)$  soit stable, et  $\lambda$  assez grand.

**Remarque 4.5 :**

- Ce type d'observateur est connu sous le nom d'*observateur à grand gain* parce qu'il dépend du choix d'une valeur réglable du paramètre  $\lambda$  suffisamment grande.
- Plus la valeur de  $\lambda$  est grande, plus rapide est la convergence.
- Cet observateur peut être étendu aux systèmes de la forme [Gautier et Kupka (1997) et Deza *et al.* (1993)] :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = C_0 x(t) \end{cases}$$

où  $\frac{\partial f_i}{\partial x_j} = 0$  pour  $j > i + 1$  et  $\frac{\partial f_i}{\partial x_{i+1}} \geq \alpha_i > 0$  pour tout  $x, u$ .

- L'observateur peut être étendu également aux systèmes uniformément observables multi-sorties [Bornard et Hammouri (2002)].

**4.5.2.2 Observateurs basés sur l'approche de Kalman**

Quand l'observabilité dépend de l'entrée du système (systèmes qui ne sont pas uniformément observables), l'étude d'un observateur sera limitée à quelques classes d'entrée particulières.

Système affine en l'état

Nous considérons ici un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(u(t))x(t) + B(u(t)) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (4.26)$$

avec  $A(u(t))$  uniformément bornée.

Dans ce cas, en imposant la fonction d'entrée il est possible d'obtenir un système LTV.

**Théorème 4.6 :** *Si  $u$  est régulièrement persistante pour (4.26) alors le système admet un observateur de la forme [Bornard et al. (1995)] :*

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(u(t))\hat{x}(t) + B(u(t)) - K(t)(C\hat{x}(t) - y(t)) \quad (4.27)$$

où  $K(t)$  est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = M(t)A^T(u(t)) + A(u(t))M(t) - M(t)C^T W^{-1}CM(t) + V + \delta M(t) \\ M(0) = M^T(0) > 0 \\ W = W^T > 0 \\ K(t) = M(t)C^T W^{-1} \end{cases} \quad (4.28)$$

avec  $\delta > 2\|A(u(t))\|$  ou  $V = V^T > 0$  comme pour les systèmes LTV.

**Remarque 4.6 :** La vitesse de convergence peut être réglée par un choix approprié de  $\delta$  ou de  $V$ .

#### Système affine en l'état et non linéarité additive triangulaire

En considérant les structures (4.24) et (4.26), nous obtenons un système de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_0(u, y)x + \rho(x, u) \\ y = C_0 x \end{cases} \quad (4.29)$$

avec  $A_0(u, y) = \begin{pmatrix} 0 & a_{12}(u, y) & & 0 \\ & & \ddots & \\ & & & a_{n-1n}(u, y) \\ 0 & & & 0 \end{pmatrix}$  bornée et  $C_0 = (1 \ 0 \ \dots \ 0)$ .

Dans ce cas, nous allons choisir un observateur à grand gain, mais pour un système uniformément observable.

**Théorème 4.7 :** Si  $\rho$  est globalement Lipschitzienne par rapport à  $x$ , uniforme par rapport à  $u$  et tel que :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial x_j}(x, u) = 0 \text{ pour } j \geq i + 1, \quad 1 \leq i, j \leq n$$

et  $u$  est localement régulier alors nous pouvons créer un observateur de la forme :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_0(u, y)\hat{x} + \rho(\hat{x}, u) - \begin{pmatrix} \lambda & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda^n \end{pmatrix} K_0(t)(C_0\hat{x} - y) \quad (4.30)$$

où  $K_0(t)$  est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = \lambda(M(t)A^T(u(t), y(t)) + A(u(t), y(t))M(t) - M(t)C^T W^{-1}CM(t) + V + \delta M(t)) \\ M(0) = M^T(0) > 0 \\ W = W^T > 0 \\ K_0(t) = M(t)C^T W^{-1} \end{cases} \quad (4.31)$$

avec  $\delta > 2\|A(u(t), y(t))\|$  et  $\lambda = \frac{1}{T}$  assez grande.

## 4.6 Observateurs adaptatifs

Quand les paramètres du système changent au cours du temps ou s'ils sont inconnus, les observateurs simples ne peuvent pas être utilisés pour l'estimation d'état. Les observateurs appropriés dans ce cas sont les observateurs adaptatifs [Sastry et Bodson (1989) ; Zang (1999) ; et Marino et Tomei (1992)]. Un observateur adaptatif est un observateur qui estime simultanément l'état et les paramètres d'un système.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{f}(\hat{\theta}, \hat{x}, u, y, H) \\ \dot{\hat{\theta}} = \hat{l}(\hat{\theta}, \hat{x}, u, y, P) \end{cases} \quad (4.32)$$

Où  $\hat{\theta}$  est l'estimée de  $\theta$ ,  $\hat{f}$  et  $\hat{l}$  sont deux fonctions non linéaires à concevoir et  $H$  et  $P$  sont les matrices des gains d'ajustement.

Pour les besoins de l'approche de détection et d'isolation, chaque observateur adaptatif utilisé estime un seul paramètre du système à surveiller, en plus des variables d'état. La figure 4.3, communément appelé «ensemble d'observateurs», illustre le principe de cette méthode où  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T$  est le vecteur des paramètres à surveiller. Nous avons besoin d'autant d'observateurs que de paramètres à surveiller et d'un observateur d'état basé sur les paramètres nominaux  $\theta_0$ .

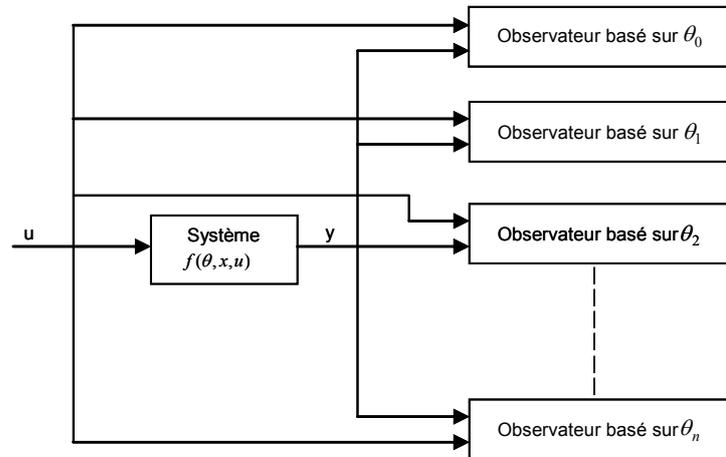


Figure 4.3 : Ensemble des observateurs pour la surveillance de paramètres

Dans ce travail, comme il a été mentionné, nous allons nous focaliser sur les défauts provenant uniquement des actionneurs et des capteurs. Nous allons donc modifier l'approche des observateurs adaptatifs, afin d'observer le vecteur d'entrées  $u$  du système. Sur la figure 4.4 nous avons représenté l'ensemble des observateurs pour l'observation du vecteur d'entrée où  $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]^T$ , l'observateur est donc de la forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{f}(\hat{x}, \hat{u}, y, H) \\ \hat{u} = \hat{l}(\hat{x}, \hat{u}, y, P) \end{cases} \quad (4.33)$$

Où  $\hat{u}$  est l'estimée de  $u$ ,  $\hat{f}$  et  $\hat{l}$  sont deux fonctions non linéaires à concevoir et  $H$  et  $P$  sont les matrices des gains d'ajustement.

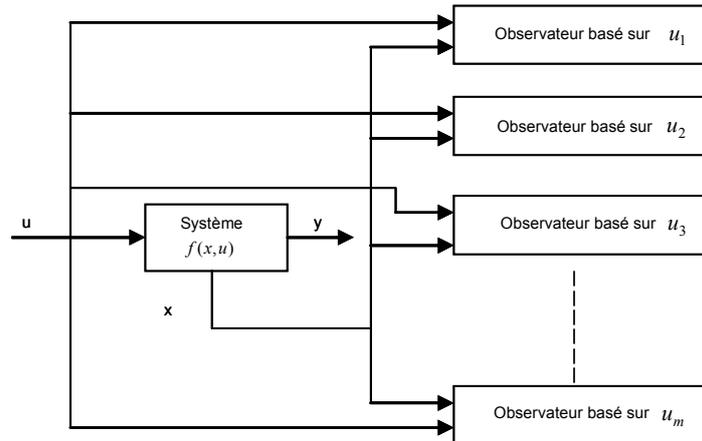


Figure 4.4 : Ensemble des observateurs pour la surveillance du vecteur d'entrée

La création de l'ensemble des observateurs pour l'estimation du vecteur de sorties  $y$  du système suit la même approche, l'observateur est donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{f}(\hat{x}, u, \hat{y}, H) \\ \dot{\hat{u}} = \hat{l}(\hat{x}, u, \hat{y}, P) \end{cases} \quad (4.34)$$

Dans ce contexte, la détectabilité peut être définie comme suit [Rios Bolivar (2001)] :

**Définition 4.13** Une défaillance  $f_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , est dite non détectable si pour  $f_{ai} \neq 0$  la relation

$$y(x_0, x, u, 0) = y(x_0, x, u, f_i) \quad (4.35)$$

est satisfaite ; sinon la défaillance  $f_i$  est dite détectable.

Ainsi, si la défaillance  $f_i$  est détectable, les résidus peuvent être obtenus par la différence entre la sortie du système en défaut  $y(x_0, x, u, f_i)$  et la sortie en absence de défaut  $y(x_0, x, u, 0)$ , ce qui correspond à :

$$r(t) = y(x_0, x, u, f_i) - y(x_0, x, u, 0). \quad (4.36)$$

Par conséquent, un résidu quelconque  $r(t)$  est une fonction temporelle qui est idéalement nulle pour le cas sans défaillance et différente de zéro pour les autres cas. La détectabilité d'un défaut dans le cadre des systèmes non linéaires est fonction tant de la structure du système que de l'entrée de commande. Le défaut peut être également provoqué par des changements des actionneurs ou des capteurs du système. Dans le cas d'un défaut actionneurs le défaut devient  $f_{ai}$  et dans le cas d'un défaut capteurs nous obtenons  $f_{ci}$ .

#### 4.6.1 Observateur de FDI pour une classe de systèmes non linéaires particuliers

Dans ce travail, nous étudions plus particulièrement la classe des systèmes avec entrées affines de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = Cx \end{cases} \quad (4.37)$$

Ceux sont des systèmes dynamiques non linéaires affines en la commande où  $f(x) \in R^n$  est un vecteur constitué d'éléments non linéaires,  $g(x) \in R^{n \times m}$  est une matrice dont les éléments sont non linéaires et linéaires et  $u \in R^m$  est le vecteur de commande du système (les sorties des actionneurs) [Sastry et Bodson (1989)]. La matrice  $g(x)$  peut être reformulée en fonction des vecteurs  $g_j(x)$  (représentant la  $j^{\text{ème}}$  colonne de  $g(x)$ ), cela implique que  $g(x) = [g_1(x) \cdots g_m(x)]$ . C'est une classe de système assez générale pour laquelle les conditions d'existence de l'observateur nécessite que  $g(x)$  soit constituée de colonne de rang plein pour tous les  $x \in \mathfrak{R}^n$ . Le vecteur de sortie est donné par la relation linéaire  $y = Cx$  où  $y \in \mathfrak{R}^p$  et  $C$  est une matrice constituée d'éléments constants. Pour plus de clarté, le système (4.37) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{j=1}^m g_j(x)u_j \\ y = Cx \end{cases} \quad (4.38)$$

Nous supposons que les actionneurs peuvent avoir seulement des défauts additifs abrupts, par exemple pour le  $j^{\text{ème}}$  actionneur en défaut nous avons :  $u_j^f(t) = u_j(t) + f_{aj}$ . La valeur des défauts  $f_{aj}$  sera comprise entre 5% et 10% de la valeur réelle de l'entrée. Donc nous avons  $u_j^f = u_j + f_{aj} = \theta_{aj}$  pour  $t \geq t_f$ ,  $j \in 1, 2, \dots, m$ , et  $\lim_{t \rightarrow \infty} |u_j(t) - \theta_{aj}| \neq 0$ , où  $f_{aj}$  est une constante et  $u_j^f$  est la sortie du  $j^{\text{ème}}$  actionneur en défaut, tandis que  $u_j$  est la sortie lorsque cet actionneur ne présente pas de défaut.

Le modèle défectueux pour les systèmes linéaires proposé par [Blanke *et al* (2001)] est :

$$\dot{x} = Ax + \sum_{j \neq l} b_j u_j + b_l u_l^f \quad (4.39)$$

où  $u_l^f$  correspond au  $l^{\text{ème}}$  actionneur en défaut et  $b_l$  est la colonne correspondant à l'actionneur en défaut. Nous donnons une extension pour la classe de systèmes non linéaires (4.38).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + \sum_{j \neq l} g_j(x) u_j + g_l(x) u_l^f \\ &= f(x) + \sum_{j \neq l} g_j(x) u_j + g_l(x) \theta_{al} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Chen et Saif (2005) proposent un ensemble d'observateurs basés sur la technique adaptative [Wang *et al.* (1997)] où chaque observateur est spécifié pour le défaut d'un actionneur. Ces observateurs sont des observateurs basés aux états, cela suppose que les états du système sont disponibles. La structure de cet observateur en utilisant la présentation (4.33) est donnée par :

$$1 \leq i \leq m \left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}}_i = f(x) + \sum_{j \neq i} g_j(x) u_j + g_i(x) \hat{\theta}_{ai} + H(\hat{x}_i - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{ai} = -2\gamma(\hat{x}_i - x)^T P g_i(x) \\ \hat{y}_i = C \hat{x}_i \end{array} \right. \quad (4.41)$$

Où  $H$  est une matrice de Hurwitz qui peut être choisie de telle sorte que l'observateur ait une dynamique plus rapide que le système,  $\gamma$  est une constante de conception et  $P$  est une matrice définie positive solution de l'équation de Lyapunov suivante :

$$H^T P + PH = -Q \quad (4.42)$$

Où la matrice  $Q$  est aussi une matrice définie positive, qui peut être choisie librement. La matrice  $H$  est la matrice de gain de l'observateur qui assure la stabilité de l'observateur.

**Théorème 4.8 :** *Si le  $l^{\text{ème}}$  actionneur est en défaut et tous les éléments de la matrice  $g(x)$  sont bornés, alors pour  $i = l$  nous avons :*

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}_i = \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{x}_i - x) = \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{x}_l - x) = 0 \quad (4.43)$$

et pour  $i \neq l$ , nous avons :

$$\dot{\tilde{x}}_i = g_i(x)(u_l - \theta_{al}) - g_i(x)(u_i - \hat{\theta}_{al}) + H\tilde{x}_i \quad (4.44)$$

■

**Démonstration :**

Pour  $i = l$ , l'équation (4.38) et la première équation du système (4.41) permettent d'écrire que :

$$\dot{\tilde{x}}_l = g_l(x)\tilde{\theta}_{al} + H\tilde{x}_l. \quad (4.45)$$

Choisissons l'équation de Lyapunov  $V = (\tilde{x}_l)^T P\tilde{x}_l + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}_{al}^2$  dans laquelle  $\tilde{\theta}_{al} = \hat{\theta}_{al} - \theta_{al}$ .

Dérivons cette équation de Lyapunov par rapport au temps  $t$  et utilisons le résultat (4.42) et la seconde équation du système (4.41) :

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -(\tilde{x}_l)^T Q \tilde{x}_l + \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_{al} \dot{\tilde{\theta}}_{al} \\
 &= -(\tilde{x}_l)^T Q \tilde{x}_l - \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}_{al} [\dot{\tilde{\theta}}_{al} + 2\gamma(\tilde{x}_l)^T P g_l(x)]. \quad (4.46) \\
 &= (\tilde{x}_l)^T Q \tilde{x}_l \leq 0
 \end{aligned}$$

La dérivée première de cette équation de Lyapunov est toujours négative ou égale à zéro, en utilisant une technique standard de stabilisation [Isidori (1994)], il est aisé de montrer que  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}_l = 0$

Pour  $i \neq l$ , le modèle en faute (4.35) s'écrit sous la forme :

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{j \neq i, l} g_j(x) u_j + g_i(x) u_i + g_l(x) \theta_{al}. \quad (4.47)$$

Dans ce cas, le  $i^{\text{ème}}$  observateur est donné par le système :

$$\begin{cases}
 \dot{\hat{x}}_i = f(x) + \sum_{j \neq i} g_j(x) u_j + g_i(x) \hat{\theta}_{ai} + H(\hat{x}_i - x) \\
 \dot{\hat{\theta}}_{ai} = -2\gamma(\hat{x}_i - x)^T P g_i(x) \\
 \hat{y}_i = C \hat{x}_i
 \end{cases} \quad (4.48)$$

L'erreur d'observation  $\tilde{x}$  est donnée par :

$$\dot{\tilde{x}}_i = g_l(x)(u_l - \theta_{al}) - g_i(x)(u_i - \hat{\theta}_{ai}). \quad (4.49)$$

Ce qui complète la preuve du théorème. ■

**Théorème 4.9 :** *Si la matrice  $g(x)$  est constituée de colonnes de rang plein pour tout  $x \in \mathfrak{R}^n$ , ce qui signifie que les colonnes  $g_1(x), \dots, g_m(x)$  sont indépendantes, alors le problème de la FDI peut être résolu avec l'évaluation de résidus que nous allons définir à partir de la structure d'observateur (4.41).*

**Démonstration :**

Après l'occurrence du défaut, le Théorème 4.8 nous permet d'affirmer que le résidu qui correspond au modèle en défaut  $r_l(t)$  convergera vers zéro. Nous allons montrer que les autres résidus  $r_i(t)$ , pour  $i \neq l$ , ne convergent jamais vers zéro.

Pour  $i \neq l$ , nous savons que  $g_l(t)$  et  $g_i(t)$  sont indépendantes parce que  $g(x)$  est constituée de colonnes de rang plein. Alors l'expression  $g_l(x)(u_l - \theta_{al}) - g_i(x)(u_i - \hat{\theta}_{ai})$  est non nulle pour tout  $t$  si  $(u_l - \theta_{al}) \neq 0$ . D'après la définition du défaut, nous savons que  $\lim_{t \rightarrow \infty} |u_l - \theta_{al}| \neq 0$  et nous concluons donc que :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [g_l(t)(u_l(t) - \theta_{al}) - g_i(t)(u_i(t) - \hat{\theta}_{ai})] \neq 0 \quad (4.50)$$

pour tout  $i \neq l$ . Cela implique que  $r_i(t)$  ne convergera pas vers zéro pour tout  $i \neq l$ . ■

**Remarque 4.7 :** Il est à noter que le théorème 4.9 présente seulement une condition suffisante pour l'analyse de la FDI. Si  $g(x)$  n'est pas de rang plein, cela ne signifie pas que le défaut ne peut pas être isolé. Cela veut simplement dire que la structure proposée ne pourra pas l'isoler ; pour l'isoler il faudra utiliser d'autres approches.

**Remarque 4.10 :** Nous constatons que cette méthode ressemble à l'observateur de Kalman basé sur l'équation de Lyapunov.

**Remarque 4.11 :** La matrice  $P$ ,  $H$  et la constante  $\gamma$  permettent le réglage de la vitesse de convergence de l'observateur, de la taille du résidu et de la robustesse de l'observateur. (cf. § 4.6.4)

### 4.6.2 Génération et évaluation des résidus

Généralement la méthodologie utilisée dans la littérature est de générer un résidu  $r_i(t)$  qui soit insensible au défaut provenant d'un élément (dans notre cas d'un actionneur ou d'un capteur) et sensible à tous les autres défauts. Cette méthodologie ne nous permet de traiter que des défauts simples, c'est-à-dire les défauts conduisant au changement d'une seule composante du vecteur  $u$  ou  $y$ .

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, il faut générer des résidus associés à l'ensemble des observateurs pour faire la détection et l'isolation de défauts du système. Pour l'évaluation du résidu, nous allons utiliser les résidus structurés et plus spécifiquement une manière booléenne [Gertler (1998)]. Pour ce faire, nous allons déterminer des seuils  $\delta_i$  appropriés pour chaque ensemble et ensuite nous allons construire les *vecteurs de codes de défaut*  $\varepsilon^j(t)$ . Nous rappelons que la forme du code de défaut  $\varepsilon_i(t)$  est constitué des résidus  $r_i(t)$  est s'écrit :

$$a_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } |r_i(t)| \geq \delta_i \\ 0 & \text{if } |r_i(t)| < \delta_i \end{cases} \quad (4.52)$$

$$\varepsilon_j(t) = (a_1(t) a_2(t) \dots a_p(t))^T \quad (4.53)$$

Deux types de seuils vont être utilisés dans ce travail. Le premier est un seuil constant de la forme  $\delta_i = c$  où  $c$  est égal à une constante. Le deuxième type est un seuil adaptatif  $\delta_i = |r_i(t - \tau)| + c$  ; la constante  $\tau$  introduit un retard qui doit être déterminé préalablement selon le cas et  $c$  est une constante comme dans le cas précédent. Alors, comme nous le montrons sur la figure 4.5, la détermination d'un seuil simple peut soit nous donner de fausse détection (seuil  $c$ ) soit de ne pas être capable de détecter l'occurrence d'un défaut (seuil  $b$ ). Par contre, un seuil adaptatif ( $\tau = 5$  par exemple) permet de détecter ce changement sur le résidu assez rapidement.

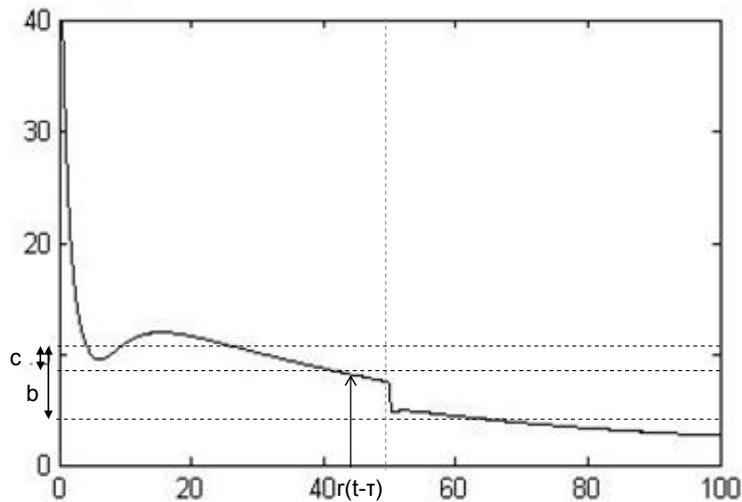


Figure 4.5 : Seuil adaptatif

En utilisant les vecteurs de codes  $\varepsilon^j(t)$ , que nous avons déterminés précédemment, nous formons la matrice de structure  $\Phi$  qui va nous permettre d'évaluer correctement le résidu. Avec l'aide du vecteur de défaut  $f(t) = (f_1(t) f_2(t) \dots f_k(t))^T$ , nous allons isoler le résidu associé à l'élément en défaut :

$$r_s \leftarrow -\Phi f \quad (4.54)$$

Le résidu est de la forme :

$$r_i = R(\hat{y}_i - y), \quad i \in m \quad (4.55)$$

où  $R$  est un opérateur mathématique. Le choix de l'opérateur  $R$  dépend de la méthode utilisée et de ses propriétés. Chen et Saif (2005) utilise comme opérateur la norme 2 de la différence entre le vecteur de sortie estimée et le vecteur de sortie mesurée. Ce choix nous permet de faire l'isolation d'un actionneur en défaut ; en effet, quand nous avons un défaut le résidu de l'actionneur en défaut reste à zéro ou à une valeur très faible, par contre les autres résidus prennent des valeurs plus grandes (figure 4.6).

Dans ce travail, nous avons utilisé deux méthodologies pour la création des résidus pour les défauts dans les actionneurs. La première est celle que nous avons présenté précédemment où un observateur est insensible au défaut provenant d'un composant et sensible aux défauts provenant de tous les autres. La deuxième méthodologie utilise la propriété inverse, c'est-à-dire qu'un observateur est sensible au défaut provenant d'un composant et insensible aux défauts provenant de tous les autres. La première méthodologie s'applique au cas de défauts simple ; nous utilisons comme opérateur  $R$  du résidu la norme 2 de la différence entre la sortie estimée et la sortie mesurée :

$$r_i(t) = \|\hat{y}_i - y\| \quad i = 1, \dots, m \quad (4.56)$$

La *matrice de structure*  $\Phi$  pour l'évaluation du défaut est donnée par :

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.57)$$

Avec l'aide du vecteur de défauts, nous obtenons le résidu structuré suivant :

$$r_s = \begin{pmatrix} r_{s1} \\ r_{s2} \\ \vdots \\ r_{si} \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_i \end{pmatrix} \quad (4.58)$$

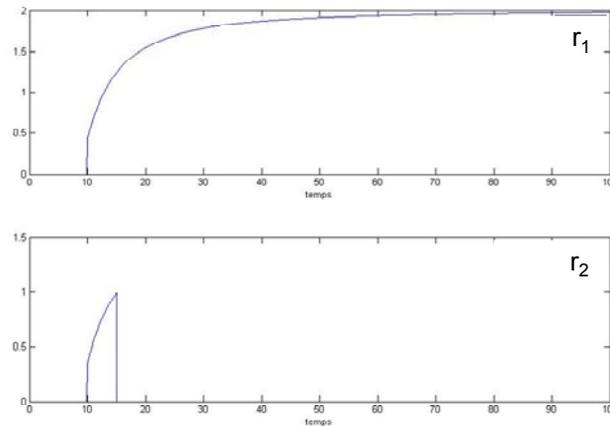


Figure 4.6 : Norme 2 des résidus

La deuxième méthodologie nous permet de traiter non seulement de défauts simples mais aussi de défauts multiples. La capacité d'isoler les défauts multiples est une condition importante mais difficile ; c'est un problème difficile dû à la nature des interactions de la plupart des défauts. Dans un système non linéaire général, les interactions sont habituellement synergiques et par conséquent un système de diagnostic peut ne pas être capable d'utiliser les différents modèles de chaque défaut pour modéliser l'effet combiné des défauts (Venkatasubramanian *et al.* (2003)).

Pour avoir la propriété de réinitialisation du résidu de l'observateur (cf. figure 4.7), ce qui permettra de traiter aussi les défauts multiples dans les actionneurs, l'opérateur  $R$  est choisi comme étant la dérivée de la norme 2 de la différence entre le vecteur de sorties estimées et le vecteur de sorties mesurées :

$$r_i = \frac{d\|\hat{y}_i - y\|}{dt}, \quad i \in m \quad (4.59)$$

Ce résidu est utilisé seulement pour la détection du défaut ; tous les résidus sont sensibles à tous les défauts dans les actionneurs. Néanmoins dans ce cas là, les matrices de gain des observateurs sont choisies de telle façon que le résidu associé à l'actionneur privilégie l'estimation de la taille du défaut.

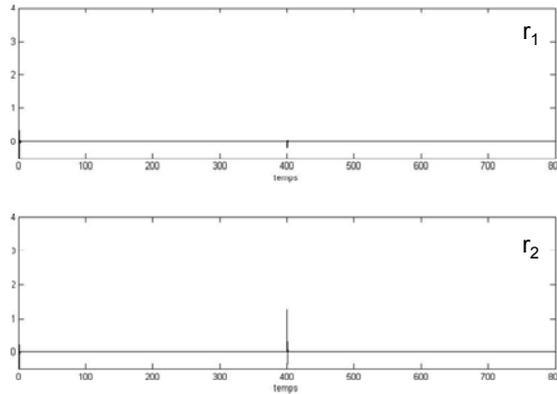


Figure 4.7 : Réinitialisation des résidus

La structuration de ce nouveau résidu suit la même logique que celle de la première méthodologie, mais cette fois le résidu est sensible au défaut d'un actionneur et insensible aux autres. Dans ce cas la matrice de structure  $\Phi$  est donnée par :

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.60)$$

Avec l'aide du vecteur de défauts, nous obtenons le résidu structuré suivant :

$$r_s = \begin{pmatrix} r_{s1} \\ r_{s2} \\ \vdots \\ r_{si} \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_i \end{pmatrix} \quad (4.61)$$

Pour les défauts capteurs nous avons utilisé aussi deux méthodologies pour le calcul du résidu. La première qui traite les défauts simples est identique à celle utilisée pour les défauts simples dans les actionneurs étudiée au paragraphe précédent. Nous utilisons donc les mêmes expressions du résidu (4.56) et de la matrice de structure (4.57). Pour les défauts multiples nous n'avons pas besoin d'utiliser la dérivée du résidu. Nous avons utilisé un résidu assez

simple proposé dans [Kabbaj (2004)] pour les défauts dans les paramètres et nous l'avons modifié pour les défauts dans les capteurs. Le résidu est donné par l'expression :

$$r_i = c_i x - \theta_{ci}, \quad i \in p \quad (4.62)$$

Où  $c_i x$  est la  $i^{\text{ème}}$  sortie du système et  $\theta_{ci}$  est l'estimation donnée par l' $i^{\text{ème}}$  observateur ;  $p$  est le nombre de sorties du système. La structuration du résidu est la même que celle du résidu précédent, la matrice structure  $\Phi$  est donnée par l'expression 4.60.

### 4.6.3 Filtrage des résidus

Le bruit de mesure a pour effet de rendre l'évaluation du résidu plus difficile. Les observateurs utilisés, avec l'opérateur choisi pour les défauts dans les actionneurs et les capteurs simples et pour les défauts au niveau des capteurs multiples, sont assez robustes par rapport au bruit de mesure et comme nous allons le voir les résultats sont assez satisfaisants. Par contre, le résidu de détection des défauts dans le cas des défauts dans les actionneurs multiples est très sensible au bruit à cause de la dérivation du signal. Pour pallier cet inconvénient, nous allons utiliser un nouveau résidu développé dans [Kabbaj *et al.* (2002)], pour des défauts dans les paramètres, le résidu composé. Ces nouveaux résidus composés sont plus robustes au bruit de mesure et ils donnent des résultats très satisfaisants. Nous avons fait une extension du résidu composé pour l'actionneur du système et alors le nouveau résidu sera :

$$r_i = \frac{d\|\hat{y}_i - y - \hat{y}_0\|}{dt}, \quad i \in m \quad (4.63)$$

Où  $\hat{y}_0$  est la sortie d'un observateur qui n'est pas affecté par le défaut provenant des entrées du système. Sur la figure 4.8, nous montrons la différence entre les résidus du type (4.59) et (4.63) en présence du bruit ; sur la première figure nous donnons l'évolution du résidu simple (4.59) et sur la deuxième figure nous donnons celle du résidu composé (4.63). Nous constatons que l'effet du bruit a été réduit.

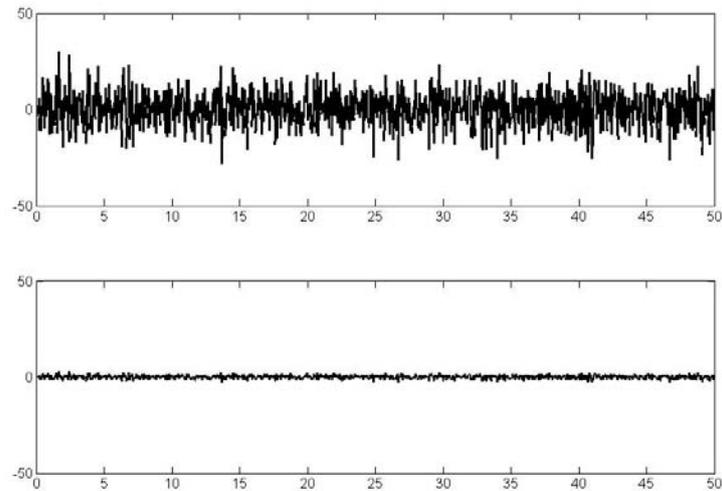


Figure 4.8 : Résidus

#### 4.6.4 Calculs des matrices de gain

L'étape fondamentale pour la réalisation de l'observateur étudié précédemment est le choix des matrices de gain  $P$  et  $H$ . Ce choix dépend des priorités que doit avoir l'observateur, si nous voulons privilégier le temps de convergence de la phase transitoire ou la sensibilité de l'observateur aux perturbations. Dans ce paragraphe, nous allons examiner l'effet de différentes valeurs des matrices de gain  $H$  et  $P$  et de la constante  $\gamma$  sur le résidu associé à l'observateur. Ensuite, nous allons choisir des valeurs "optimales" pour que l'observateur soit assez sensible aux perturbations mais en même temps qu'il converge assez rapidement vers zéro pendant la phase transitoire et après l'occurrence d'une perturbation (dans le cas d'un défaut). Cette analyse sera faite en utilisant le modèle académique présenté au chapitre 3 en considérant l'injection d'un défaut au temps  $t_f = 70$ . Dans les figures suivantes nous montrons la différence entre le vecteur de sortie estimé  $\hat{y}_i$  et le vecteur de sortie mesuré  $y$  que nous nommerons  $e_y$ . Nous gardons une valeur constante pour deux des paramètres et nous examinons les variations du troisième paramètre pour quatre valeurs différentes ; les valeurs nominales sont  $H = -5I_3$ ,  $P = I_3$  et  $\gamma = 3$ .

Sur la figure 4.9, nous présentons l'effet des variations de la matrice de gain  $H$  sur  $e_y$ . Nous constatons que le temps de convergence de la phase transitoire mais aussi le temps de convergence après l'occurrence du défaut pour les valeurs de  $H$  comprises entre  $-I_3$  et  $-15I_3$  est presque le même. Pour  $H = -I_3$  nous constatons que cet écart se stabilise après un régime oscillatoire. Pour les deux autres valeurs la seule différence se situe au niveau de la sensibilité de  $e_y$  vis-à-vis du défaut. En effet, plus la valeur de  $H$  est grande, plus la sensibilité aux défauts est faible. Enfin pour la valeur  $H = -40I_3$  l'erreur  $e_y$  devient moins sensible aux défauts et le temps de convergence est augmenté.

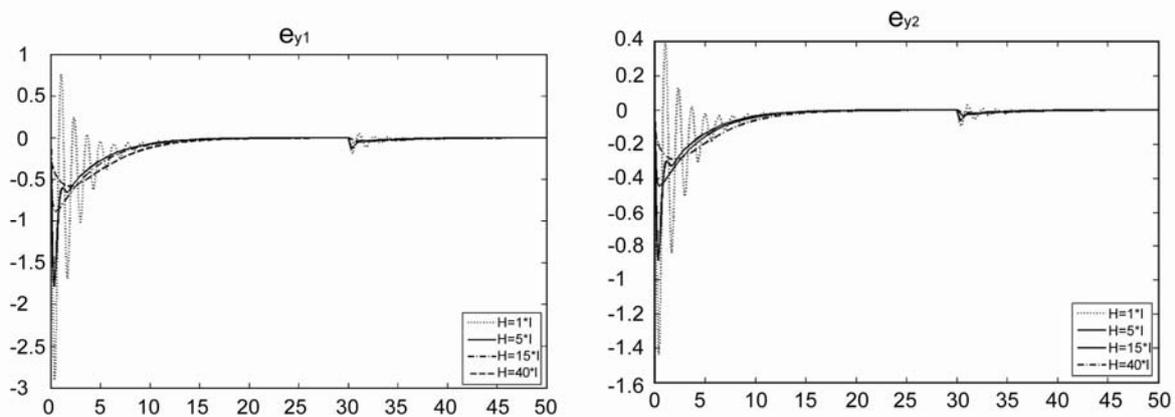
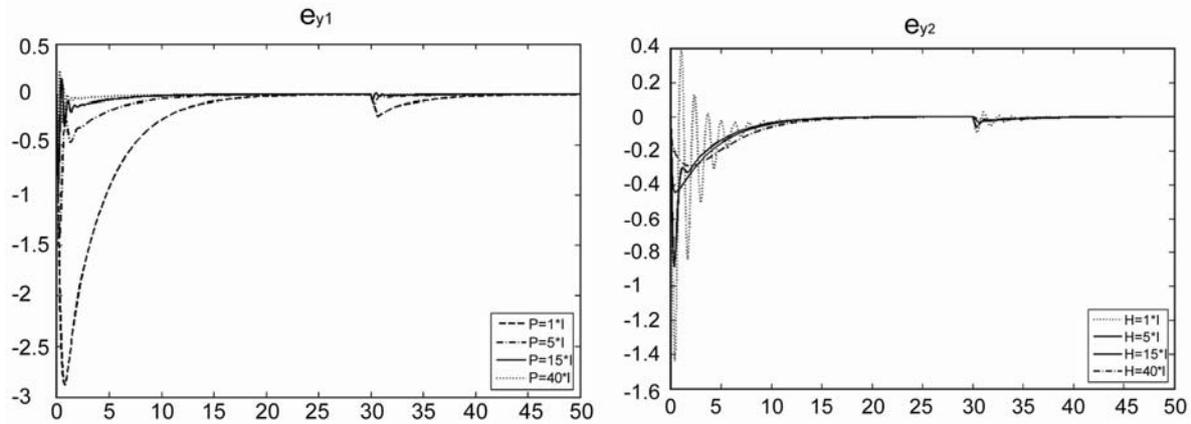
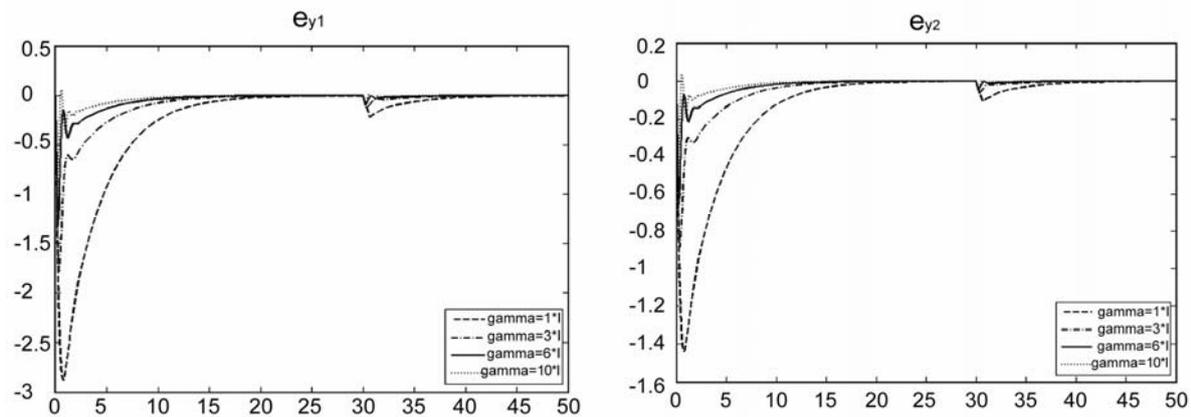


Figure 4.9 : Variation de H à P et  $\gamma$  constants

La figure 4.10 montre l'évolution de l'erreur  $e_y$  pour différentes valeurs de  $P$ . Sur les quatre trajectoires nous constatons que le temps de convergence de la phase transitoire et après l'occurrence du défaut varie. Plus les valeurs de la matrice  $P$  sont grandes plus le temps de convergence est court et la valeur de  $e_y$  au début de la phase transitoire ainsi qu'en présence d'un défaut est petite. Pour la valeur  $P = 40I_3$ , l'erreur  $e_y$  devient presque insensible aux défauts.

Figure 4.10 : Variation de P à H et  $\gamma$  constants

Sur la figure 4.11 nous donnons la variation de l'erreur  $e_y$  pour différentes valeurs de la constante  $\gamma$ . Comme nous pouvons le constater, cette constante affecte la taille de l'erreur  $e_y$  au début de la phase transitoire et à l'instant d'occurrence d'un défaut. Plus la valeur de cette constante est grande, plus la taille de l'erreur  $e_y$  est grande pour ces deux phases. Pour les valeurs  $\gamma = 6$  et  $\gamma = 10$ , l'évolution de l'erreur  $e_y$  devient oscillatoire, il est alors plus difficile d'évaluer sa valeur.

Figure 4.11 : Variation de  $\gamma$  à H et P constants

Finalement, après cette étude en simulation sur cette exemple simple, les valeurs qui donnent le meilleur compromis pour l'observateur sont  $H = -5I_3$ ,  $P = 3,5I_3$  et  $\gamma = 2$ .

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux types d'observateurs qui existent dans la littérature ainsi que les trois grandes catégories : les observateurs déterministes, les observateurs stochastiques et les observateurs adaptatifs. Ensuite, nous avons présenté la classe de systèmes non linéaires que nous allons étudier à savoir un système avec commande affine. Ce qui nous permet de présenter les différentes structures d'observateurs dans le cas linéaire et non linéaire. Par la suite, nous faisons une analyse des observateurs adaptatifs qui sont ceux que nous allons utiliser pour la détection et l'isolation de défauts. Ce chapitre se termine par la présentation de différents types de résidus que nous utilisons afin de traiter les différents types de défauts que nous souhaitons surveiller.

# Chapitre 5 : Détection et isolation de défauts dans les actionneurs

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter le cas où un ou plusieurs défauts apparaissent dans le vecteur d'entrée du système  $u$ , c'est-à-dire un ou plusieurs actionneurs en défaut. Une première méthode à base d'observateurs adaptatifs va être présentée sur un modèle académique et ensuite sur le modèle d'un système de traitement des eaux usées pour la FDI dans le cas de défaut simple. Une nouvelle méthode permettant de traiter le cas des défauts simples et multiples va être développée et appliquée aux deux exemples précédents. Nous terminerons ce chapitre par une comparaison des résultats obtenus.

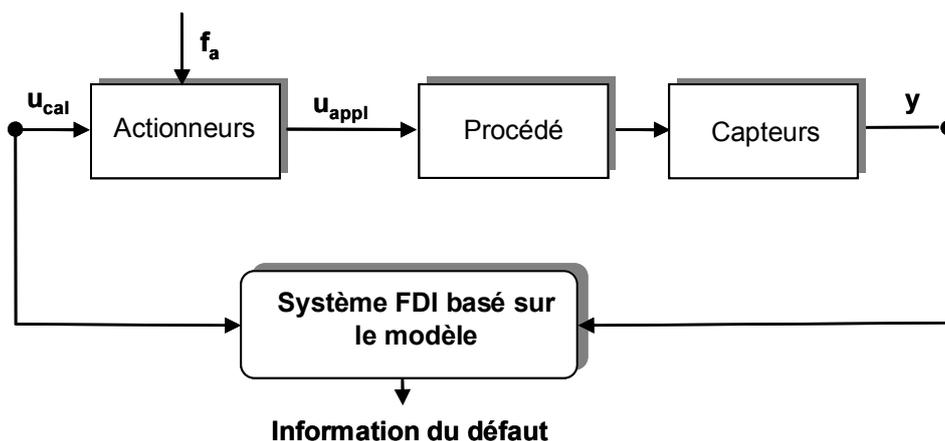


Figure 5.1 : Système de surveillance de défauts pour les actionneurs

Sur la figure 5.1, nous montrons la structure générale d'un système de surveillance de défauts pour les actionneurs. De plus, dans cette figure, nous montrons les divers signaux

appliqués à l'actionneur où  $f_a$  est le défaut,  $u_{cal}$  est l'entrée de l'actionneur (ou la référence du système) et  $u_{appl}$  est la sortie de l'actionneur. A l'aide du signal  $u_{appl}$  les résultats de la FDI seront beaucoup plus satisfaisants parce que ce signal contient explicitement le défaut. Mais pour disposer de ce signal, il faut augmenter la redondance du système. Malheureusement dans la plupart des cas nous disposons seulement du signal  $u_{cal}$  ou plus simplement le signal  $u$ . Pour le développement de l'algorithme de FDI nous supposons que nous disposons de ce seul signal  $u$ .

## 5.1 Méthode à base d'observateurs adaptatifs pour défauts simples

Avant de développer des méthodes utilisées, nous allons examiner l'effet d'un défaut simple dans un actionneur sur les sorties du système. Les systèmes que nous examinons sont des systèmes en boucle fermée et sont beaucoup plus sensibles à la propagation des défauts. Nous décrivons le cas d'un défaut simple dans un actionneur, le tableau 5.1 est constitué de trois colonnes : la première décrit l'actionneur en défaut et les deux autres donnent les valeurs de chacune des sorties du système. La deuxième ligne synthétise les valeurs des sorties après la stabilisation de l'observateur dans le cas sans défaut. Les deux lignes suivantes donnent les valeurs de toutes les sorties après la stabilisation du défaut. Les valeurs des défauts que nous avons introduites dans les deux actionneurs sont respectivement  $f_{a1} = 0,4$  et  $f_{a2} = 0,2$ . Nous constatons que les défauts dans les actionneurs affectent les deux sorties du système.

Tableau 5.1: Effet du défaut actionneur (système académique)

	$y_1$	$y_2$
Sans défaut	4,2	2,2
Défaut $f_{a1}$ sur $u_1$	4	2,6
Défaut $f_{a2}$ sur $u_2$	4,5	2,5

Le tableau 5.2 synthétise les résultats pour le système de traitement des eaux usées, il a la même structure que le tableau précédent sauf que cette fois nous avons quatre entrées et six sorties. Les valeurs des défauts que nous avons introduites dans les quatre actionneurs sont

respectivement  $f_{a1} = 200$ ,  $f_{a2} = 4$ ,  $f_{a3} = 60$  et  $f_{a4} = 45$ . Dans ce tableau nous constatons que toutes les sorties du système sont affectées par un défaut sur l'entrée, à l'exception de la première sortie  $S_I$ . L'impact du défaut du premier actionneur sur les sorties est beaucoup plus important que celui dû aux autres actionneurs.

Tableau 5.2: Effet du défaut actionneur (système de traitement des eaux usées)

	$S_I$ (mg/l)	$S_S$ (mg/l)	$X_I$ (mg/l)	$X_S$ (mg/l)	$X_H$ (mg/l)	$S_O$ (mg/l)
Sans défaut	30	124	52,5	127,5	29	9,7
Défaut $f_{a1}$ sur $Q_{in}$	30	122,5	54,5	132	30	9,6
Défaut $f_{a2}$ sur $Q_L$	30	124	52,5	127,5	29	10,5
Défaut $f_{a3}$ sur $Q_r$	30	123,5	52	127	28,5	9,5
Défaut $f_{a4}$ sur $Q_w$	30	123	52	126,5	28,4	9,6

### 5.1.1 Présentation de la méthode

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 4, la classe de systèmes non linéaires que nous allons considérer est :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) + g(x)u(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (5.1)$$

Nous traitons seulement des défauts  $f_{aj}$  abrupts, c'est-à-dire  $u_j^f = u_j + f_{aj} = \theta_{aj}$  pour  $t \geq t_f$ ,  $j \in 1, 2, \dots, m$ , et  $\lim_{t \rightarrow \infty} |u_j(t) - \theta_{aj}| \neq 0$ , où  $f_{aj}$  est une constante et  $u_j^f$  est la sortie du  $j^{\text{ème}}$  actionneur en défaut, tandis que  $u_j(t)$  est la sortie lorsque cet actionneur ne présente pas de défaut. En présence d'un défaut  $f_{al}$  sur l'entrée  $l$ , le système devient :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{j \neq l} g_j(x)u_j + g_l(x)u_l^f \\ y = Cx \end{cases} \quad (5.2)$$

Nous allons construire un ensemble d'observateurs adaptatifs dont la structure a été présentée au chapitre précédent. Le nombre d'observateurs doit être le même que le nombre

d'actionneurs  $m$  à surveiller. Nous supposons que  $m = 4$ , donc le modèle en défaut pour le premier actionneur s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_2(x)u_2 + g_3(x)u_3 + g_4(x)u_4 + g_1(x)u_1^f \\ y = Cx \end{cases} \quad (5.3)$$

Où  $g_1(x)$ ,  $g_2(x)$ ,  $g_3(x)$  et  $g_4(x)$  sont les quatre colonnes de la matrice  $g(x)$ . La forme générale de l'observateur pour la détection et l'isolation de défaut est :

$$1 \leq i \leq 4 \begin{cases} \dot{\hat{x}}_i = f(x) + \sum_{j \neq i} g_j(x)u_j + g_i(x)\hat{\theta}_{ai} + H_i(\hat{x}_i - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{ai} = -2\gamma(\hat{x}_i - x)^T P_i g_i(x) \\ \hat{y}_i = C\hat{x}_i \end{cases} \quad (5.4)$$

et alors l'observateur correspondant pour surveiller le premier actionneur est donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = f(x) + g_2(x)u_2 + g_3(x)u_3 + g_4(x)u_4 + g_1(x)\hat{\theta}_{a1} + H_1(\hat{x}_1 - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{a1} = -2\gamma(\hat{x}_1 - x)^T P_1 g_1(x) \\ \hat{y}_1 = C\hat{x}_1 \end{cases} \quad (5.5)$$

Où  $\hat{x}_1$  est le vecteur d'état estimé et  $\hat{\theta}_{a1}$  est l'estimation de l'actionneur en défaut  $u_1^f$  pour le premier observateur. Les trois autres observateurs pour la surveillance des actionneurs 2,3 et 4 ont la même forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = f(x) + g_1(x)u_1 + g_3(x)u_3 + g_4(x)u_4 + g_2(x)\hat{\theta}_{a2} + H_2(\hat{x}_2 - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{a2} = -2\gamma(\hat{x}_2 - x)^T P_2 g_2(x) \\ \hat{y}_2 = C\hat{x}_2 \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_3 = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 + g_4(x)u_4 + g_3(x)\hat{\theta}_{a3} + H_3(\hat{x}_3 - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{a3} = -2\gamma(\hat{x}_3 - x)^T P_3 g_3(x) \\ \hat{y}_3 = C\hat{x}_3 \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_4 = f(x) + g_1(x)u_1 + g_2(x)u_2 + g_3(x)u_3 + g_4(x)\hat{\theta}_{a4} + H_4(\hat{x}_4 - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{a4} = -2\gamma(\hat{x}_4 - x)^T P_4 g_4(x) \\ \hat{y}_4 = C\hat{x}_4 \end{cases} \quad (5.8)$$

En suivant l'analyse faite au chapitre 4, nous choisissons d'utiliser comme opérateur  $R$  pour le résidu la norme 2 de la différence entre le vecteur de la sortie estimée et le vecteur de la sortie mesurée, donc  $r_i(t) = \|\hat{y}_i - y\|$ . Ces résidus sont construits de telle façon qu'ils soient insensibles au défaut provenant d'un actionneur et sensibles aux défauts des autres actionneurs. Alors, en absence de défauts tous les résidus tendent vers zéro, pratiquement nous pouvons considérer qu'ils sont nuls après la phase d'initialisation des observateurs. Si au moins un résidu quitte zéro nous avons détecté la présence d'un défaut. Ensuite tous les résidus éventuellement quittent zéro et celui qui revient à zéro correspond à l'actionneur en défaut.

### 5.1.2 Application au modèle non linéaire académique

Nous allons appliquer la méthode développée précédemment au modèle du système non linéaire académique que nous avons décrit au chapitre 3. Pour cela, il suffit de créer un ensemble d'observateurs similaire à celui décrit à la section 5.1. Nous choisissons comme valeurs des paramètres  $\gamma = 1$ , les matrices  $P$  et  $H$  sont déterminées par l'équation 4.39 et nous obtenons  $P = 1 * I_3$  et  $H = -5 * I_3$ . Les valeurs initiales du vecteur d'état du système

sont  $x(0) = [0.3 \ 0.3 \ 0.3]^T$  et nous choisissons  $u = \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix}$ .

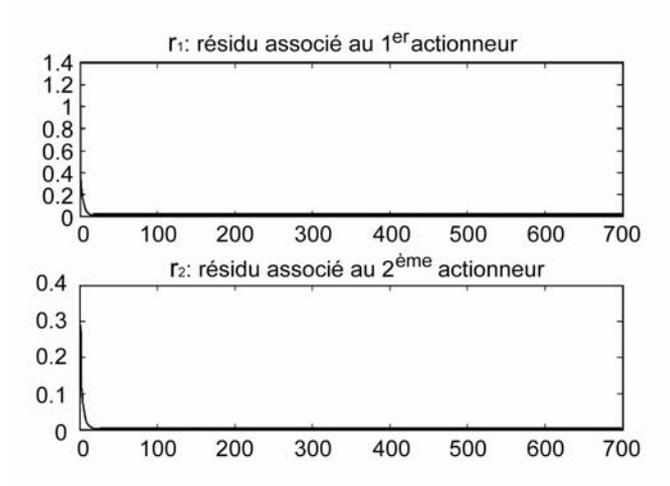


Figure 5.2 : Résidus sans défaut

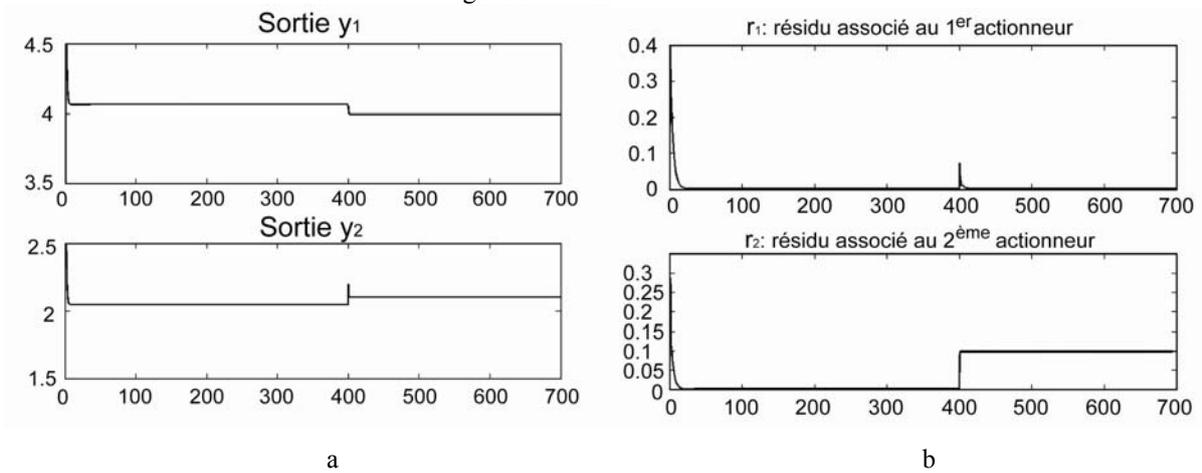


Figure 5.3 : Défaut simple

Les deux résidus  $r_1$  et  $r_2$ , associés aux observateurs, sont donnés sur la figure 5.2. Comme dans ce cas il n'y a pas de défaut sur le système, ils demeurent à zéro après une courte phase transitoire. Nous constatons que le temps de cette phase transitoire des deux observateurs est très court, ce qui est un point positif car la surveillance peut débuter après cette phase transitoire.

Nous introduisons un défaut simple  $f_{a1}$  au temps  $t_f = 400$  sur le premier actionneur et nous constatons les résultats sur les sorties du système et sur les résidus associés à l'ensemble des observateurs (figure 5.3). Sur la figure 5.3a, on peut noter que les deux sorties du système  $y_1$  et  $y_2$  ont une valeur constante jusqu'au temps  $t_f = 400$ . Après cet instant, la valeur de la

sortie change vers une autre valeur constante à cause du défaut qui est appliqué sur l'entrée du système (tableau 5.1). La figure 5.3b représente les deux résidus  $r_1$  et  $r_2$  associés aux observateurs, nous constatons que les deux restent à zéro jusqu'au temps  $t_f = 400$ . Ensuite le premier résidu prend une valeur assez grande pendant une période de temps courte et revient à zéro. Cette période permet de déterminer le temps d'isolation du défaut. Le deuxième résidu se stabilise à une nouvelle valeur, pendant toute la durée de la simulation.

### 5.1.3 Application au modèle de traitement des eaux usées

Nous présentons les résultats obtenus à partir de l'application de l'observateur développé. Nous visualiserons les sorties du procédé, les quatre résidus associés aux quatre observateurs et l'estimation du défaut. Dans un premier temps, nous donnerons les résultats sans défaut dans les actionneurs. Les valeurs pour les matrices  $H_i$  et  $P_i$  et pour la constante  $\gamma$  des observateurs seront précisées. Ensuite, nous illustrerons le cas d'un défaut simple et finalement nous montrerons les résultats d'un défaut simple en présence de bruit. Nous terminons ce paragraphe en expliquant pourquoi la méthodologie proposée ne nous permet pas de traiter de défauts multiples ou simultanés dans les actionneurs.

#### 5.1.3.1 Absence de défaut

Sur la figure 5.4, nous présentons les quatre résidus associés à l'ensemble des observateurs. Nous constatons que les valeurs initiales des résidus ne sont pas égales à zéro et elles ont besoin d'un certain temps pour atteindre leurs valeurs constantes. Comme nous l'avons montré au chapitre 4, le temps nécessaire dépend des deux matrices  $H_i$  et  $P_i$ , plus précisément la durée de convergence dépend principalement de la matrice  $P_i$ , l'amplitude des oscillations du résidu et la sensibilité du résidu aux défauts est conditionnée par la matrice  $H_i$ . La taille du résidu dépend de la constante  $\gamma$ . Ainsi, nous devons calculer séparément ces trois valeurs des facteurs, pour chaque observateur, elles sont présentées dans le tableau 5.3.

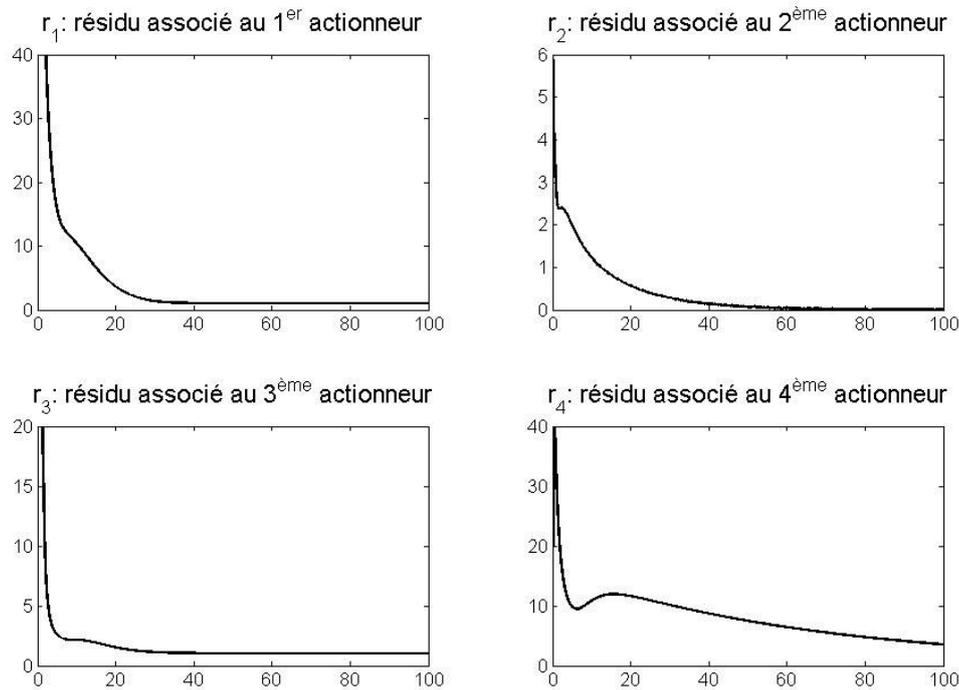


Figure 5.4 : Résidus des observateurs (cas sans défaut)

 Tableau 5.3: Valeurs de  $H_i$ ,  $P_i$  et  $\gamma$ 

	Obs.1	Obs.2	Obs.3	Obs.4
$H_i$	$-4I_9$	$-4I_9$	$-4I_9$	$-6I_9$
$P_i$	$25/3I_9$	$5/3I_9$	$5/3I_9$	$5/6I_9$
$\gamma$	2	2	2	2

En comparant la phase transitoire de l'ensemble des observateurs pour le système académique (figure 5.2) et pour le système de traitement des eaux usées (figure 5.4), nous constatons que le deuxième système a besoin d'une phase transitoire beaucoup plus longue. Ce qui provoque cette grande différence, c'est la dynamique du système et la valeur de la matrice  $P_i$  que nous avons choisie. Il faut déterminer une valeur pour laquelle l'observateur converge assez rapidement mais en même temps vérifier que l'oscillation du résidu ne soit pas trop grande. Le résidu du quatrième observateur converge plus lentement vers une valeur constante, mais malgré cela nous pouvons toujours détecter un défaut. Après la phase transitoire, nous pouvons constater que tous les résidus restent à une valeur constante, ce qui veut dire que notre système fonctionne correctement sans défaut.

Nous déterminons les quatre seuils  $\delta_i$  et la *matrice de structure*  $\Phi$  du résidu pour  $i=1,\dots,4$ . Le calcul de  $\delta_i$  sera fait séparément pour chaque résidu ; alors pour les trois premiers résidus qui demeurent à des valeurs proches de zéro et qui s’y stabilisent, nous pouvons utiliser un seuil simple. Par contre le quatrième résidu converge très lentement, il est donc plus pertinent d’utiliser un seuil adaptatif. En présence de bruit de mesure, les résultats obtenus avec des seuils simples ne sont pas satisfaisants, nous allons donc utiliser pour les quatre seuils, des seuils adaptatifs de la forme :

$$\begin{aligned}\delta_1 &= |r_1(t - \tau)| + 1 \\ \delta_2 &= |r_2(t - \tau)| + 1 \\ \delta_3 &= |r_3(t - \tau)| + 0,5 \\ \delta_4 &= |r_4(t - \tau)| + 0,5\end{aligned}\tag{5.9}$$

Le choix  $\tau = 4$  permet d’obtenir de résultats convenables comme nous l’avons décrit à la fin du chapitre 4. La *matrice de structure* a été définie au chapitre 3, ce qui permet d’obtenir la relation :

$$r_s = \begin{pmatrix} r_{s1} \\ r_{s2} \\ r_{s3} \\ r_{s4} \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{a1} \\ f_{a2} \\ f_{a3} \\ f_{a4} \end{pmatrix}\tag{5.10}$$

### 5.1.3.2 Défauts simples

Nous avons introduit un défaut  $f_{a1} = 200$  au temps  $t_f = 50$  jours sur le premier actionneur  $Q_{in}$ . La figure 5.5, matérialise l’effet du défaut sur les six sorties du système. Comme nous pouvons le constater l’effet du défaut n’est pas le même sur toutes les sorties, mais il provoque un changement sur la dynamique de notre système. Ce changement est beaucoup plus clair sur les sorties  $X_I$  et  $X_S$  que sur les autres sorties du système, mais il faut tenir compte du fait que la valeur du défaut est très petite ( $f_{a1} = 200$ ) par rapport à la valeur

de l'actionneur en défaut ( $Q_{in} \approx 2500$ ). Bien sur, un plus grand défaut va provoquer une plus grande perturbation du système.

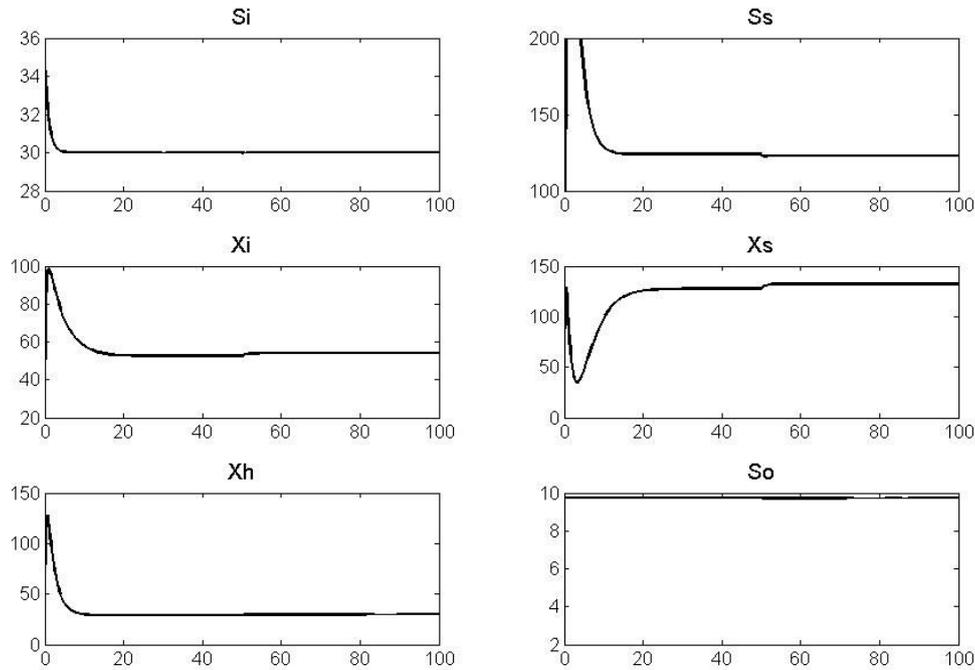


Figure 5.5 : Sorties du système (défaut simple)

Au temps  $t_f = 50$  jours nous notons que les résidus (figure 5.6) de tous les observateurs quittent leurs valeurs constantes. Après une période de temps, le résidu du premier observateur, qui correspond à l'entrée  $Q_{in}$ , revient à sa valeur initiale. Par contre, nous observons deux situations possibles pour les trois autres résidus, soit ils se stabilisent à des nouvelles valeurs, comme les résidus  $r_2$  et  $r_3$  associées aux deuxième et troisième actionneurs (correspondant aux entrées  $Q_L$  et  $Q_r$ ); soit ils convergent vers une nouvelle valeur, comme le résidu  $r_4$  associé au quatrième actionneur (correspondant à l'entrée  $Q_w$ ). Alors la ligne de la *matrice de structure* correspondante est la première ligne. Par conséquent, nous avons isolé l'actionneur en défaut correctement et assez rapidement. Dans ce cas, le temps d'isolation est  $t_{iso} = 8$  jours, parce que le défaut apparaît à  $t_f = 50$  jours est nous l'avons isolé à  $t_I = 58$  jours.

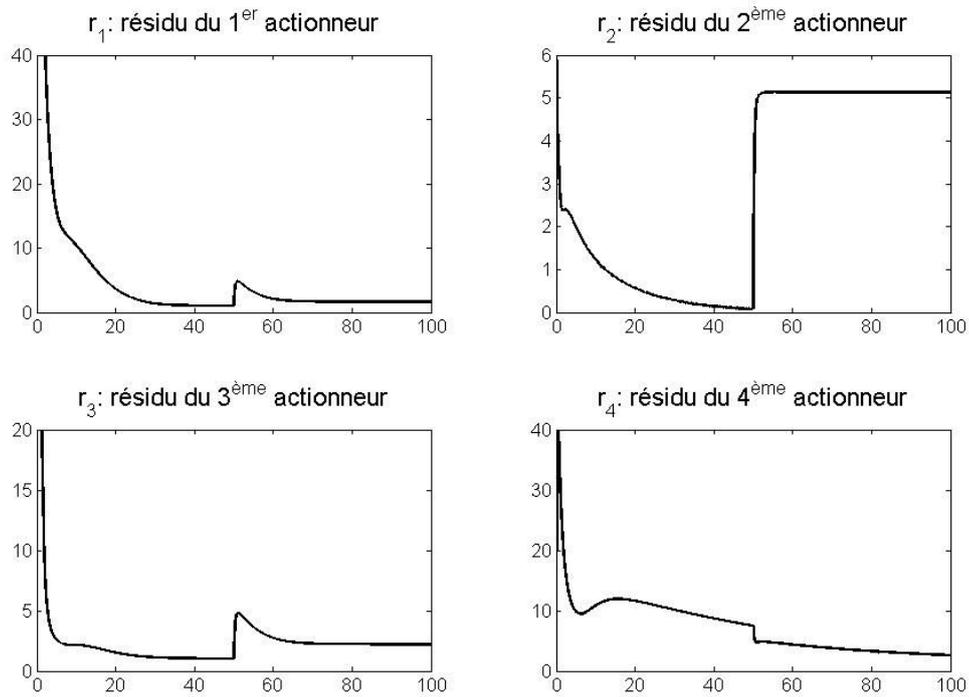


Figure 5.6 : Résidus des observateurs (défaut simple)

Cette méthode nous permet d'identifier la taille du défaut. La valeur d'estimation du défaut est très utile pour la commande tolérante aux fautes, en effet plus cette valeur sera précise, meilleurs seront les résultats obtenu après la reconfiguration de la loi de commande [Li *et al.* (2003)].

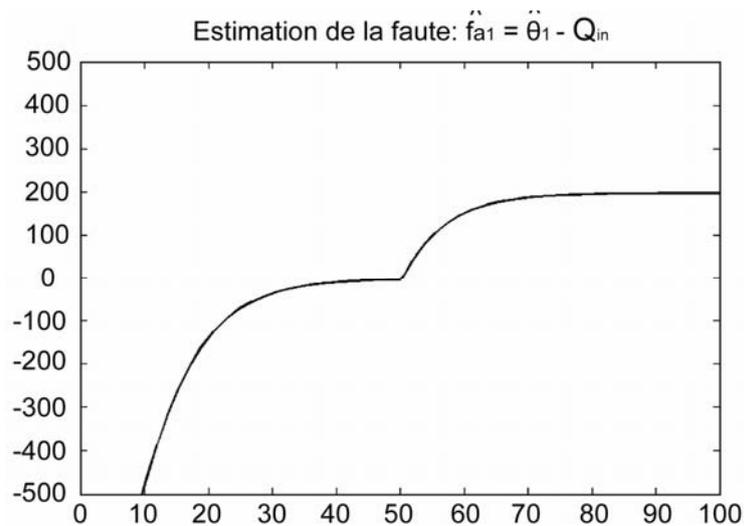


Figure 5.7 : Estimation du défaut

La figure 5.7 représente la différence entre l'entrée du premier actionneur (l'entrée  $Q_{in}$ ) et l'estimation  $\hat{\theta}_{a1}$  de l'actionneur en défaut associé au premier observateur. Donc après le temps  $t_f = 50$  jours, où le défaut a été introduit, il quitte zéro et au temps  $t = 65$  jours il se stabilise à la valeur 205 qui est l'estimation du défaut  $\hat{f}_{a1}$ . La valeur de l'estimation du défaut est très proche de sa vraie valeur  $f_{a1} = 200$ , nous pouvons considérer que l'identification de la taille du défaut est correcte.

Tableau 5.4: Défaut simple pour chaque actionneur

actionneur	Défaut		Détection	Isolation	Identification
	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_a$ ) (l/h)	instant ( $t_D$ ) (jours)	instant ( $t_I$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_a$ ) (l/h)
$Q_{in}$	50	200	50,3	58	205
$Q_L$	45	5	45,3	54	5,2
$Q_r$	50	60	50,3	60	61
$Q_w$	65	50	65,3	78	66,5

Le tableau 5.4 représente tous les cas des défauts simples pour le système considéré. Les trois premières colonnes résument les caractéristiques du défaut (actionneur en défaut, instant du défaut et amplitude du défaut) ; les trois autres colonnes quantifient les caractéristiques de la détection, de l'isolation et de l'identification. L'instant  $t_D$  où le défaut a été détecté, l'instant  $t_I$  où le défaut a été isolé et finalement l'estimation de la valeur du défaut  $\hat{f}_{ai}$ . Nous constatons que dans tous les cas le temps de détection  $t_{det}$  du défaut est presque instantané ( $\sim 0,3$  jours). L'estimation de la valeur du défaut est assez précise (l'erreur entre la valeur appliquée et celle estimée est environ 2%). Là où les résultats diffèrent c'est pour le temps d'isolation  $t_{iso}$  du défaut. Le temps d'isolation pour le premier et deuxième actionneur est d'environ 8 jours qui est un temps assez satisfaisant. Par contre le troisième observateur a besoin de 10 jours pour isoler le défaut dans l'actionneur correspondant et un défaut sur le quatrième actionneur est isolé après 13 jours. Donc pour le quatrième observateur le temps d'isolation est très grand et cela peut créer des dysfonctionnements préjudiciables. Une meilleure optimisation des matrices de gain peut améliorer le temps d'isolation mais ne pas

résoudre totalement le problème. Comme nous venons de le voir, cette méthode est capable de détecter, d'isoler et d'identifier un défaut actionneur simple assez rapidement avec une identification de la taille du défaut assez précise. L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de réglage des matrices de gain  $H$  et  $P$ .

### 5.1.3.3 Défaut simple en présence de bruit

Sur chaque sortie du système un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et d'écart type 0,3 a été ajouté. Nous avons introduit un défaut au temps  $t_f = 50$  jours sur la première entrée  $Q_{in}$ . L'effet du défaut sur les sorties du système (figure 5.8) est le même que dans le cas sans bruit. D'une certaine manière, nous pouvons dire que l'effet du défaut est indépendant du bruit de mesure.

Sur la figure 5.9, nous avons représenté les résidus associés à l'ensemble des observateurs et l'estimation de la valeur du défaut. Comme nous pouvons le constater, les résidus des observateurs, malgré le fait qu'ils soient influencés par le bruit, nous permettent de détecter et d'isoler un défaut. Donc, l'actionneur en défaut est bien isolé, avec la méthodologie que nous avons décrite au paragraphe précédent.

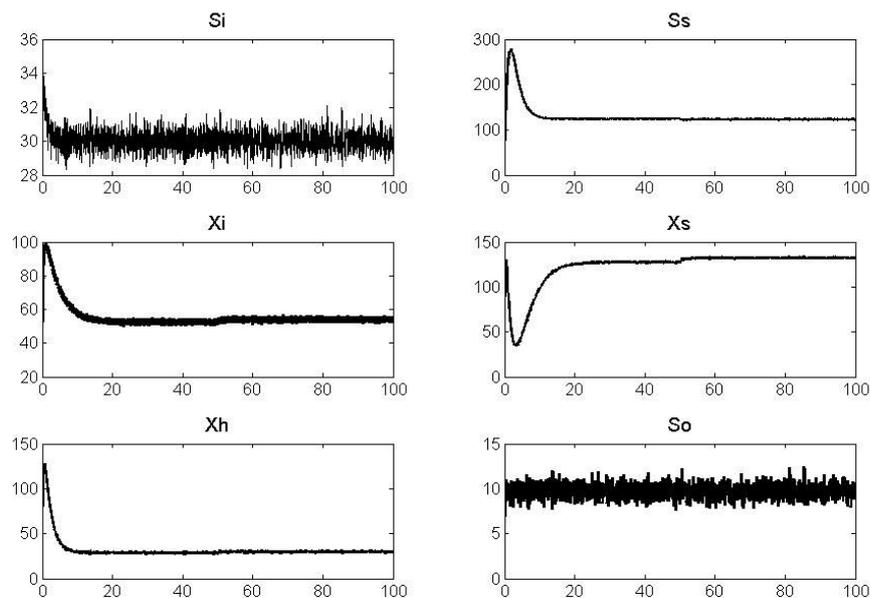


Figure 5.8 : Sorties du système en présence du bruit (défaut simple)

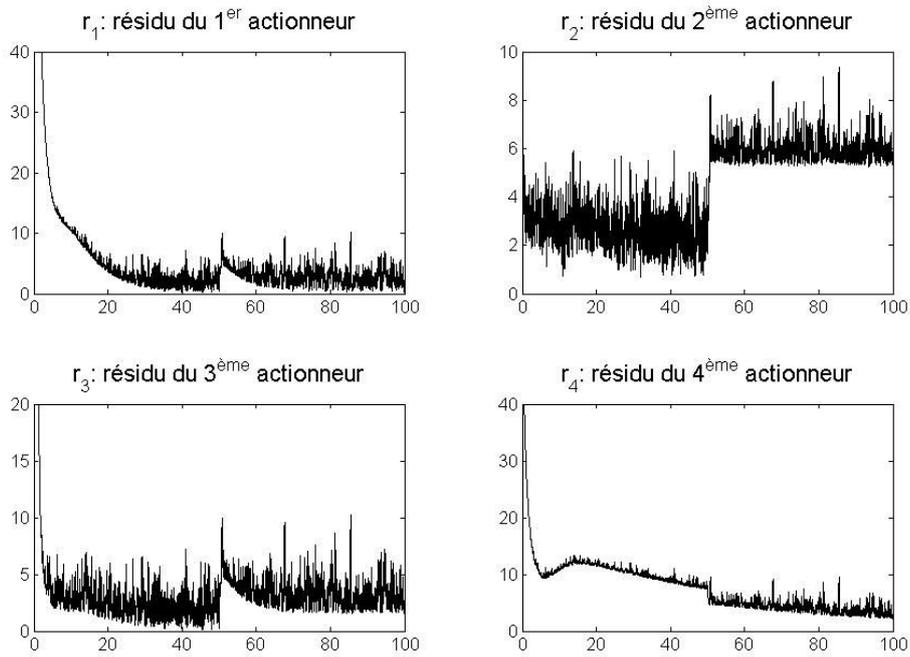


Figure 5.9 : Résidus des observateurs en présence du bruit (défaut simple)

La figure 5.10 montre l'estimation de la valeur du défaut en utilisant la même logique que pour le cas sans bruit de mesure. L'estimation est aussi assez précise mais cette fois il faut effectuer une moyenne sur une fenêtre glissante pour obtenir la valeur du défaut  $\hat{f}_{a1} = 215$  et la vraie valeur du défaut est 200.

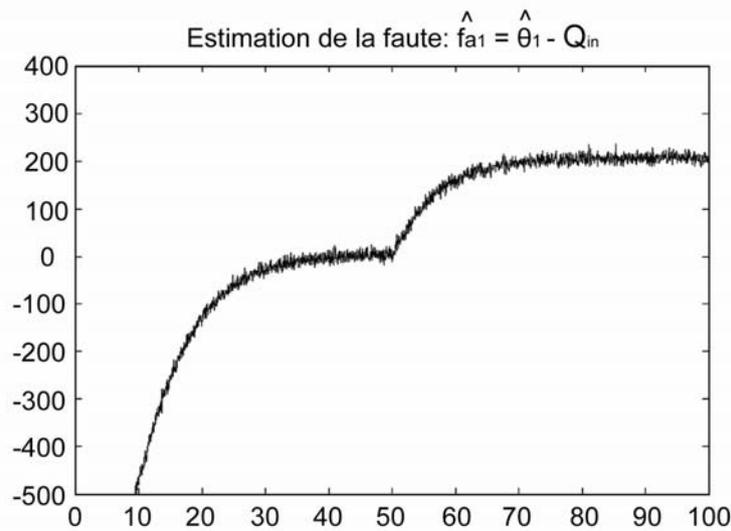


Figure 5.10 : Estimation du défaut en présence du bruit

Le tableau 5.5 représente les résultats pour tous les défauts simples qui peuvent se produire sur le système en présence de bruit. Les colonnes du tableau sont les mêmes que celles du tableau 5.2. En général, le temps d'isolation est le même qu'avec le cas sans bruit. Finalement, l'estimation de la valeur du défaut n'est pas influencée par le bruit, nous pouvons donc utiliser ces estimations pour la reconfiguration de la loi de commande.

Tableau 5.5: Défaut simple pour chaque actionneur (en présence du bruit)

actionneur	Défaut		Détection	Isolation	Identification
	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_a$ ) (l/h)	instant ( $t_D$ ) (jours)	instant ( $t_I$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_a$ ) (l/h)
$Q_{in}$	50	200	50,3	59	215
$Q_L$	45	5	45,3	54	5.2
$Q_r$	50	60	50,3	62	63
$Q_w$	65	50	65,3	78	58

Nous avons examiné l'efficacité de cette méthode sur des défauts simples dans les actionneurs sans et avec bruit de mesure. Le défaut est bien détecté et isolé par le schéma de FDI. En utilisant des observateurs nous avons construit des résidus qui sont insensibles au défaut d'un actionneur et sensible aux défauts des autres actionneurs. Alors, en présence d'un défaut dans un actionneur, le résidu correspondant à cet actionneur, après une période de temps demeure à zéro. Par contre les autres résidus se stabilisent à une nouvelle valeur. Cette stabilisation vers des valeurs différentes de zéro ne nous permet pas de traiter un nouveau défaut parce qu'il est très difficile de distinguer le résidu qui correspond à l'actionneur en défaut et il est impossible d'estimer la taille du défaut. En résumé, nous pouvons dire que cette méthode ne peut pas traiter de défauts multiples et que le temps d'isolation est relativement grand.

## 5.2 Méthode des observateurs adaptatifs pour les défauts multiples

Le but de toutes les méthodes de FDI est d'améliorer le temps d'isolation et d'identification. Dans ce paragraphe, nous allons analyser une nouvelle structure de la méthode présentée dans le

paragraphe précédent pour la détection, l'isolation et l'identification de défauts simples et multiples dans les actionneurs. La méthode est basée sur la création de plusieurs ensembles d'observateurs non linéaires où chaque ensemble isole le défaut d'un actionneur. L'avantage de cette méthode est que nous pouvons détecter, isoler et identifier les défauts simples mais aussi les défauts multiples d'une manière très rapide. La méthode est basée sur la reconstruction du vecteur  $u_{appl}$  à la sortie des actionneurs, cette estimation sera utilisée pour les ensembles d'observateurs.

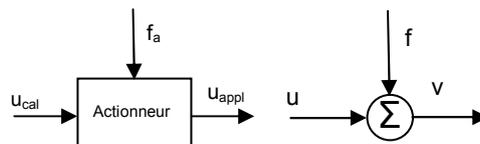


Figure 5.11 : Actionneur en défaut

Sur la figure 5.11, nous avons représenté un actionneur où  $f_a$  est le défaut,  $u_{cal}$  est l'entrée de l'actionneur (l'information que nous disposons) et  $u_{appl}$  est la sortie de l'actionneur qui est une information que nous essayons d'estimer par l'intermédiaire d'un vecteur  $\varphi_i$  que nous allons déterminer par la suite.

### 5.2.1 Présentation de la méthode

La classe de systèmes non linéaires est inchangée. Nous traitons seulement les défauts abrupts c'est-à-dire  $u_j^f = u_j + f_{aj} = \theta_{aj}$  pour  $t \geq t_f$ ,  $j \in 1, 2, \dots, m$ , et  $\lim_{t \rightarrow \infty} |u_j(t) - \theta_{aj}| \neq 0$ , où  $f_{aj}$  est une constante et  $u_j^f$  est la sortie du  $j^{\text{ème}}$  actionneur en défaut, tandis que  $u_j(t)$  est la sortie prévue lorsque cet actionneur ne présente pas de défaut. Donc, en présence d'un défaut  $f_{aj}$  nous avons :

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{j \neq l} g_j(x)u_j + g_l(x)u_l^f \quad (5.11)$$

### 5.2.1.1 Détection et Identification de défauts

Dans la plupart des méthodes basées sur le modèle, les étapes de la FDI sont: premièrement la détection de la présence d'un défaut, deuxièmement l'isolation de l'élément en défaut et finalement l'identification de la valeur du défaut. Dans la méthode que nous proposons, la détection et l'identification de la valeur du défaut se font simultanément. Nous utiliserons ces estimations pour l'isolation du défaut; nous disposons à ce moment d'un ensemble de valeurs identifiées. En effet nous n'avons pas encore isolé le défaut, ainsi nous ne pouvons pas donner une valeur unique pour l'estimation. C'est la raison pour laquelle nous avons un vecteur de valeurs candidates, une pour chaque actionneur, et pas simplement une valeur unique.

Donc, nous construisons un ensemble de  $i$  observateurs pour la détection et l'identification du défaut. Le nombre  $i$  d'observateurs est égal au nombre  $m$  d'actionneurs du système à surveiller. Les observateurs seront identiques à ceux présentés dans la première partie du chapitre (§ 5.1.1) ; la seule différence vient du fait que nous supposons que tous les actionneurs sont en défaut. Alors l'observateur (4.38) se reformule de la manière suivante :

$$1 \leq i \leq m \left\{ \begin{array}{l} \dot{\hat{x}}_i = f(x) + \sum g_j(x) \hat{\theta}_{ai,j} + H_i(\hat{x}_i - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_{ai,j} = -2\gamma(\hat{x}_i - x)^T P_i g_j(\hat{x}) \quad 1 \leq j \leq m \\ \hat{y}_i = C\hat{x}_i \end{array} \right. \quad (5.12)$$

Où  $\hat{x}_i$  est le vecteur d'état de l'observateur associé au  $i^{\text{ème}}$  actionneur, pour chaque actionneur nous devons donc choisir les matrices de gain appropriées  $H_i$  et  $P_i$  pour avoir une bonne estimation du défaut. Ces matrices de gain sont calculées à l'aide de l'équation 4.39. Cette fois l'optimisation de ces matrices privilégie la valeur du défaut que nous obtenons au détriment du temps de convergence et de l'amplitude de l'oscillation du résidu. Quand un défaut se produit dans un où plusieurs actionneurs du système, tous les observateurs vont détecter le ou les défauts. Le résidu que nous emploierons pour la détection du défaut est la

dérivée de la norme 2 de la différence entre le vecteur de sortie estimée et le vecteur de sortie mesurée :

$$r_i = \frac{d\|\hat{y}_i - y\|}{dt}, i \in m \quad (5.13)$$

Ces résidus nous permettent aussi de calculer des estimations du défaut. Ces estimations nous les obtenons en utilisant la relation suivante :

$$\varphi_i = \text{sgn}(r_i) \max(|r_i|), i \in m \quad (5.14)$$

Cela veut dire que l'estimation de la valeur du défaut correspond à la plus grande valeur absolue du résidu après la phase transitoire de l'observateur. Chaque résidu nous donne donc une valeur candidate, comme si le défaut se produit dans l'actionneur que chacun surveille. Finalement nous obtenons  $m$  valeurs candidates pour l'estimation du défaut. La démonstration de la stabilité de cet observateur pour un actionneur en défaut a été donnée au paragraphe 4.6.1. Une extension pour le cas présenté ici ne change ni le théorème ni sa démonstration.

### 5.2.1.2 L'isolation des défauts

Pour isoler le défaut nous devons créer  $m$  ensembles de  $m$  observateurs dans lesquels nous allons employer ces  $m$  estimations ( $\varphi_i$ ) déterminées précédemment. L'observateur, que nous allons réaliser, aura la même forme que l'observateur déjà présenté (4.38) où tous les ensembles seront identiques ; la seule chose qui change est l'entrée du système. A présent, le vecteur d'entrée  $u$  va être remplacé par le vecteur  $v^k, 1 \leq k \leq m$  où :

$$v^1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad v^2 = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots \quad v^m = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \varphi_m \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Pour le  $k^{\text{ème}}$  ensemble d'observateurs nous obtenons :

$$1 \leq i \leq m \begin{cases} \dot{\hat{x}}_i^k = f(x) + \sum_{j \neq i} g_j(x) v_j^k + g_i(x) \hat{\theta}_{ai}^k + H_k (\hat{x}_i^k - x) \\ \dot{\hat{\theta}}_i^k = -2\gamma (\hat{x}_i^k - x) P_k g_i(x) \\ \hat{y}_i^k = C \hat{x}_i^k \end{cases} \quad (5.16)$$

Ce  $k^{\text{ème}}$  ensemble contient  $i$  observateurs,  $i$  est égal au nombre  $m$  d'actionneurs à surveiller. Finalement, nous allons créer  $m$  ensembles d'observateurs, un pour chaque actionneur, qui auront la même forme que (5.16).

Le résidu que nous allons utiliser pour l'isolation du défaut est de la forme  $s_{k,i} = \|\hat{y}_i^k - y\|$ ,  $k, i \in [1, \dots, m]$ . Le terme  $\hat{y}_i^k$  correspond au vecteur de sortie estimée du  $i^{\text{ème}}$  observateur du  $k^{\text{ème}}$  ensemble.

### 5.2.1.3 Procédure pour la FDI

L'algorithme proposé se décompose de la manière suivante:

1. Construction d'une banque de  $m$  observateurs adaptatifs pour la détection et l'identification du défaut.
2. Génération des résidus  $r_i$  pour la détection du défaut et des valeurs candidates  $\varphi_i$ .
3. Construction des vecteurs d'entrées appliquées.
4. Construction de  $m$  banques de  $m$  observateurs adaptatifs pour l'isolation du défaut.
5. Génération des résidus  $s_{k,i}$  pour l'isolation du défaut.
6. Définition des seuils  $\delta_{ai}$  et construction des matrices de structure  $\Phi^i$ .
7. Elaboration de la matrice résultante  $\Phi$  et génération des résidus structurés  $s_s$  pour l'isolation du défaut.

En absence de défaut, tous les résidus de tous les ensembles d'observateurs se stabilisent à zéro après la phase transitoire, donc tous les résidus sont nuls. Après l'occurrence d'un

défaut, les résidus  $r_i$  de l'ensemble de détection et d'identification quittent zéro. Donc, il suffit qu'un résidu  $r_i$  quitte zéro pour détecter la présence d'un défaut. Ensuite nous nous focalisons sur les ensembles des résidus  $s_{k,i}$  pour l'isolation du défaut. L'ensemble, où il y a un résidu qui quitte zéro et les autres restent nuls, correspond à la valeur candidate correcte du défaut ; cette valeur candidate correspond donc à l'actionneur en défaut. Il est à noter que les résidus des autres ensembles quittent tous zéro.

#### 5.2.1.4 Étude du cas d'un défaut sur le $l^{\text{ème}}$ actionneur du système

Quand le défaut se produit, à l'aide des résidus  $r_i$  de l'ensemble de détection et d'identification, nous détectons ce défaut. Tous les résidus  $r_i$  détectent un défaut mais chacun donne une valeur différente pour l'identification de la taille du défaut  $\varphi_i$ . Alors en utilisant ce vecteur d'estimation  $\varphi_i$  et l'entrée du système  $u$ , nous allons former les nouveaux vecteurs d'entrée  $v^i$  que nous utiliserons comme nouvelle entrée pour chaque ensemble d'isolation. Enfin les résidus  $s_{k,i}$  associés à ces ensembles d'isolation vont nous indiquer l'actionneur en défaut, dans ce cas-ci le  $l^{\text{ème}}$  actionneur, l'identification de la taille du défaut correspond donc à l'estimation  $\varphi_l$  (Fragkoulis *et al.* 2007a).

#### 5.2.1.5 Évaluation des résidus en présence du bruit

Le grand problème des méthodes basées sur le modèle est l'effet du bruit sur les résidus associés aux observateurs. Dans la méthode proposée, l'utilisation de la dérivée pour construire les résidus de l'ensemble des observateurs de détection et d'identification rend l'évaluation encore plus difficile. Ce résidu nous donne des résultats très satisfaisants pour la détection et l'identification du défaut dans le cas sans bruit de mesure. Comme nous allons voir, sur les résultats pour le système académique et celui de traitement des eaux usées, la détection du défaut se fait presque instantanément ; de plus nous obtenons une valeur très précise pour l'estimation de la taille du défaut. Par contre en présence du bruit de mesure il est impossible de faire la détection du défaut et l'identification de sa taille parce que nous dérivons aussi le bruit et nous ne pouvons pas distinguer les défauts du bruit.

Pour contourner ce problème, nous avons essayé de changer l'opérateur de dérivation. Premièrement nous choisissons d'utiliser la dérivée structurée. Dans la littérature, des méthodes qui l'utilisent sont proposées par Ibragimov et Khasminskii (1981) et Kalachev (1970), mais les résultats pour l'estimation du défaut ne sont pas satisfaisants. Ensuite nous

employons le filtre  $\frac{ds}{dt} = \frac{T_f s}{1 + T_f s}$  comme approximation de la dérivée du résidu ; la valeur

$T_f \in [1,8]$  apporte une action de filtre passe bas. Les résultats que nous obtenons sont meilleurs qu'avant mais l'estimation de la taille du défaut n'est pas précise.

Pour améliorer ces résultats, nous allons faire une extension de la méthode du résidu composé que nous avons présenté au chapitre 4. Pour cela, il est nécessaire de créer un observateur basé sur les valeurs nominales du système qui sera insensible aux défauts provenant de l'entrée du système. Nous devons créer un observateur d'état qui, après la phase transitoire, devient indépendant de l'erreur d'observation. Cet observateur peut se formuler par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_0 = f(x) + g(x)u + aG(\hat{x}_0 - x) \\ a = \begin{cases} 1, & t \leq t_{ini} \\ 0, & t \geq t_{ini} \end{cases} \\ \hat{y}_0 = C\hat{x}_0 \end{cases} \quad (5.17)$$

Nous avons alors un observateur de type Luenberger, dans lequel l'opérateur  $a$  est égal à 1 jusqu'à  $t_{ini}$  ; après il prend une valeur nulle ;  $t_{ini}$  est l'instant de convergence de la phase transitoire. Le calcul de la matrice de gain  $G$  est très facile [Luenberger (1966)]. Ensuite nous utilisons la sortie de cette observateur  $\hat{y}_0$  pour élaborer le résidu  $r_i$ , la nouvelle forme du résidu est donc :

$$r_i = \frac{d\|\hat{y}_i - y - \hat{y}_0\|}{dt}, \quad i \in m \quad (5.18)$$

L'inconvénient de cette extension est que nous considérons que les caractéristiques du bruit sont bien connues. Les ensembles de résidus pour l'isolation du défaut sont assez robustes par rapport au bruit de mesure et nous ne devons pas utiliser de filtre pour l'évaluation de résidus associés.

### 5.2.2 Application au modèle non linéaire académique

Considérons de nouveau l'exemple académique présenté au chapitre 3. Les valeurs des matrices de gain pour les ensembles d'isolation sont les mêmes que celle du paragraphe 5.2.1 et les valeurs de matrices de gain de détection et d'identification sont  $P_1 = 7 * I_3$ ,  $H_1 = -3 * I_3$  et  $P_2 = 5 * I_3$ ,  $H_2 = -4 * I_3$ . Nous introduisons un défaut simple  $f_{a2} = 0,3$  au temps  $t_f = 400$  sur le deuxième actionneur.

Sur la figure 5.12 nous avons représenté les deux résidus  $r_1$  et  $r_2$  associés à l'ensemble de détection et d'identification. Ces deux résidus convergent très vite vers zéro. A  $t_f = 400$  ils quittent zéro, pour une période de temps très courte, et ensuite ils reviennent à zéro. Le défaut a donc été détecté et ceci presque instantanément. Maintenant nous calculons les valeurs candidates du défaut, à l'aide de l'ensemble des résidus, pour créer la nouvelle entrée  $v^k$ . Les deux estimations que nous obtenons sont  $\varphi_1 = 0,65$  et  $\varphi_2 = 0,32$ .

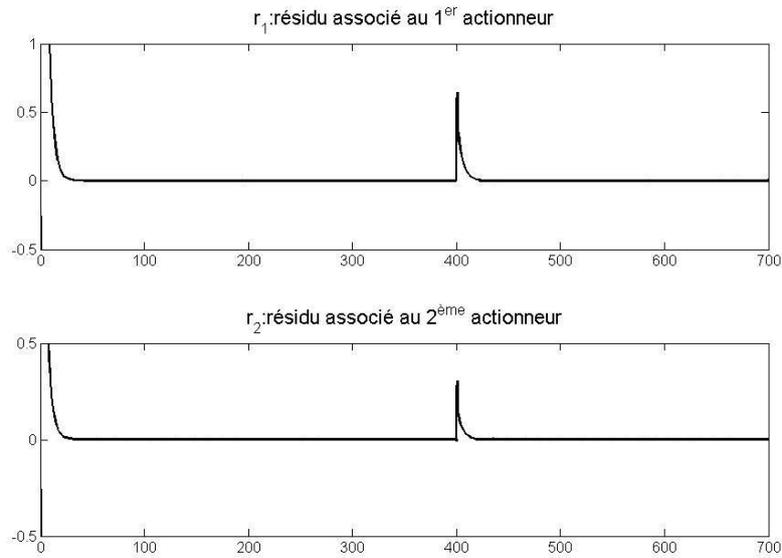


Figure 5.12 : Résidus  $r_i$  de l'ensemble de détection et d'identification  
 Pour isoler l'actionneur en défaut il faut créer les nouveaux vecteurs d'entrées du système.

Alors les deux nouvelles entrées sont  $v^1 = \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,65 \\ 0 \end{bmatrix}$  et  $v^2 = \begin{bmatrix} 5 \\ 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0,32 \end{bmatrix}$ .

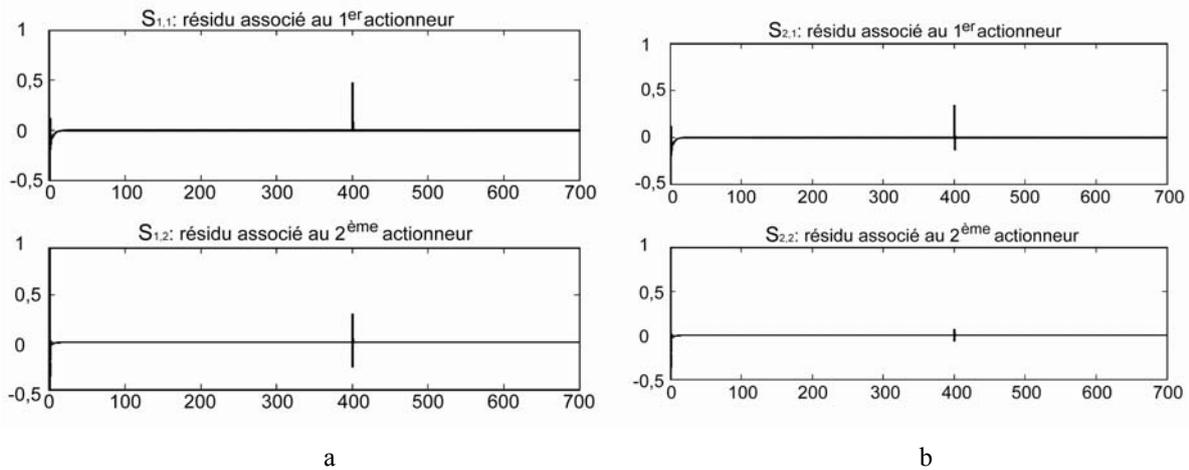


Figure 5.13: Résidus  $s_{k,i}$  des ensembles d'isolation

Nous appliquons ces deux entrées aux ensembles des observateurs d'isolation de défaut. Grace aux résidus  $s_{k,i}$  de ses ensembles, nous allons pouvoir isoler le défaut.

Ainsi, sur la figure 5.13 nous avons présenté les résidus des deux ensembles  $s_{1,i}$  et  $s_{2,i}$ . Nous vérifions que tous demeurent à zéro jusqu'au temps  $t_f = 400$  jours où le défaut a été

introduit, les deux résidus du premier ensemble, figure 5.13a, quittent zéro et y reviennent après une période de temps relativement courte. Les deux résidus du deuxième ensemble sont présentés sur la figure 5.13b, le second reste à zéro, où à une valeur très proche du zéro, mais par contre le premier a la même réaction, que les résidus du premier ensemble. Donc ce deuxième ensemble nous permet d'isoler le défaut et il se trouve donc sur le deuxième actionneur. Le temps d'isolation est très court parce qu'il suffit de trouver l'ensemble où un résidu demeure à zéro.

Comme nous l'avons vu, tous les résidus reviennent à zéro après une période de temps. Cela veut dire que lorsque tous les résidus sont revenus à leur valeur initiale, l'ensemble des observateurs est prêt pour l'isolation d'un nouveau défaut. Le temps de réinitialisation  $t_{rei}$  correspond au temps minimum pour l'isolation de défauts multiples.

### 5.2.3 Application au modèle du système de traitement des eaux usées

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats obtenus à partir des ensembles d'observateurs développés pour le modèle du système de traitement des eaux usées. Nous présentons les quatre résidus  $r_i$  associés aux quatre observateurs de détection et d'identification et les résidus  $s_{i,j}$  associés aux quatre ensembles d'isolation. D'abord nous donnerons les résultats pour un défaut actionneur simple ensuite pour les défauts multiples et finalement nous présentons les résultats pour un défaut simple en présence du bruit de mesure.

Nous allons évaluer seulement les résidus des ensembles d'isolation. Cette fois, il y a 16 seuils à déterminer. Le seuil simple va être utilisé  $\delta_i = c$  où la constante  $c$  va être identique pour tous les résidus ( $\delta_i = 3$ ). Le vecteur de code de défaut pour le  $k^{\text{ème}}$  ensemble d'isolation est de la forme :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1:k-1}(t) &= (1 \quad \dots \quad 1) \\ \varepsilon_k(t) &= (0 \quad \dots \quad 1 \quad 0 \quad \dots \quad 0) \\ \varepsilon_{k+1:m}(t) &= (1 \quad \dots \quad 1) \end{aligned} \quad (5.19)$$

Dans ce cas, il est nécessaire de définir quatre *matrices de structure* associées à chacun des ensembles :

$$\Phi^1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \Phi^2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \Phi^3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } \Phi^4 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice de structure résultante  $\Phi^R$  permettant d'isoler un défaut actionneur s'obtient à partir des matrices  $\Phi^J$ . Pour cela, il suffit d'appliquer l'opérateur booléen « AND » sur chaque élément  $\Phi_{i,k}^J$  des matrices  $\Phi^J$  de la manière suivante :

$$\Phi_{i,j}^R = \Phi_{i,j}^1 \& \Phi_{i,j}^2 \& \Phi_{i,j}^3 \& \Phi_{i,j}^4 \quad (5.20)$$

Nous pouvons donc écrire :

$$s = \Phi^R f_a \quad (5.21)$$

Ce qui permet d'obtenir la relation :

$$s = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{a1} \\ f_{a2} \\ f_{a3} \\ f_{a4} \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

### 5.2.3.1 Défauts simples

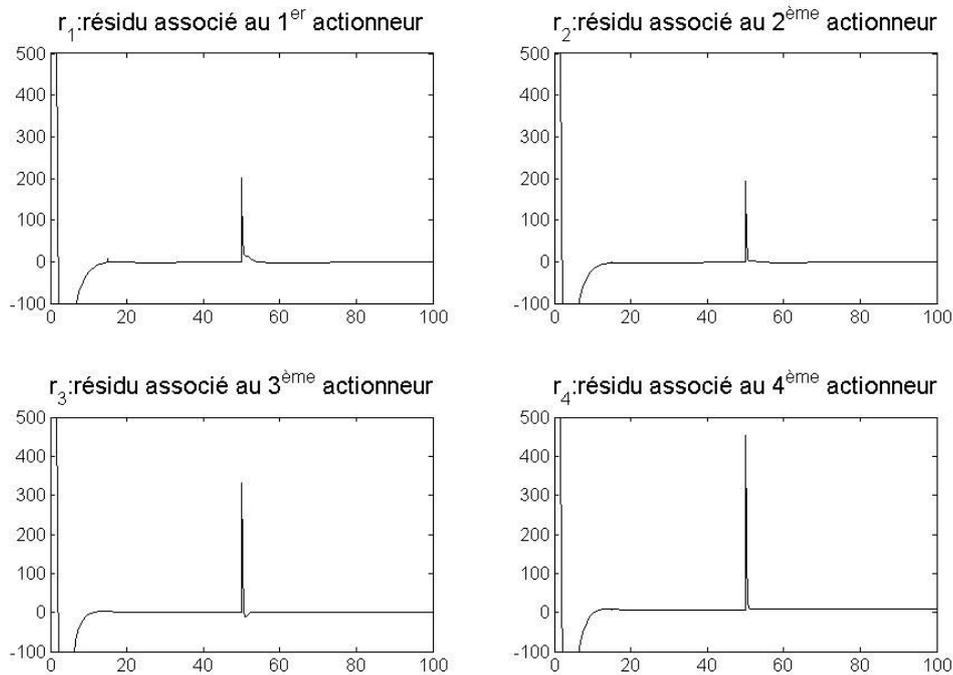
Nous avons introduit un défaut constant  $f_{a1} = 200$  sur le premier actionneur  $Q_{in}$  au temps  $t_f = 50$  jours. Sur la figure 5.14, nous présentons les résidus  $r_i$  associés à l'ensemble

des observateurs de détection et d'identification. Nous constatons que la phase transitoire de l'ensemble est très courte, donc au temps  $t_{ini} = 12$  jours la procédure est prête pour détecter la présence d'un défaut. Au temps  $t_f = 50$  jours, nous constatons que tous les résidus quittent zéro, ainsi nous avons détecté le défaut. Comme nous pouvons le constater, après une courte période de temps, les résidus retournent à zéro à  $t_R = 54,5$  jours ainsi l'ensemble est prêt pour traiter un autre défaut. Nous utilisons ces résidus pour l'identification du défaut et les quatre valeurs candidates sont  $\varphi_1 = 202$ ,  $\varphi_2 = 193$ ,  $\varphi_3 = 332$  et  $\varphi_4 = 450$ .

Tableau 5.6: Valeurs de  $H_i$ ,  $P_i$  et  $\gamma$ 

	Obs.1	Obs.2	Obs.3	Obs.4
$H_i$	$-4,1I_9$	$-4,5I_9$	$-4I_9$	$-3I_9$
$P_i$	$25/3I_9$	$5,1I_9$	$12I_9$	$2,4I_9$
$\gamma$	1	1	1	1

Le tableau 5.6 récapitule les valeurs que nous avons calculées pour les matrices de gain  $H_i$  et  $P_i$  et pour la constante  $\gamma$  pour chaque observateur. C'est la phase la plus fastidieuse de la méthode parce qu'il faut rechercher des valeurs afin d'obtenir une bonne estimation de la taille du défaut.


 Figure 5.14: Résidus  $r_i$  de l'ensemble de détection et d'identification

Sur la figure 5.15, nous présentons les quatre résidus  $s_{k,i}$  associés aux quatre ensembles d'isolation. Comme nous pouvons le voir aux temps  $t_I = 51,5$  jours et sur le premier ensemble de résidus  $s_{1,i}$  associé au premier observateur (qui correspond à l'entrée  $Q_{in}$ ), le résidu  $s_{1,1}$  quitte zéro mais les résidus  $s_{1,2}$ ,  $s_{1,3}$  et  $s_{1,4}$  restent à zéro. Les éléments des trois autres ensembles de résidus ( $s_{2,j}$ ,  $s_{3,j}$ ,  $s_{4,j}$ ) à  $t_I = 51,5$  jours quittent tous zéro. Nous voyons que, pour tous les ensembles d'observateurs d'isolation, tous les résidus sont influencés par le défaut sauf les résidus du premier ensemble ou seul le premier résidu est influencé. Cela correspond à la première ligne de la matrice  $\Phi$  et le défaut se trouve donc dans l'actionneur surveillé par le premier ensemble (premier actionneur).

Par conséquent, nous avons isolé l'actionneur en défaut correctement et assez rapidement. Le temps d'isolation est de  $t_{iso} = 1,5$  jours. Tous les résidus sont revenus à zéro à  $t_R = 60$  jours, les ensembles d'observateurs d'isolation sont prêts pour l'isolation d'un autre défaut actionneur. Le temps minimum  $t_{rei}$  entre deux défauts multiples, pour que la méthode

puisse l'isoler, doit être inférieur ou égal à 10. La valeur d'estimation du défaut est donnée alors par  $\varphi_1$  est  $\hat{f}_{a1} = 202$  ; l'erreur d'estimation est donc de 1%.

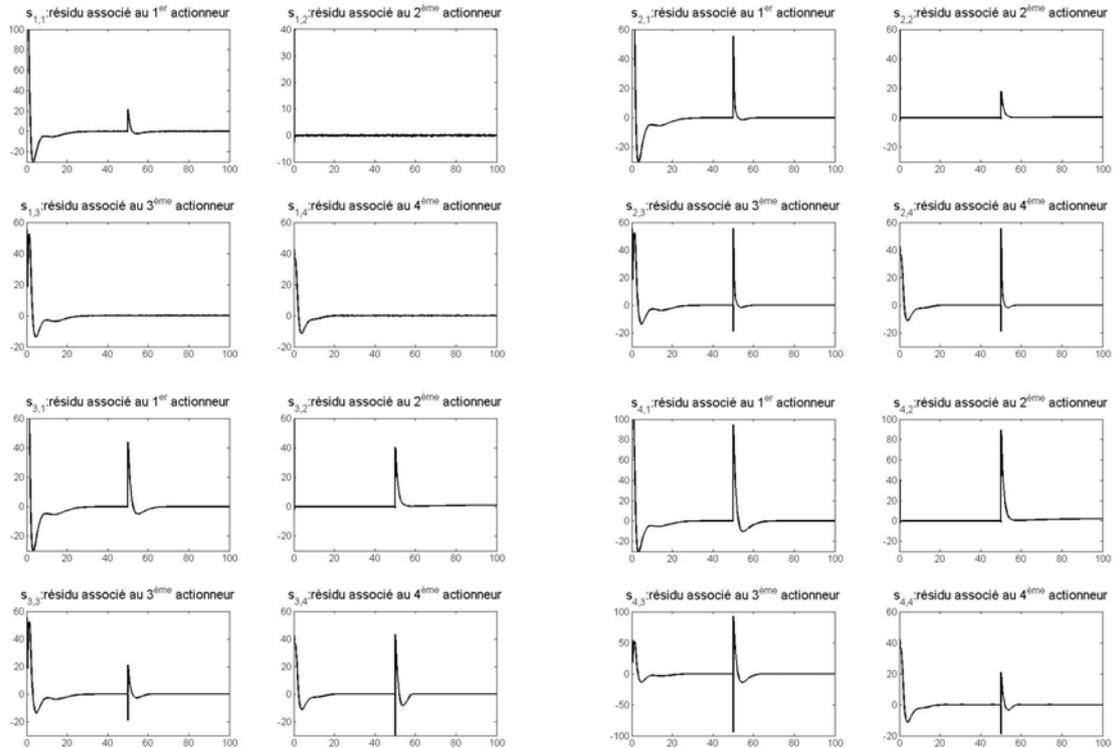


Figure 5.15: Résidus  $s_{k,i}$  des ensembles d'isolation

Le tableau 5.7 synthétise tous les cas des défauts simples pour le système considéré en utilisant cette nouvelle méthode pour la FDI. Les trois premières colonnes résument les caractéristiques du défaut (actionneur en défaut, instant du défaut et amplitude du défaut) qui sont les mêmes que celles du tableau 5.2. Ensuite nous avons obtenu l'instant  $t_D$  pour obtenir la détection du défaut et l'estimation de la taille du défaut  $\hat{f}_a$ . Bien sûr, nous ne donnons pas toutes les valeurs candidates mais seulement l'estimation de l'actionneur en défaut. La sixième colonne correspond à l'instant d'isolation  $t_I$ . Finalement la dernière colonne représente l'instant  $t_R$  à partir duquel les ensembles d'isolation sont capables d'isoler une deuxième faute. Comme nous le constatons, la détection du défaut est presque instantanée. Les résultats de l'identification du défaut sont aussi très satisfaisants. L'erreur d'estimation dans tous les cas est comprise entre 1% et 4%. Le temps d'isolation du défaut a été raccourci,

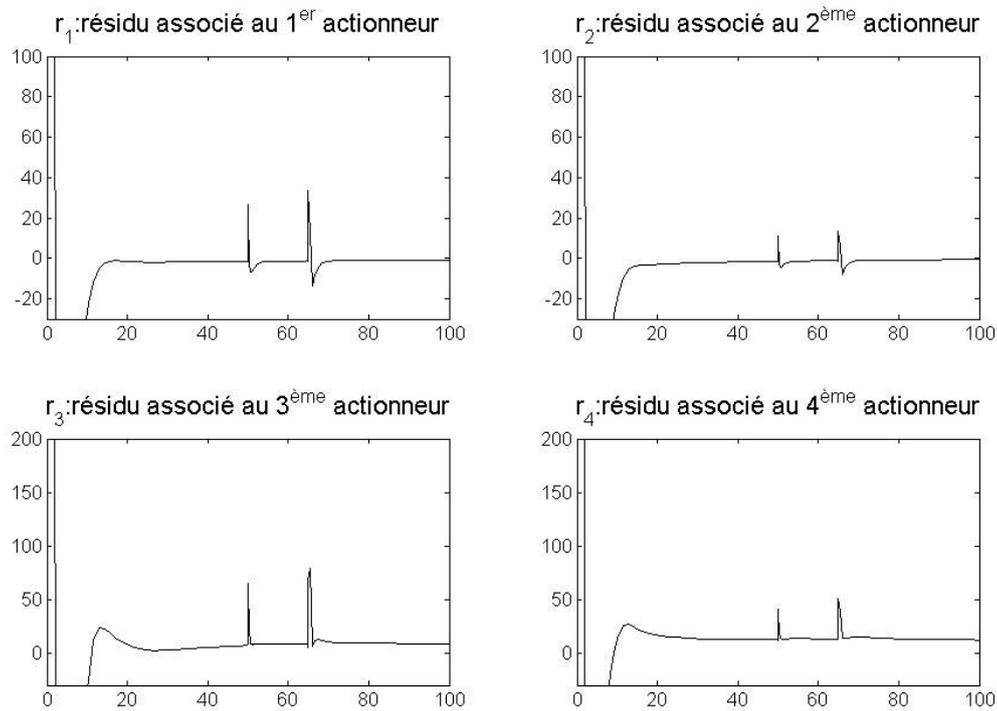
le défaut est isolé après 1 à 2 jours ce qui est rapide par rapport aux autres méthodes. Le temps pour la réinitialisation des ensembles et aussi très court environ 10 jours.

Tableau 5.7: Défaut simple pour chaque actionneur

Défaut			Détection/ Identification		Isolation	Réinitialisation
actionneur	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_a$ ) (l/h)	instant ( $t_D$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_a$ ) (l/h)	instant ( $t_I$ ) (jours)	instant ( $t_R$ ) (jours)
$Q_{in}$	50	200	50,5	202	51.5	60
$Q_L$	45	5	45,7	4,85	47	53
$Q_r$	50	60	50,5	62	51	58
$Q_w$	65	50	65,5	51	67,5	76

### 5.2.3.2 Défauts multiples

Afin d'illustrer les défauts multiples, nous avons introduit un défaut  $f_{a3} = 60$  au temps  $t_{f1} = 50$  jours sur le troisième actionneur  $Q_r$  et un deuxième défaut  $f_{a4} = 50$  sur le quatrième actionneur  $Q_w$  au temps  $t_{f2} = 65$  jours. Le défaut du troisième actionneur est toujours actif quand le défaut sur le quatrième actionneur apparaît. Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.16, au temps  $t_{f1} = 50$  jours les résidus quittent zéro et cela veut dire que le premier défaut a été détecté. Les valeurs candidates pour l'estimation du défaut sont  $\varphi_1 = 25$ ,  $\varphi_2 = 11,5$ ,  $\varphi_3 = 63$  et  $\varphi_4 = 41$ . Puis à  $t = 60$  jours, tous les résidus  $r_i$  sont revenus à zéro et à  $t_{f2} = 65$  jours nous avons la détection du deuxième défaut avec  $\varphi_1 = 33,5$ ,  $\varphi_2 = 14$ ,  $\varphi_3 = 80$  et  $\varphi_4 = 51$  les quatre valeurs candidates pour l'estimation du défaut.

Figure 5.16: Résidus  $r_i$  de l'ensemble de détection et d'identification

Sur la figure 5.17, nous avons représenté les huit résidus  $s_{3,i}$  et  $s_{4,i}$  associés au troisième et au quatrième ensemble d'isolation. Nous ne donnons pas les résidus associés au premier et au deuxième ensemble d'isolation car leurs résultats sont presque les mêmes que dans les cas du défaut simple. Les quatre premières sous figures représentent l'ensemble des résidus pour le troisième actionneur et les quatre autres, les résidus pour le quatrième actionneur. La ligne pointillée sépare le premier du deuxième défaut. Sur le troisième ensemble de résidus, avant la ligne pointillée et au temps  $t_{f1} = 50$  jours, seul le résidu  $s_{3,3}$ , qui est associé au troisième actionneur, quitte zéro par contre les résidus correspondant aux trois autres actionneurs restent à zéro. Par contre sur le quatrième ensemble tous les résidus quittent zéro pour une courte période de temps, nous avons donc bien isolé l'actionneur en défaut et de manière assez rapide.

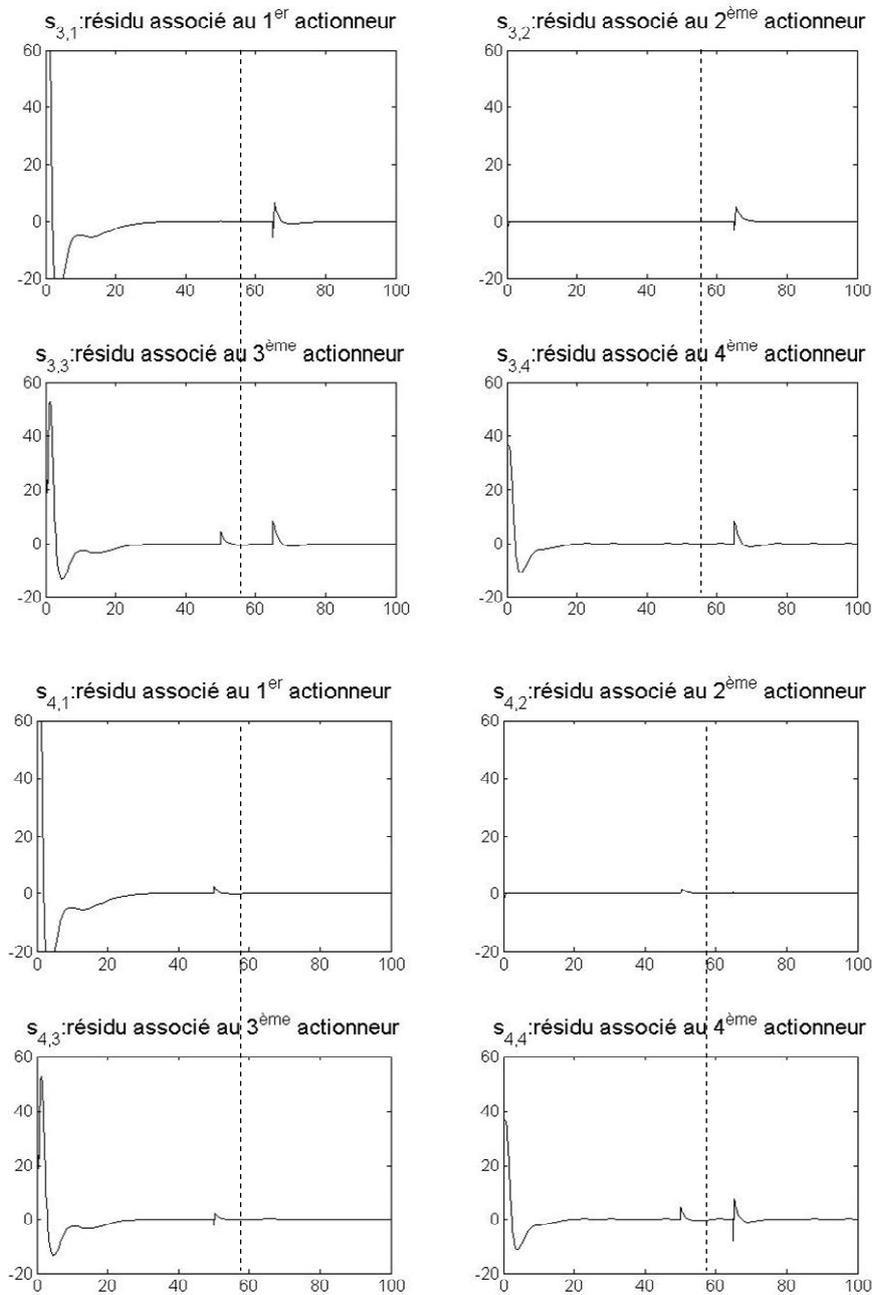


Figure 5.17: Résidus  $s_{k,i}$  des ensembles d'isolation

Après la ligne pointillée et aux temps  $t_{f2} = 65$  jours, seul le résidu  $s_{4,4}$  qui est associé au quatrième actionneur quitte zéro et les trois autres résidus restent à zéro. Les résidus de l'ensemble  $s_{3,i}$  quittent tous zéro comme prévu. Au temps  $t_R = 70$  jours tous les résidus sont revenus à zéro et les ensembles sont prêts pour traiter un nouveau défaut actionneur.

Comme nous venons de l'illustrer, la méthode peut traiter les défauts simples mais aussi les défauts multiples avec un délai entre les deux défauts. Ce délai est défini par le temps de réinitialisation  $t_{rei}$  des ensembles d'observateurs. La méthode ne peut pas traiter les défauts simultanés pour cause de problèmes d'estimation de valeurs candidates. Nous devons mentionner que lorsque le deuxième défaut se produit le premier défaut agit toujours sur le système.

### 5.2.3.3 Défauts simples en présence de bruit

Nous avons perturbé le signal mesuré avec un bruit blanc gaussien uniformément distribué de moyenne nulle et d'écart type 0,3. Nous considérons un défaut sur le premier actionneur avec les mêmes propriétés que dans le cas sans bruit pour un défaut simple.

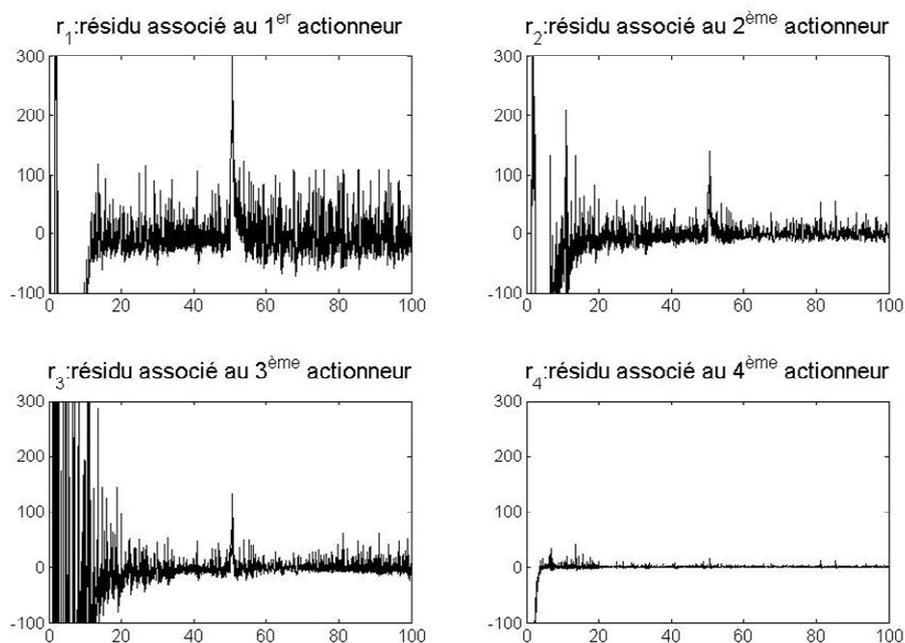


Figure 5.18: Résidus  $r_i$  de l'ensemble de détection/identification (en présence de bruit)

Sur la figure 5.18, nous pouvons voir les résultats du premier ensemble. La détection du défaut est claire mais l'identification n'est pas aussi claire que dans les exemples sans bruit.

Les deuxième et troisième résidus sont relativement peu sensibles au bruit. Par contre le premier ensemble, après la détection du défaut, devient très sensible au bruit ; pour le quatrième ensemble, la détection est presque impossible à faire. Les valeurs candidates du défaut sont  $\varphi_1 = 178$ ,  $\varphi_2 = 125$ ,  $\varphi_3 = 150$  et  $\varphi_4 = 20$ , nous constatons que l'identification du défaut n'est pas précise.

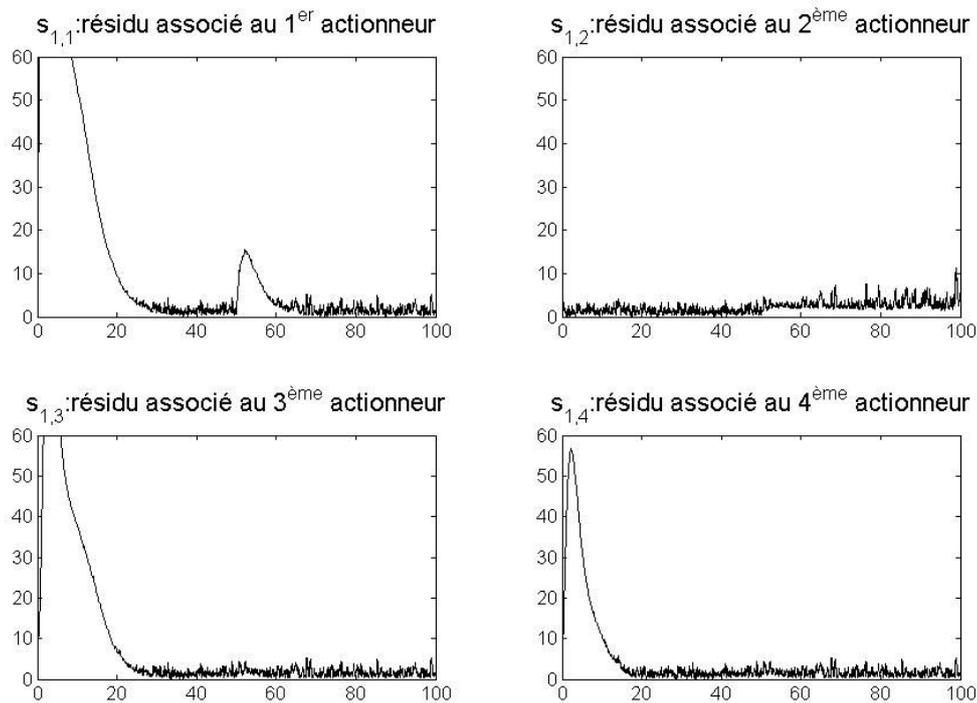


Figure 5.19: Résidu  $s_{k,i}$  du première ensemble d'isolation (en présence de bruit)

La figure 5.19 montre les résultats du premier ensemble d'observateurs d'isolation et malgré le fait que l'estimation du défaut n'est pas aussi bonne que dans le cas sans défaut, l'isolation du défaut est assez rapide. Ainsi nous pouvons isoler un défaut même si l'estimation est entachée d'une erreur importante. Les résultats semblables au cas sans bruit de mesure sont obtenus et l'isolation des défauts est relativement robuste par rapport au bruit.

Le tableau 5.8 synthétise tous les cas de défauts simples en présence du bruit. Les cinq premières colonnes sont identiques à celles du tableau 5.4. Ensuite nous ne quantifions pas le temps d'isolation mais nous donnons l'erreur d'estimation. La détection du défaut dans tous

les cas est la même que dans les cas sans bruit parce qu'elle ne dépend pas d'un seul résidu mais de tous (n'importe quel résidu peut être utilisé pour la détection de la présence d'un défaut). La valeur de l'estimation de la taille du défaut est moins précise que dans le cas sans bruit.

Tableau 5.8: Défaut simple pour chaque actionneur (en présence du bruit)

Défaut			Détection/ Identification		Erreur d'estimation
actionneur	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_a$ ) (l/h)	instant ( $t_D$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_a$ ) (l/h)	pourcentages
$Q_{in}$	50	200	50,5	178	11%
$Q_L$	45	5	45,7	4,75	5%
$Q_r$	50	60	50,5	64	6,5%
$Q_w$	65	50	65,5	61	22%

Pour les deuxième et troisième résidus nous obtenons une bonne estimation mais pour les premier et quatrième l'estimation n'est pas correcte. L'erreur d'estimation confirme ce que nous avons décrit précédemment. L'avantage de cette méthode est que malgré que nous ayons une erreur d'estimation assez importante, les ensembles d'isolation peuvent toujours isoler l'actionneur en défaut. Après quelques tests que nous avons fait sur les ensembles d'isolation nous avons conclu qu'ils sont capables d'isoler un défaut dans les actionneurs si la valeur d'erreur d'estimation est inférieure à 30% de la valeur réelle.

### 5.3 Comparaison des deux méthodes

Dans ce paragraphe nous allons comparer les deux méthodes analysées dans les paragraphes 5.1 et 5.2. La méthode classique peut traiter seulement les défauts simples ce qui est un inconvénient majeur par rapport à la méthode proposée. A titre comparatif, nous allons traiter seulement des cas où nous avons un défaut simple sur un des actionneurs du système. Les caractéristiques des défauts simples sont les mêmes que celles données sur les tableaux 5.4.

En comparant les tableaux 5.4 et 5.7, où sont regroupés tous les résultats pour tous les défauts simples qui peuvent apparaître sur le système, il est possible de tirer des conclusions très intéressantes. Pour la détection de défauts, les résultats des deux méthodes sont identiques et nous pouvons la considérer comme presque instantanée. Ensuite, nous comparons l'estimation de la valeur du défaut. Pour la première méthode nous utilisons la différence entre l'entrée de l'actionneur en défaut  $u_i$  puisque nous avons déjà isolé le défaut, et l'estimation  $\hat{\theta}_{ai}$  de l'observateur correspondant. Pour la méthode proposée, nous utilisons directement le résidu associé à l'ensemble de détection du défaut pour toutes les valeurs candidates et après l'isolation nous choisissons la valeur retenue. Dans les deux cas l'estimation est assez précise et l'erreur d'estimation est environ 2%. Dans le tableau 5.9 nous donnons l'erreur d'estimation pour tous les cas de défaut simple.

Tableau 5.9: Caractéristiques des deux méthodes

Défaut	Méthode Classique		Méthode des valeurs candidates	
	erreur %	$t_{iso}$ (jours)	erreur %	$t_{iso}$ (jours)
$Q_{in}$	2,5	8	1	1,5
$Q_L$	4	7	3	2
$Q_r$	1,6	10	3,3	1
$Q_w$	33	13	2	2,5

La première colonne du tableau 5.9 donne l'actionneur en défaut, les caractéristiques du défaut sont les mêmes que celles du tableau 5.4. Les deux colonnes suivantes sont l'erreur d'estimation de la valeur du défaut et le temps d'isolation du défaut (en jours) pour la méthode classique. Les deux dernières colonnes caractérisent la deuxième méthode. Pour l'erreur d'estimation du défaut nous avons à peu près les mêmes résultats pour les deux méthodes, excepté pour le quatrième actionneur où par la méthode classique l'erreur est assez importante (33%). Par contre l'erreur dans le cas de la deuxième méthode, pour le même actionneur, est égale à 2% beaucoup plus petite par rapport aux valeurs de la méthode classique.

La plus grande différence se situe au niveau du temps d'isolation du défaut. La première méthode a besoin entre 8 et 13 jours pour l'isolation d'un défaut dans les actionneurs, la méthode proposée isole les mêmes défauts entre 1 et 2,5 jours. La différence est importante car plus la faute est identifiée précocement meilleur sera le retour en fonctionnement normal.

Le tableau 5.10 est le même que le tableau 5.9 mais cette fois nous avons ajouté le bruit de mesure, dont les caractéristiques sont les mêmes qu'au paragraphe 5.1.3.3. Les résultats que nous obtenons sont identiques aux précédents, sauf pour l'estimation du défaut. Le bruit provoque une augmentation considérable de l'erreur d'estimation laquelle ne cause pas un problème pour l'isolation du défaut. Par contre il est impossible d'utiliser ces estimations pour la reconfiguration du système de commande.

Tableau 5.10: Caractéristiques des deux méthodes (en présence de bruit)

Défaut	Méthode Classique		Méthode de valeurs candidates	
	erreur %	$t_{iso}$ (jours)	erreur %	$t_{iso}$ (jours)
$Q_{in}$	7,5	9	11	2,5
$Q_L$	4	9	5	2
$Q_r$	5	12	6,5	2
$Q_w$	16	13	22	5

La présence de bruit de mesure dans la méthode classique donne une estimation du défaut beaucoup plus précise, sauf pour le quatrième actionneur dont l'estimation est toujours mauvaise. D'autre part, le temps d'isolation du défaut est toujours beaucoup plus court avec la méthode des valeurs candidates. En résumé, nous avons vu que: les deux méthodes détectent rapidement le défaut ; la méthode proposée isole le défaut beaucoup plus rapidement que la méthode classique avec et sans bruit de mesure ; les deux méthodes donnent une estimation très précise de la valeur du défaut pour les cas sans bruit ; la méthode classique donne une estimation beaucoup plus précise en présence de bruit de mesure. Bien sûr, la méthode des valeurs candidates est capable d'isoler des défauts multiples, comme nous l'avons déjà mentionné alors que la méthode classique en est incapable.

Cette nouvelle méthode a besoin d'un grand nombre d'ensembles d'observateurs qui est égal à  $m+1$ . Cela signifie que nous avons  $m*(m+1)$  observateurs en comparaison des  $m$  observateurs de la méthode classique, basée sur les observateurs adaptatifs [Bastin et Gevers (1988) et Boskovic et Mehra(2001)]. Néanmoins, comme les résultats de simulation le montrent, le temps d'isolation de cette méthode est beaucoup plus court que la méthode classique. L'avantage primordial de cette méthode est qu'après une période de temps très courte (légèrement supérieure au temps d'isolation), l'algorithme est prêt à traiter un nouveau défaut. Cela signifie que nous pouvons détecter et isoler les défauts simples et multiples avec un délai entre les deux défauts qui peut être assez court. Par contre, nous ne pouvons pas utiliser cette méthode pour les défauts simultanés, parce qu'il est impossible de créer un vecteur d'estimation pertinent car l'effet d'un défaut actionneur se retrouve sur toutes les estimations. Malgré le grand nombre d'observateurs que nécessite cette méthode, elle donne des résultats plus satisfaisants que la méthode classique. [Li et Dahhou 2007].

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons analysé et donné les résultats de simulation pour deux méthodes de détection, d'isolation et d'estimation de défaut. La première méthode est basée sur les observateurs adaptatifs qui sont souvent utilisés dans la littérature. La deuxième méthode est aussi basée sur les observateurs adaptatifs, mais la structure est différente, ce qui nous permet d'isoler des défauts multiples également. La méthode proposée utilise des valeurs candidates du défaut, en utilisant ces estimations il est possible de construire la sortie de l'actionneur.

Ces deux méthodes sont appliquées sur un exemple académique issu de la littérature et sur un modèle d'un procédé de traitement des eaux usées. Pour la première, nous avons introduit un défaut simple sur un des actionneurs du système, au début sans bruit de mesure et ensuite en présence de bruit, et nous avons analysé les résultats obtenus. Pour la deuxième, nous l'avons testée au début avec un défaut simple, avec et sans bruit de mesure, et ensuite avec des défauts multiples et nous avons validé la méthode. Finalement, nous avons comparé les deux méthodes et nous avons vu les avantages et les inconvénients de chacune.



# Chapitre 6 : Détection et isolation des défauts dans les capteurs

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter le cas où un ou plusieurs défauts apparaissent à la sortie du système  $y$  (cas de défauts sur un ou plusieurs capteurs). Nous présentons tout d'abord, une méthode à base d'observateurs adaptatifs que nous appliquerons à un modèle académique et ensuite au modèle d'un système de traitement des eaux usées. Cette méthode ne peut traiter que des défauts simples. Afin de traiter les défauts multiples, nous effectuons une augmentation d'espace en appliquant au vecteur de sorties un filtre permettant de transformer les sorties en de nouvelles entrées. A présent les sorties du système peuvent être considérées comme des entrées du système augmenté. Une méthode similaire à celle proposée pour la surveillance des actionneurs sur la base d'un ensemble d'observateurs adaptatifs va être présentée afin de surveiller les défauts dans les capteurs. Une étude en simulation sera faite sur les deux mêmes exemples et une comparaison des résultats clôturera ce chapitre.

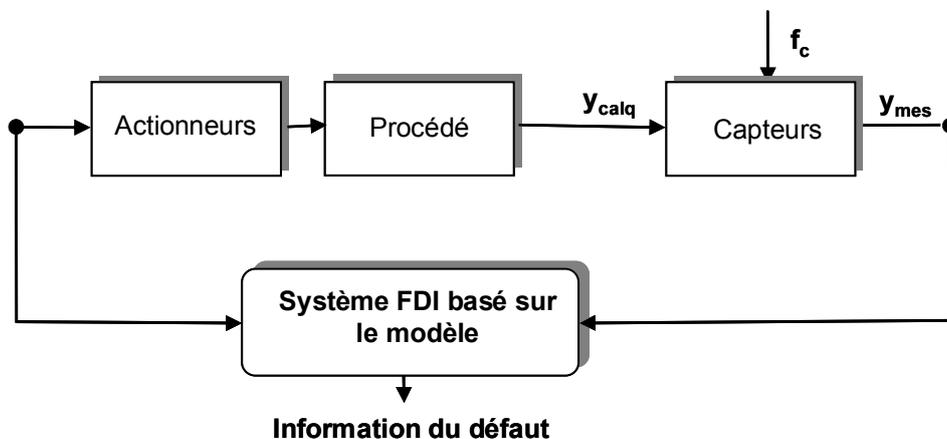


Figure 6.1 : Système de surveillance de défauts pour les capteurs

La figure 6.1 représente la structure générale d'un système de surveillance pour des défauts capteurs. Nous trouvons sur cette figure les signaux associés au capteur qui sont le défaut  $f_c$ , l'entrée du capteur  $y_{cal}$  et la sortie du capteur  $y_{mes}$ . L'information disponible est la sortie du capteur  $y_{mes}$  pour simplifier nous la noterons  $y$ .

## 6.1 Méthode à base d'observateurs adaptatifs classiques

Avant d'appliquer les algorithmes de FDI sur le système, nous allons examiner l'effet du défaut capteur sur le système via les sorties mesurées du système. Nous examinons seulement le cas de défaut capteur simple.

Tableau 6.1: Effet du défaut capteur

	$y_1$	$y_2$
Sans défaut	4,2	2,2
Défaut $f_{c1}$ sur $y_1$	4,6	2,2
Défaut $f_{c2}$ sur $y_2$	3,9	2,4

Tableau 6.2: Effet du défaut capteur

	$S_I$ (mg/l)	$S_S$ (mg/l)	$X_I$ (mg/l)	$X_S$ (mg/l)	$X_H$ (mg/l)	$S_O$ (mg/l)
Sans défaut	30	124	52,5	127,5	29	9,7
Défaut $f_{c1}$ sur $S_I$	30,4	124	52,5	128	30	9,7
Défaut $f_{c2}$ sur $S_S$	30	126	53	127	30	9,8
Défaut $f_{c3}$ sur $X_I$	30	123	54	127,5	30,5	9,8
Défaut $f_{c4}$ sur $X_S$	30	124	52,5	130	31	10
Défaut $f_{c5}$ sur $X_H$	30	123	53	128,5	29,5	9,7
Défaut $f_{c6}$ sur $S_O$	30	123	53	127	29	10,5

La structure du tableau 6.1 est la même que celle du tableau 5.1. Le système a deux sorties ; les valeurs des défauts que nous avons introduits aux niveaux des deux capteurs sont respectivement  $f_{c1} = 0,15$  et  $f_{c2} = 0,4$ . Nous constatons que le défaut du deuxième capteur affecte les deux sorties du système par contre le défaut de la première sortie est totalement découplé de la deuxième. Le tableau 6.2 résume les interactions des variables de sorties dans le cas du modèle de traitement des eaux usées. Les valeurs des défauts dans les capteurs sont

$f_{c1} = 3$ ,  $f_{c2} = 10$ ,  $f_{c3} = 5$ ,  $f_{c4} = 12$ ,  $f_{c5} = 5$  et  $f_{c6} = 1$ . Nous voyons que chaque défaut a un impact sur au moins trois sorties du système.

### 6.1.1 Présentation de la méthode

La classe de systèmes non linéaires, que nous allons étudier, est identique à celle donnée par le système (5.1). Nous traitons ici, seulement des défauts additifs abrupts c'est-à-dire  $y_j^f = y_j + f_{cj} = \theta_{cj}$  pour  $t \geq t_f$ ,  $j \in 1, 2, \dots, p$ , et  $\lim_{t \rightarrow \infty} |y_j(t) - \theta_{cj}| \neq 0$ , où  $f_{cj}$  est une constante et  $y_j^f$  est la sortie du  $j^{\text{ème}}$  capteur en défaut, tandis que  $y_j$  est la sortie lorsque ce capteur ne présente pas de défaut. En présence d'un défaut l'équation 5.2 peut être reformulée [Paviglianiti et Pierri (2006)] et nous obtenons :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = Cx + f_c \end{cases} \quad (6.1)$$

Où  $f_c \in \mathbb{R}^p$  est le vecteur de défauts du système et  $f_{cj}$  est un élément de ce vecteur. La matrice  $C$  peut être décomposée en  $p$  vecteur ligne  $C = [c_1^T \quad \dots \quad c_p^T]^T$ .

Nous considérons que le vecteur de défauts est un signal borné de la forme :

$$\|f_c\| \leq M \quad (6.2)$$

Où  $M$  est une constante positive connue et le vecteur  $f(x)$  satisfait la condition de Lipschitz [Zhang (2007)].

**Remarque 6.1** : le vecteur non linéaire  $f(x, t)$  satisfait la condition de Lipschitz si :

$$\|f(x_1, t) - f(x_2, t)\| \leq a \|x_1 - x_2\| \quad (6.3)$$

Où  $\|\cdot\|$  est la norme Euclidienne et  $a$  est la constante de Lipschitz.

**Remarque 6.2 :** Si  $f(x,t)$  satisfait la condition de Lipschitz, il existe une matrice symétrique définie positive  $P$  qui est solution de :

$$2e^T P(f(x_1,t) - f(x_2,t)) \leq a^2 e^T P P e + e^T e \quad (6.4)$$

Où  $e = x_1 - x_2$  est le vecteur d'erreur et  $a$  est la constante de Lipschitz définie précédemment pour la fonction  $f(x,t)$ .

Nous allons construire un ensemble d'observateurs adaptatifs dont le nombre va être égal au nombre de capteurs  $p$  du système. L'ensemble des observateurs aura la même forme que l'observateur basé sur la technique adaptative [Wang *et al.* (1997)] que nous avons analysé au paragraphe 4.6. La seule différence vient du fait que maintenant nous allons estimer la sortie du système [Rajamani et Ganguli (2004) et Chen et Saif (2007)] ; nous obtenons donc :

$$1 \leq i \leq p \begin{cases} \dot{\hat{x}}_i = f(x) + g(x)u + H_i(\hat{x}_i - x) \\ \hat{y}_i = [c_1 \hat{x}_i \quad \cdots \quad \hat{\theta}_{ci} \quad \cdots \quad c_p \hat{x}_i]^T \\ \dot{\hat{\theta}}_i = -2\gamma(\hat{x}_i - x)^T P_i c_i^T \end{cases} \quad (6.5)$$

où  $c_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  ligne de la matrice  $C$ .

Analysons cette méthodologie sur le même ensemble que celui du paragraphe 5.2 ; à présent considérons  $p = 4$ . Considérons que le défaut se situe au niveau du 1<sup>er</sup> capteur, le modèle en défaut s'exprime donc sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = [c_1 x \quad c_2 x \quad c_3 x \quad c_4 x]^T + [f_{c1} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \end{cases} \quad (6.6)$$

Définissons l'observateur permettant de surveiller le premier capteur :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = f(x) + g(x)u + H_1(\hat{x}_1 - x) \\ \hat{y}_1 = [\hat{\theta}_{c1} \quad c_2\hat{x}_1 \quad c_3\hat{x}_1 \quad c_4\hat{x}_1]^T \\ \dot{\hat{\theta}}_{c1} = -2\gamma(\hat{x}_1 - x)^T P_1 c_1^T \end{cases} \quad (6.7)$$

où  $\hat{x}_1$  est le vecteur d'état estimé et  $\hat{\theta}_{c1}$  est l'estimation du défaut correspondant au premier capteur. Les trois autres observateurs pour la surveillance des capteurs 2, 3 et 4 ont la même forme :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = f(x) + g(x)u + H_2(\hat{x}_2 - x) \\ \hat{y}_2 = [c_1\hat{x}_2 \quad \hat{\theta}_{c2} \quad c_3\hat{x}_2 \quad c_4\hat{x}_2]^T \\ \dot{\hat{\theta}}_{c2} = -2\gamma(\hat{x}_2 - x)^T P_2 c_2^T \end{cases} \quad (6.8)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_3 = f(x) + g(x)u + H_3(\hat{x}_3 - x) \\ \hat{y}_3 = [c_1\hat{x}_3 \quad c_2\hat{x}_3 \quad \hat{\theta}_{c3} \quad c_4\hat{x}_3]^T \\ \dot{\hat{\theta}}_{c3} = -2\gamma(\hat{x}_3 - x)^T P_3 c_3^T \end{cases} \quad (6.9)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_4 = f(x) + g(x)u + H_4(\hat{x}_4 - x) \\ \hat{y}_4 = [c_1\hat{x}_4 \quad c_2\hat{x}_4 \quad c_3\hat{x}_4 \quad \hat{\theta}_{c4}]^T \\ \dot{\hat{\theta}}_{c4} = -2\gamma(\hat{x}_4 - x)^T P_4 c_4^T \end{cases} \quad (6.10)$$

### 6.1.2 Application au modèle non linéaire académique

Nous considérons le même système non linéaire académique que celui du paragraphe 3.1 avec la même loi de commande. Un défaut capteur, sur un système en boucle ouverte, est très facile à localiser parce que les défauts sont totalement découplés des autres sorties du système. Par contre sur un système en boucle fermé, la localisation d'un défaut capteur est plus difficile à cause du retour d'information de la sortie sur les entrées du système. Plus le gain du contrôleur est important, plus fort est le couplage entre les sorties. Sur la figure 3.1 nous avons montré les

sorties du système et sur la figure 6.2 nous représentons les deux résidus associés à l'ensemble des observateurs dans le cas où il y n'a aucun défaut capteur. Les résidus convergent presque instantanément vers zéro et ils demeurent à cette valeur.

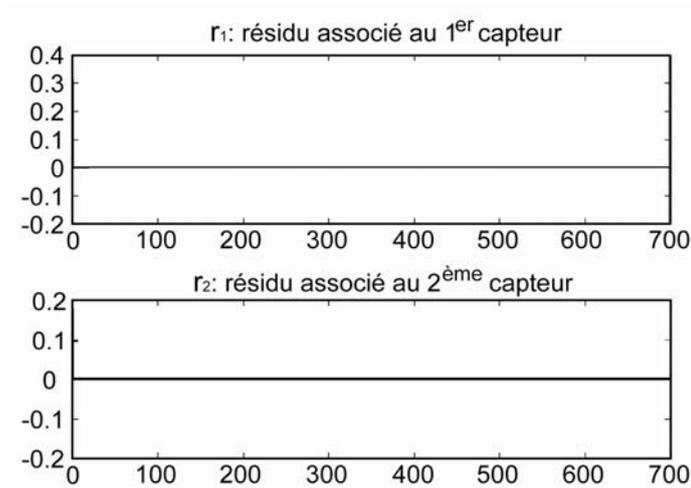


Figure 6.2 : Résidus sans défaut

Nous avons introduit un défaut capteur  $f_{c1}$  simple au temps  $t_f = 400$  jours sur le deuxième capteur ; la figure 6.3 regroupe les signaux issus des sorties du système et des résidus. La figure 6.2a nous donne les deux sorties du système  $y_1(t)$  et  $y_2(t)$ , elles sont stabilisées à une valeur constante jusqu'au temps  $t_f = 400$  ; nous voyons l'effet du défaut sur les deux sorties malgré que le défaut ait été introduit seulement sur la sortie  $y_1(t)$ . Les deux résidus  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  associés à l'ensemble des observateurs sont donnés sur la figure 6.3b. Le temps de phase transitoire des deux résidus est très court ; au temps  $t_f = 400$  où le défaut apparaît, les résidus quittent zéro, mais le résidu associé au deuxième observateur revient à zéro après une période de temps très courte. Le résidu associé au premier observateur se stabilise à une nouvelle valeur qu'il a obtenue. Le temps d'isolation de la méthode est aussi assez court.

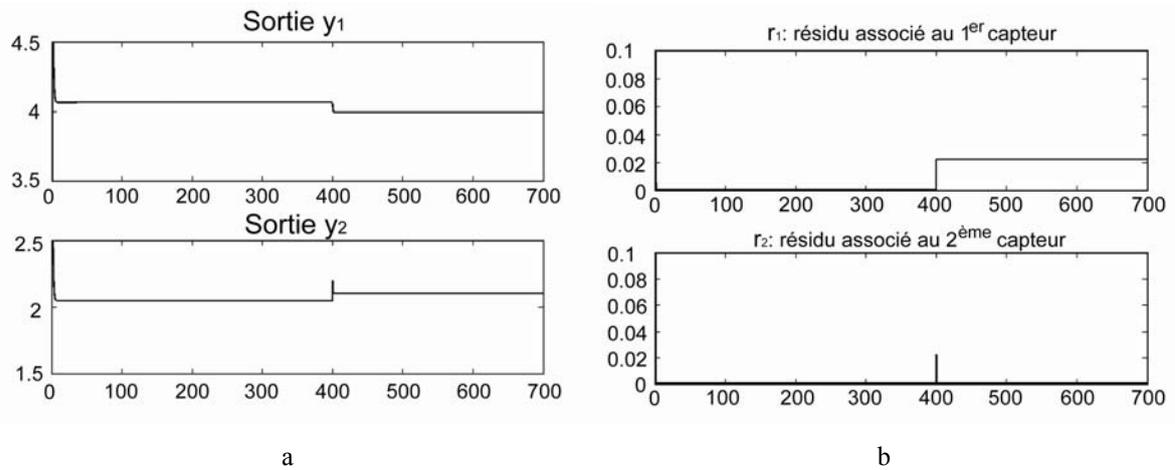


Figure 6.3 : Défaut simple (sur le deuxième capteur)

Sur la figure 6.4 nous montrons le cas où un défaut n'affecte que la sortie où il est introduit. Donc nous voyons (figure 6.4a) que la deuxième sortie n'est pas affectée par le défaut, cela signifie que la sortie  $y_1(t)$  est découplée de la sortie  $y_2(t)$ . La détection et l'isolation du défaut, dans ce cas, est beaucoup plus facile car il suffit d'examiner seulement la sortie du système. Néanmoins nous avons créé l'observateur correspondant au premier capteur ; la figure 6.4b récapitule les résultats pour le cas que nous venons de décrire.

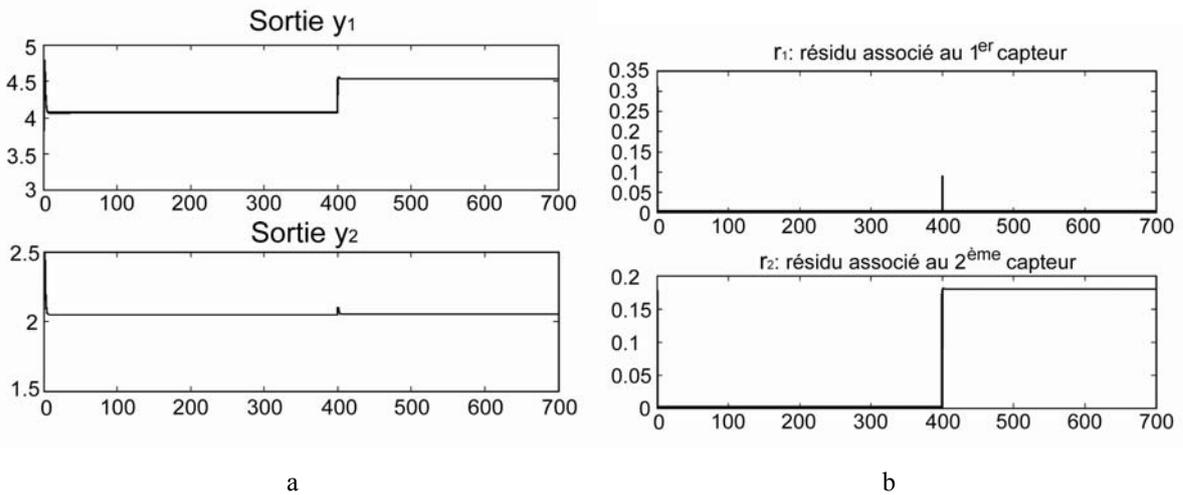


Figure 6.4 : Défaut simple (premier capteur)

### 6.1.3 Application au modèle de traitement des eaux usées

Dans ce paragraphe, nous montrons les résultats que nous avons obtenus en appliquant la méthode développée au modèle du système de traitement des eaux usées. Nous donnerons

les sorties du système, les six résidus associés aux six observateurs et finalement les estimations des défauts. Nous présentons d'abord le cas sans défaut sur les capteurs et après nous donnons les valeurs des matrices  $H_i$  et  $P_i$  et de la constante  $\gamma$  pour tous les ensembles d'observateurs. Ensuite, nous illustrons le cas d'un défaut simple et finalement nous montrerons les résultats en présence du bruit. Nous rappelons que seul des défauts additifs de capteurs peuvent se produire sur le système ; la valeur des défauts sera comprise entre 5% et 10% de la valeur réelle de la sortie.

L'algorithme de l'évaluation de résidus est identique à celui présenté dans paragraphe 5.1.3.1 sauf que cette fois nous avons six résidus à évaluer. Les six seuils pour l'évaluation sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= |r_1(t - \tau)| + 1 \\
 \delta_2 &= |r_2(t - \tau)| + 0,5 \\
 \delta_3 &= |r_3(t - \tau)| + 1 \\
 \delta_4 &= |r_4(t - \tau)| + 1 \\
 \delta_5 &= |r_5(t - \tau)| + 0,5 \\
 \delta_6 &= |r_6(t - \tau)| + 1
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

Le choix  $\tau = 3$  permet d'obtenir de résultats convenables comme nous l'avons décrit à la fin du chapitre 4. La *matrice de structure* a été définie au chapitre 3, ce qui permet d'obtenir la relation :

$$r_s = \begin{pmatrix} r_{s1} \\ r_{s2} \\ r_{s3} \\ r_{s4} \\ r_{s5} \\ r_{s6} \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \\ f_{c3} \\ f_{c4} \\ f_{c5} \\ f_{c6} \end{pmatrix} \tag{6.12}$$

### 6.1.3.1 Absence de défaut

Sur la figure 6.5 nous représentons les six résidus associés à l'ensemble des observateurs. Les valeurs initiales des résidus ne sont pas égales à zéro mais elles se stabilisent à zéro après la phase transitoire qui est assez courte.

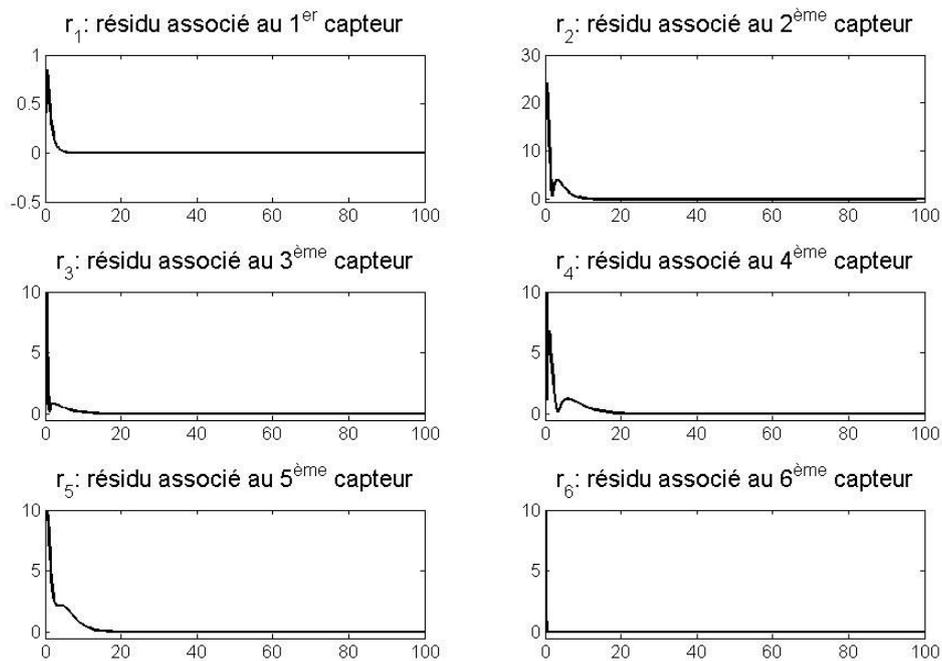


Figure 6.5 : Résidus des observateurs (sans défaut)

Le tableau 6.3 synthétise les valeurs des paramètres pour chaque observateur.

Tableau 6.3: Valeurs de  $H_i$ ,  $P_i$  et  $\gamma$

	Obs.1	Obs.2	Obs.3	Obs.4	Obs.5	Obs.6
$H_i$	$-3I_9$	$-4I_9$	$-3I_9$	$I_9$	$-5I_9$	$-4I_9$
$P_i$	$-10I_9$	$-6I_9$	$-12I_9$	$I_9$	$-10I_9$	$-5I_9$
$\gamma$	1	1	1	1	1	1

Le temps d'initialisation de chaque observateur est différent. Nous voyons que le sixième observateur converge vers zéro presque instantanément. Les autres observateurs convergent vers zéro beaucoup plus lentement. Dans ce cas nous considérons comme temps de la phase transitoire, le temps que met l'observateur le plus lent pour converger vers zéro. Ce qui

correspond à l'observateur lié au quatrième capteur et ce temps est égal  $t_{mi} = 19$  jours. Cela veut dire que nous pouvons détecter et isoler un défaut après ce temps.

### 6.1.3.2 Défauts simples

Nous avons introduit un défaut  $f_{c5} = 2$  au temps  $t_f = 60$  jours sur le cinquième capteur  $X_H$ .

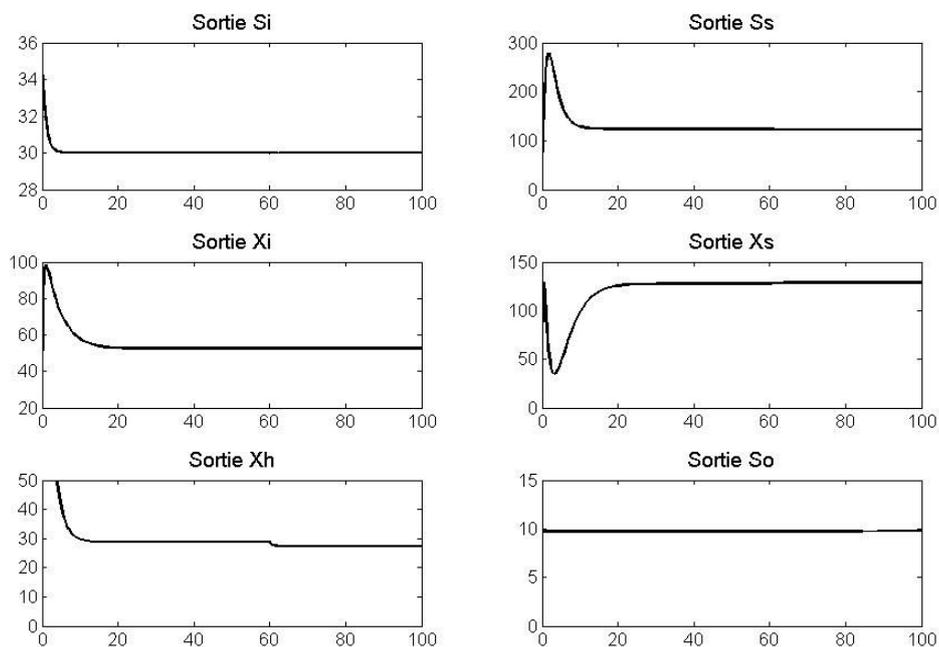


Figure 6.6 : Sorties du système (défaut simple)

La figure 6.6 décrit l'effet du défaut sur les six sorties du système. Le défaut ne provoque pas le même changement sur toutes les sorties du système mais, comme nous le constatons, il a provoqué un changement sur au moins trois sorties. Sur la figure 6.7, nous avons représenté les six résidus associés à l'ensemble des observateurs. A la suite de la phase transitoire et jusqu'au temps  $t_f = 60$  jours tous les résidus restent à zéro. Après ce temps, le défaut apparaît sur le système et tous les résidus quittent zéro ; le résidu associé au cinquième observateur revient à zéro après une période de temps très courte. Les cinq autres résidus convergent vers une nouvelle valeur différente de zéro assez rapidement. Par conséquent,

nous avons isolé le capteur en défaut correctement et rapidement. Le temps d'isolation est  $t_{iso} = 2$  jours car le défaut apparaît à  $t_f = 60$  jours est nous l'avons isolé à  $t_I = 62$  jours. Malheureusement, comme nous pouvons le constater, les résidus ne reviennent pas à leur valeur initiale zéro, et donc nous n'avons pas une réinitialisation de l'ensemble des observateurs et nous ne pouvons pas traiter ni les défauts multiples ni les défauts simultanés.

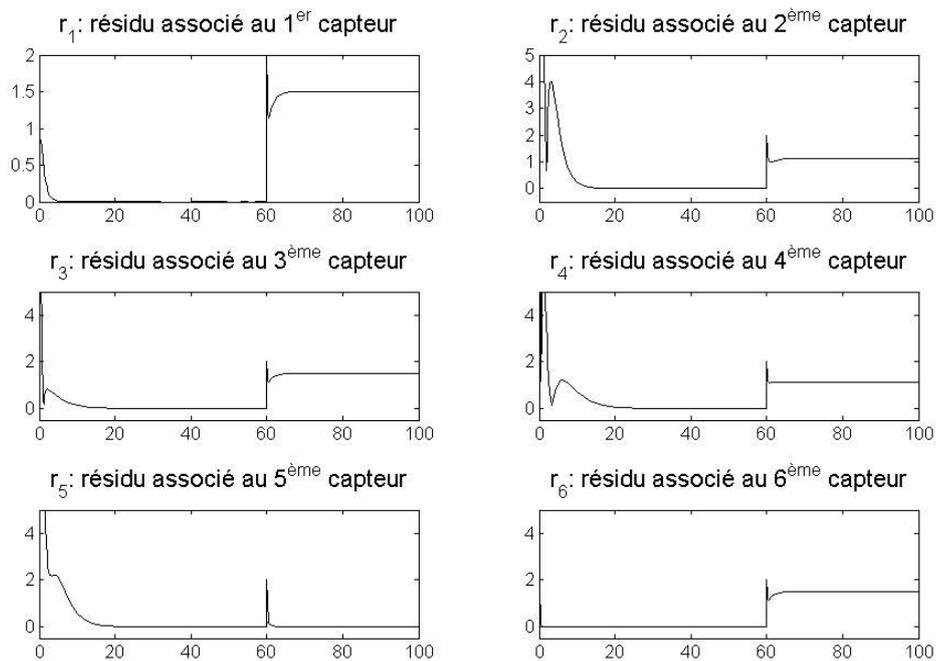


Figure 6.7 : Résidus des observateurs (défaut simple)

La figure 6.8 présente l'estimation de la taille de la faute  $\hat{f}_{c5}$  qui correspond à la différence entre la sortie du cinquième capteur  $X_H$  et l'estimation du défaut  $\hat{\theta}_{c5}$  fournie pour le cinquième observateur. Cette différence est égale à zéro mais au temps  $t_f = 60$  jours, l'instant où le défaut a été introduit, il quitte zéro et au temps  $t = 61,5$  jours et il converge vers une nouvelle valeur  $\hat{f}_{c5} = 2,1$  qui correspond à l'estimation du défaut. La valeur de l'estimation du défaut est très proche de sa valeur réelle  $f_{c5} = 2$ , nous pouvons considérer que l'estimation est précise et qu'elle peut être utilisée pour la reconfiguration du système de commande. Le temps d'estimation de la valeur du défaut est le même que celui de l'isolation.

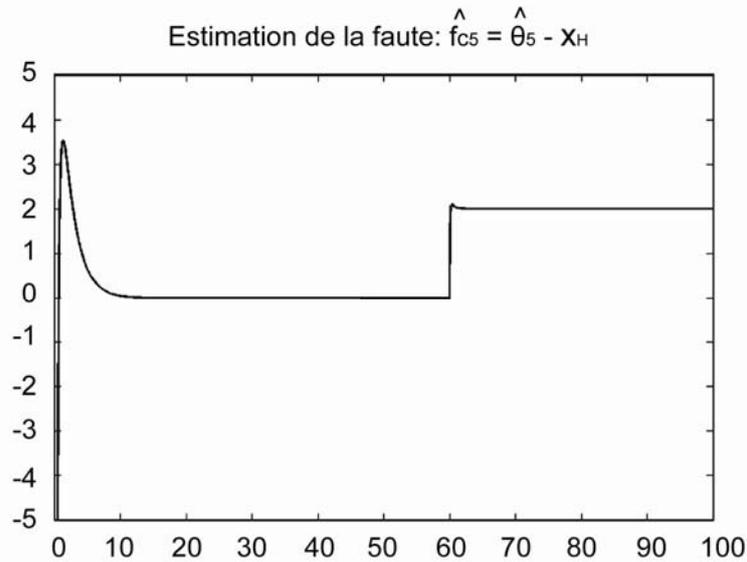


Figure 6.8 : Estimation du défaut

Le tableau 6.4 synthétise tous les cas possibles de défauts simples dans les capteurs pour le système considéré. Les trois premières colonnes caractérisent le défaut (capteur en défaut, l'instant du défaut  $t_f$  et l'amplitude du défaut  $f_c$ ), les trois colonnes suivantes quantifient les potentialités de la méthode (instant de détection  $t_D$ , instant d'isolation  $t_I$  et estimation du défaut  $\hat{f}_c$ ). La détection du défaut est instantanée car il suffit qu'un résidu quitte zéro pour que la détection soit faite. L'estimation de la valeur du défaut est très précise. En effet l'erreur d'estimation est comprise entre 1% et 5%, le temps d'estimation est le même que celui d'isolation.

Tableau 6.4: Défaut simple pour chaque capteur

capteur	Défaut		Détection	Isolation	Identification
	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude( $f_c$ ) (mg/l)	instant ( $t_D$ ) (jours)	instant ( $t_I$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_c$ ) (mg/l)
$S_I$	60	3	60	60,5	3
$S_S$	70	10	70	71,5	10,2
$X_I$	50	5	50	51	5
$X_S$	50	13	50	53,5	13,1
$X_h$	50	2	50	52	2,1
$S_O$	45	1	45	46	1

Le temps d'isolation est aussi très court ; tous les observateurs ont besoin de 1 à 2 jours pour isoler l'élément en défaut. L'observateur lié au quatrième capteur a besoin d'un peu plus de temps (3,5 jours) pour l'isolation. Ce temps ne pose pas un problème mais nous pouvons l'améliorer avec une meilleure optimisation des matrices de gain  $H_i$  et  $P_i$ . Nous venons de montrer que cette méthode est capable de détecter, d'isoler et d'identifier des défauts capteurs simples assez rapidement et avec une très bonne estimation de la taille du défaut. Les principaux inconvénients sont liés à la difficulté du calcul des matrices de gain  $H_i$  et  $P_i$  mais aussi au fait que nous ne puissions pas isoler de défauts multiples et simultanés.

### 6.1.3.3 Défauts simples en présence de bruit

Nous avons perturbé le signal mesuré avec un bruit blanc gaussien généré par ordinateur uniformément distribué de moyenne nulle et d'écart type 0,3

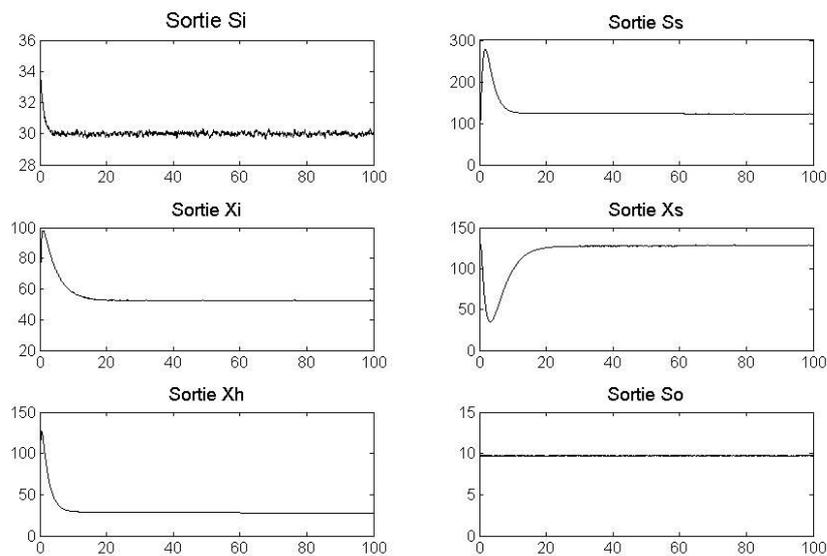


Figure 6.9 : Sorties du système en présence du bruit (défaut simple)

Nous avons introduit le même défaut qu'au paragraphe 6.1.3.2. Le défaut affecte les sorties du système comme dans le cas sans défaut. Nous pouvons dire que l'effet du défaut ne dépend pas du bruit de mesure (figure 6.9).

Sur la figure 6.10 nous représentons les résidus associés à l'ensemble des observateurs. Comme nous pouvons le constater, malgré la présence du bruit, les résidus convergent vers zéro avec le même temps d'initialisation. Ensuite, nous observons qu'au temps  $t_f = 60$  jours, ils ont la même réaction que les résidus du cas sans bruit (figure 6.7). Donc le capteur en défaut est bien détecté et isolé, en utilisant les observateurs adaptatifs classiques.

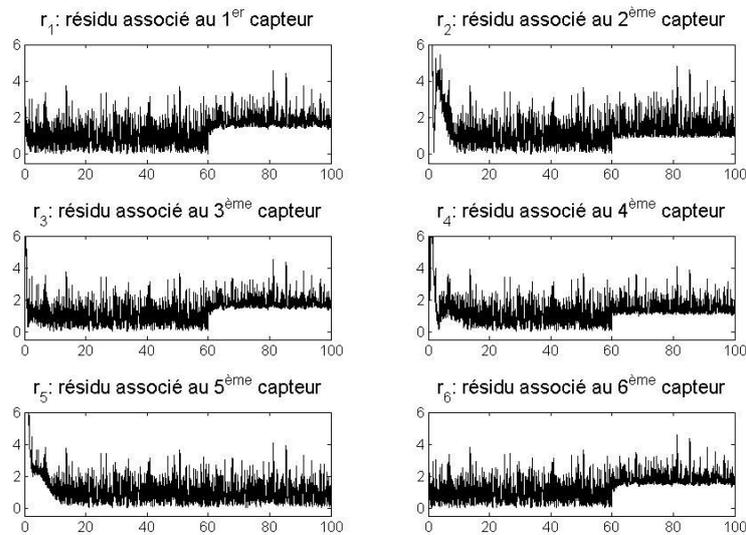


Figure 6.10 : Résidus des observateurs en présence du bruit (défaut simple)

Finalement sur la figure 6.11 nous présentons l'estimation de la valeur du défaut  $\hat{f}_{c5}$  où la valeur n'est pas très facile à identifier.

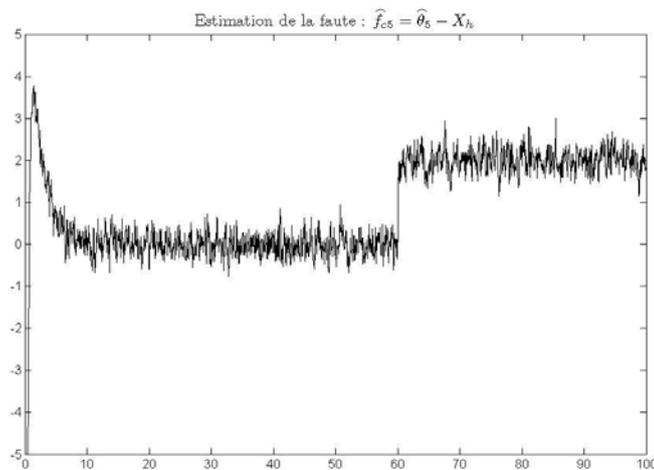


Figure 6.11 : Estimation du défaut en présence du bruit

Cependant, après  $t_f = 60$  jours, si l'on effectue une moyenne sur une fenêtre glissante, il est possible d'estimer la taille du défaut.

Tableau 6.5: Défaut simple pour chaque capteur (en présence du bruit)

capteur	Défaut		Détection	Isolation	Identification
	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_c$ ) (mg/l)	instant ( $t_D$ ) (jours)	instant ( $t_I$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_c$ ) (mg/l)
$S_I$	60	3	60	61,5	3,5
$S_S$	70	10	70	72	11
$X_I$	50	5	50	52,5	5,1
$X_S$	50	13	50	53,5	13,7
$X_h$	50	2	50	53	2,3
$S_O$	45	1	45	46,5	1,2

Le tableau 6.5 synthétise les résultats de FDI pour tous les défauts simples en présence de bruit. Les colonnes du tableau sont les mêmes que celles du tableau 6.4. La détection du défaut se fait toujours très rapidement, presque instantanément. Par contre, nous constatons que le temps d'isolation  $t_{iso}$  pour certains défauts est beaucoup plus long que dans le cas sans bruit. Par exemple le quatrième observateur a besoin 3,5 jours pour isoler le capteur en défaut  $X_S$ . Finalement l'erreur d'estimation est aussi plus grande et cette fois elle est comprise entre 5% et 20%.

## 6.2 Méthode basée sur l'augmentation d'espace

### 6.2.1 Présentation de la méthode

La classe de système non linéaire considéré est celle donnée par le système (5.1). Cette méthode n'est pas basée sur le développement d'un nouvel ensemble d'observateurs qui va nous donner le capteur ou les capteurs en défauts. Notre approche est basée sur une extension d'état qui modifie le système de telle manière que nous puissions considérer les sorties comme des entrées d'un système augmenté [Zhang et al. (2007)]. Ensuite, l'approche développée pour les défauts actionneurs (paragraphe 5.1) va être appliquée au nouveau

système augmenté et elle va nous permettre de détecter, isoler et identifier les défauts capteurs multiples et simultanés.

Chee et Edwards (2003) présentent une méthode pour les systèmes linéaires où le vecteur de sortie  $y$  subit une transformation par l'intermédiaire de deux matrices orthogonale  $T_{r,1}$  et  $T_{r,2}$  qui permettent une partition de la sortie en deux sous ensembles ;  $y_1 \in \mathfrak{R}^{p-h}$  et  $y_2 \in \mathfrak{R}^h$  où  $y_1$  représente les sorties sans défaut et  $y_2$  correspond aux sorties en défaut. Un traitement du vecteur de sortie similaire devient très difficile dans le cas de systèmes non linéaires que nous étudions. Par contre, il est possible de faire une augmentation d'espace comme le propose Chen et Saif (2006) pour la classe de systèmes non linéaires de la forme (5.1).

Nous allons donc appliquer cette méthodologie d'augmentation d'état avec quelques modifications pour la classe de systèmes que nous étudions. Pour cela, nous formons par l'intermédiaire de deux matrices  $A_f$  et  $B_f$  notre vecteur de sorties  $y$  :

$$\dot{\xi} = A_f \xi + B_f y \quad (6.13)$$

où  $A_f \in \mathfrak{R}^{p \times p}$  est choisie comme une matrice de Hurwitz,  $B_f \in \mathfrak{R}^{p \times p}$  est choisie comme une matrice inversible et  $\xi \in \mathfrak{R}^p$ . Ce qui permet de former la nouvelle entrée du système  $w = \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix}$

et de définir le nouveau système augmenté de la forme:

$$\begin{cases} \dot{z} = \underline{f}(x, \xi) + \underline{g}(x)w \\ y = [C \quad 0]z \end{cases} \quad (6.14)$$

où le vecteur  $z \in \mathfrak{R}^{n+p}$  est le nouveau vecteur d'état du système  $z = \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix}$ ,  $\underline{f}(x, \xi) \in \mathfrak{R}^{n+p}$  est un vecteur constitué d'éléments non linéaire et linéaire ; la partie non linéaire correspond à

$[\underline{f}_1(x, \xi) \cdots \underline{f}_n(x, \xi)]^T = f(x)$  et la partie linéaire est donnée par  $[\underline{f}_{n+1}(x, \xi) \cdots \underline{f}_{n+p}(x, \xi)]^T = A_f \xi$ . La matrice  $\underline{g}(x) \in \mathfrak{R}^{(n+p) \times (m+p)}$  est une matrice formée par des éléments non linéaires et linéaires où  $\underline{g}(x) = \begin{bmatrix} g(x) & \mathbf{0}_{n \times p} \\ \mathbf{0}_{p \times n} & B_f \end{bmatrix}$ .

Par l'intermédiaire de cette transformation nous avons augmenté notre système, le problème initial de surveillance d'un défaut capteur est devenu un problème de surveillance de défaut actionneur. Le vecteur de sorties du système  $y$  est devenu une partie du vecteur des entrées  $w$  du nouveau système  $w^T = [u_1 \cdots u_m \mid c_1 x \cdots c_p x]$ . Nous allons appliquer à ce nouveau système la méthodologie proposée au (5.1). Néanmoins cette fois nous pouvons traiter non seulement les défauts simples mais aussi les défauts multiples et simultanés. L'explication est assez simple car dans ce cas là, l'information que les capteurs nous donnent correspond à la sortie de l'élément en défaut et non à l'entrée de l'élément en défaut comme dans le cas des actionneurs (figure 6.12).

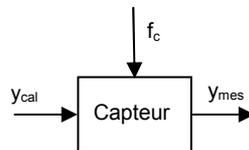


Figure 6.12 : Capteur en défaut

Cette augmentation d'espace, nous a permis de transformer les capteurs du système en des actionneurs. Mais en comparant la figure 6.12 avec la figure 5.11 nous constatons que nous disposons de la sortie de l'actionneur  $u_{appl}$ ; ce qui dans notre cas signifie que  $u_{appl} = y_{mes}$ .

Le résidu que nous proposons est l'opérateur différence entre l'estimation de chaque défaut  $\hat{\theta}_{ci}$  et la sortie correspondante du système  $cx_i$ , donc  $r_i = \hat{\theta}_{ci} - c_i x, i \in [1 \dots p]$ . Ce résidu nous permet de traiter non seulement les défauts simples mais aussi les défauts multiples et simultanés (Fragkoulis *et al* 2008b); de plus il nous donne directement l'estimation de la valeur du défaut. Ainsi les étapes pour cette nouvelle méthode de FDI sont :

1. Détermination du filtre.

2. Elaboration du nouveau modèle et du nouveau vecteur d'entrée  $w$ .
3. Construction d'une banque de  $p$  observateurs adaptatifs pour la FDI et l'identification du défaut.
4. Génération des résidus  $r_i$ .
5. Définition des seuils  $\delta_{ci}$  et construction de la matrice de structure  $\Phi$ .
6. Génération des résidus structurés  $r_s$ .
7. Estimation de la taille du défaut.

### 6.2.2 Application au modèle non linéaire académique

Nous considérons le même système que celui du paragraphe 3.1 et avec la même loi de commande. Pour appliquer l'algorithme d'augmentation d'espace, il faut choisir les deux matrices du filtre  $A_f \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$  et  $B_f \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$  appropriées de telle façon qu'elles assurent la stabilité du système augmenté; nous choisissons donc  $A_f = -2 * I_2$  et  $B_f = I_2$ . Les caractéristiques de l'ensemble des observateurs sont les mêmes que celles que nous avons utilisé pour l'exemple 5.1.1, à savoir  $P_i = 0,5 * I_3$ ,  $H_i = -5 * I_3$  et  $\gamma = 1$ . Sur la figure 6.13 nous avons représenté les deux résidus associés aux observateurs, nous constatons que la phase transitoire est assez courte.

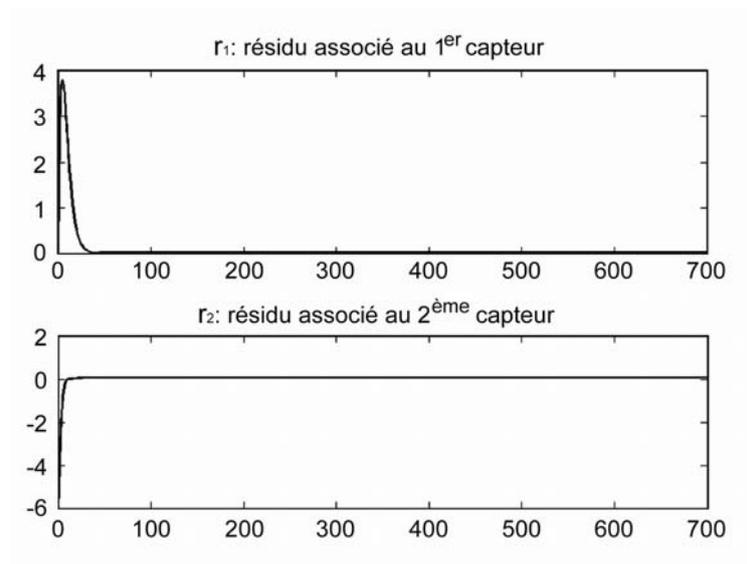


Figure 6.13 : résidus sans défaut

Nous allons appliquer un défaut  $f_{c2}$  simple au temps  $t_f = 400$  sur le deuxième capteur ; la figure 6.14 montre les deux résidus  $r_1(t)$  et  $r_2(t)$  associés à l'ensemble des observateurs.

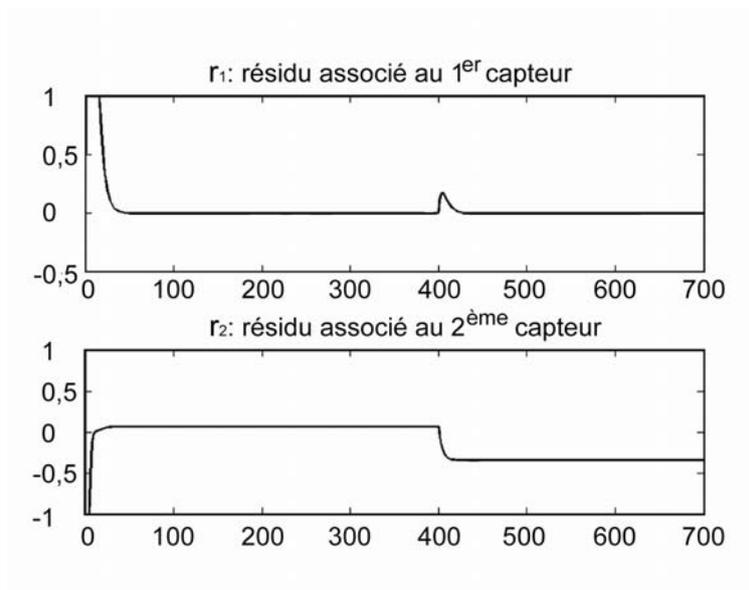


Figure 6.14 : résidus avec un défaut simple

Dans cette figure, nous constatons que le résidu  $r_1(t)$  associé au premier capteur reste à zéro pendant toute la durée, excepté au temps  $t_f = 400$  où pendant une courte période de temps il quitte zéro. Le résidu associé au deuxième capteur reste à zéro jusqu'au temps  $t_f = 400$  où le défaut est introduit et ensuite il se stabilise à une nouvelle valeur. Le défaut a donc été détecté et isolé très facilement et très rapidement. Le résidu du premier capteur demeure toujours à zéro après l'isolation. Cela veut dire que l'algorithme appliqué est capable de détecter et d'isoler un deuxième défaut sur les capteurs. La période de temps entre l'introduction du défaut et le retour des résidus à leurs valeurs initiales correspond au temps minimum entre deux défauts multiples.

### 6.2.3 Application au modèle du système de traitement des eaux usées

Avant la construction de l'observateur, nous devons créer le nouveau système augmenté en utilisant le filtre analysé précédemment. La matrice de Hurwitz a pour valeur  $A_f = -I_6$  et la matrice  $B_f = 2I_6$  doit être inversible. Le nouveau système est constitué de 15 états et 10 entrées ( $w^T = [Q_{in} \ Q_L \ Q_r \ Q_w \ S_I \ S_S \ X_I \ X_S \ X_H \ S_O]$ ); la sortie du système augmenté  $y$  est inchangée.

A partir de ce nouveau système nous pouvons construire l'algorithme pour la détection et l'isolation de défaut. Bien que nous ayons dix entrées, nous sommes intéressés seulement par la surveillance des défauts capteurs, nous créerons donc un ensemble de six observateurs (pour les entrées  $[w_5 \ \dots \ w_{10}]$ ). Nous donnons le modèle en défaut et les observateurs correspondants pour un défaut situé sur le premier capteur, *i.e.* le cinquième élément de  $w$  ( $w_5$ ). Le modèle défectueux est donné par le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{z} = \underline{f}(x, \xi) + \sum_{j \neq 5} \underline{g}_j(x) w_j + \underline{g}_5(x) \theta_{c5} \\ y = [C \ 0]z \end{cases} \quad (6.15)$$

où les vecteurs  $\underline{g}_1(x)$  jusqu'à  $\underline{g}_{10}(x)$  sont les dix colonnes de la matrice  $\underline{g}(x)$ . L'observateur correspondant est donné par :

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_5 = \underline{f}(x, \xi) + \sum_{j \neq 5} \underline{g}_j(x) w_j + \underline{g}_5(x) \hat{\theta}_5 + H_5(\hat{z}_5 - z) \\ \dot{\hat{\theta}}_5 = -2\gamma(\hat{z}_5 - z) P_5 \underline{g}_5(x) \\ \hat{y}_5 = [C \ 0] \hat{z}_5 \end{cases} \quad (6.16)$$

où  $\hat{z}_5$  est le vecteur d'état et  $\hat{\theta}_{c5}$  est l'estimation du défaut du cinquième observateur. Les deux matrices de gain sont  $H_5 = -4I_{15}$ ,  $P_5 = 10/3I_{15}$  et finalement la constante est  $\gamma = 1$ . Les cinq autres observateurs ont une structure similaire.

La taille des défauts capteurs sera comprise entre 5% et 10% de la valeur réelle définie par le capteur. Le système est un système en boucle fermée où un contrôleur proportionnel simple avec un gain constant  $K$  a été appliqué. Grâce à la boucle fermée les défauts n'affectent pas seulement les capteurs en défaut mais également la dynamique du système (et donc les autres sorties du système).

### 6.2.3.1 Absence de défaut

Nous supposons que seul des défauts additifs dans les capteurs peuvent se produire. Nous devons mentionner que dans le cas des défauts multiples, quand le deuxième défaut se produit le premier défaut agit toujours sur le système.

Les résidus des observateurs sans défaut sont donnés sur la figure 6.15 où nous notons que le temps d'initialisation de l'ensemble est très court ( $t_{ini} = 20$  jours). Comme nous l'avons déjà mentionné le temps de détection et d'isolation dépend des deux matrices  $H$  et  $P$ . Dans le tableau 6.6 nous fournissons les valeurs de ces matrices et de la constante  $\gamma$  pour les six observateurs.

Tableau 6.6: Valeurs de  $H_i$ ,  $P_i$  et  $\gamma$

	$H_i$	$P_i$	$\gamma$
Obs. 1	$-4I_{15}$	$10/3I_{15}$	1
Obs. 2	$-5I_{15}$	$5/3I_{15}$	1
Obs. 3	$-4I_{15}$	$5/3I_{15}$	1
Obs. 4	$-6I_{15}$	$5/6I_{15}$	1
Obs. 5	$-7/2I_{15}$	$5/3I_{15}$	1
Obs. 6	$-6I_{15}$	$5/6I_{15}$	1

La logique de l'évaluation est la même que celle du paragraphe 5.2.3. Cette fois nous avons 6 résidus et nous allons utiliser aussi le seuil adaptatif  $\delta_i = |r_i(t) + \tau| + c$ . La forme des seuils est :

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= |r_1(t) + \tau| + 1,2 \\
 \delta_2 &= |r_2(t) + \tau| + 0,7 \\
 \delta_3 &= |r_3(t) + \tau| + 2 \\
 \delta_4 &= |r_4(t) + \tau| + 2 \\
 \delta_5 &= |r_5(t) + \tau| + 1,4 \\
 \delta_6 &= |r_6(t) + \tau| + 0,4
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

Où  $\tau = 3$  et le vecteur de code de défaut  $\varepsilon^i(t)$  est le même que dans les cas précédents ce qui permet de construire la *matrice de structure* et de déterminer les résidus structurés :

$$r_s = \begin{pmatrix} r_{s1} \\ r_{s2} \\ r_{s3} \\ r_{s4} \\ r_{s5} \\ r_{s6} \end{pmatrix} \leftarrow - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \\ f_{c3} \\ f_{c4} \\ f_{c5} \\ f_{c6} \end{pmatrix} \tag{6.18}$$

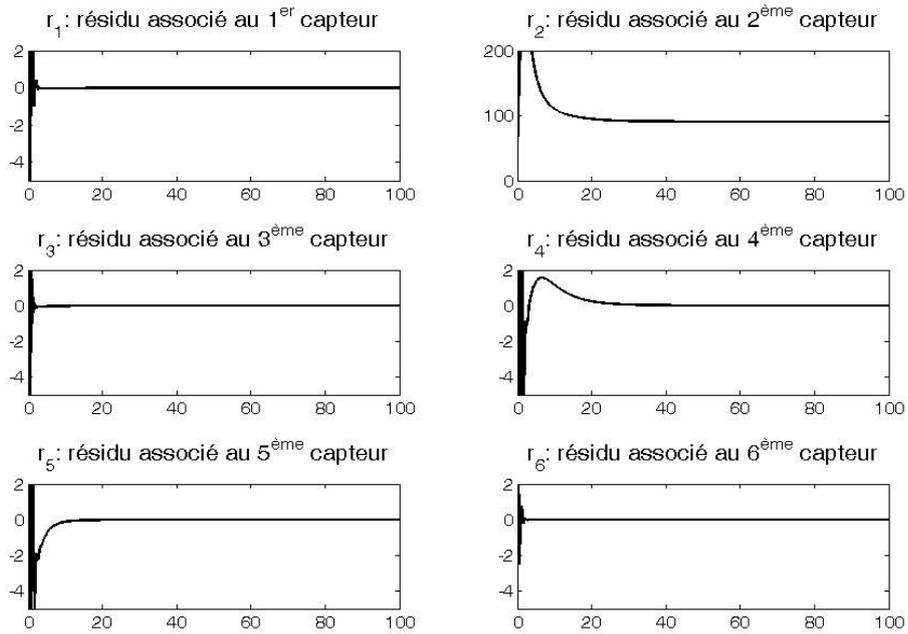


Figure 6.15 : Résidus des observateurs (sans défaut)

### 6.2.3.2 Défauts simples

Nous avons appliqué un défaut d'amplitude  $f_{c5} = 2,2$  aux temps  $t_f = 50$  jours sur le cinquième capteur. Sur la figure 6.16, nous présentons les six résidus associés à l'ensemble des observateurs. Après la phase transitoire tous les résidus convergent vers zéro ; au temps  $t_f = 50$  jours nous voyons que les six résidus quittent leur valeur initiale (zéro).

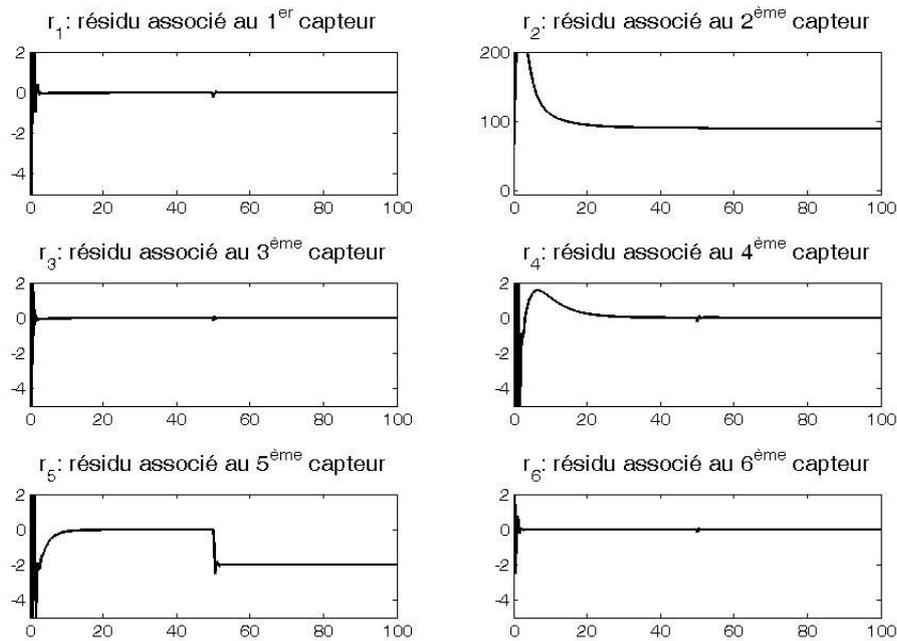


Figure 6.16 : Résidus des observateurs (défaut simple)

Après une période très courte tous reviennent à leur valeur initiale, excepté le résidu associé au cinquième observateur, qui correspond à la sortie  $X_H$ , qui se stabilise autour d'une nouvelle valeur constante (cinquième ligne de  $\Phi$ ). Nous avons isolé le résidu structuré  $r_{s5}$  qui correspond au capteur en défaut,  $X_H$ . Nous constatons que le dernier résidu qui converge vers zéro est le résidu  $r_1(t)$ , c'est donc lui qui conditionnera la détermination du temps d'isolation  $t_{iso}$  du défaut. Après ce temps, l'algorithme est capable de traiter un deuxième défaut ainsi  $t_{rei} = t_{iso}$  où  $t_{rei}$  est le temps de réinitialisation de l'ensemble. Nous avons isolé le capteur en défaut correctement et assez rapidement.

Comme nous l'avons déjà dit, cette méthode permet d'identifier également la valeur du défaut. Dans ce cas-ci, la valeur réelle du défaut est  $f_{c5} = 2,2$  et la valeur estimée est  $\hat{f}_{c5} = 2,1$  ainsi nous avons identifié la taille du défaut assez précisément.

Tableau 6.7: Défaut simple pour chaque capteur

Défaut		Détection	Isolation	Identification	Réinitialisation	
Capteur	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_c$ ) (mg/l)	instant ( $t_D$ ) (jours)	instant ( $t_I$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_c$ ) (mg/l)	instant ( $t_R$ ) (jours)
$S_I$	60	3	60	61	2,95	61
$S_S$	70	10	70	70,5	9,9	70,5
$X_I$	50	5	50	50,5	5	50,5
$X_S$	50	13	50	50,5	13	50,5
$X_h$	50	2	50	50,5	1,95	50,5
$S_O$	45	1	45	45	1	45

Tous les défauts simples qui peuvent apparaître sur le système sont donnés dans le tableau 6.7 et nous utilisons la méthode proposée pour leur localisation. Les trois premières colonnes donnent les caractéristiques du défaut (capteur en défaut, instant du défaut  $t_f$  et amplitude du défaut  $f_c$ ), elles sont les mêmes que celles du tableau 6.4. Les performances de la méthode de FDI sont quantifiées sur les colonnes suivantes (l'instant de détection  $t_D$  du défaut et l'instant d'isolation  $t_I$ ). Finalement les deux dernières colonnes correspondent à la valeur d'estimation du défaut  $\hat{f}_c$  et à l'instant de réinitialisation  $t_R$  de l'ensemble. Nous constatons que la détection du défaut est dans tous les cas presque instantanée. Le temps d'isolation du défaut est aussi très court pour tous les capteurs. L'isolation du défaut s'est faite entre 1 et 2 jours après son apparition. L'estimation du défaut est aussi assez précise et l'erreur d'estimation est comprise entre 1% et 2%. Finalement le temps pour que l'ensemble soit en mesure de traiter un deuxième défaut correspond au temps de réinitialisation.

### 6.2.3.3 Défauts multiples

Nous avons appliqué un défaut d'amplitude  $f_{c3} = 5$  aux temps  $t_{f1} = 50$  jours sur le troisième capteur  $X_I$  et un d'amplitude  $f_{c1} = 3$  sur le premier capteur  $S_I$  aux temps  $t_{f2} = 60$  jours. Le défaut du troisième capteur est toujours actif lorsque le défaut du premier capteur se produit.

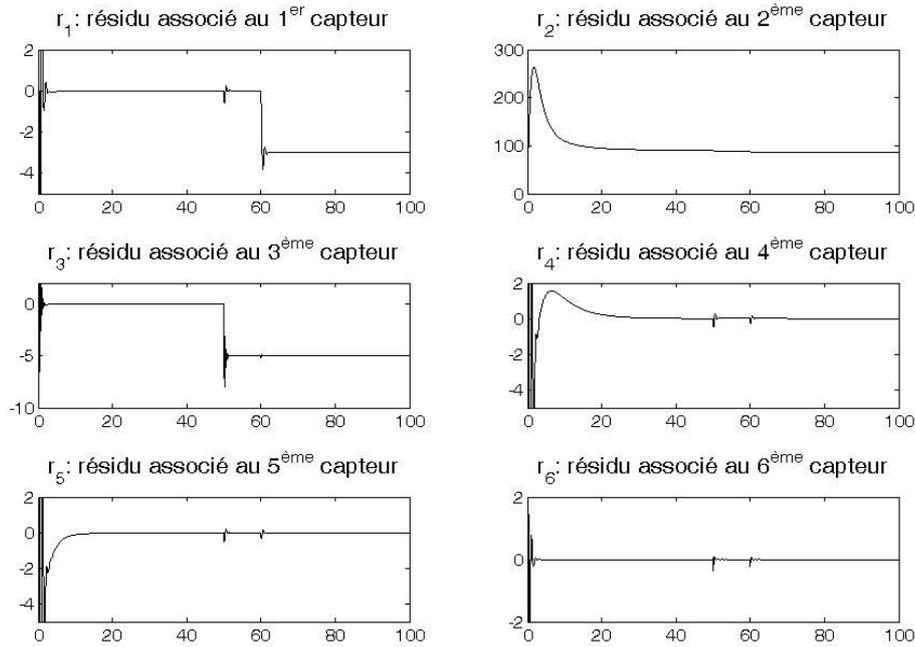


Figure 6.17 : Résidus des observateurs (défauts multiples)

La figure 6.17 montre, les six résidus associés aux observateurs après la phase transitoire ils ont une valeur constante jusqu'aux temps  $t_{f1} = 50$  jours. Tous les résidus quittent leurs valeurs initiales et seul le résidu associé au troisième observateur, qui correspond au troisième capteur, reste à sa nouvelle valeur. Les cinq autres résidus reviennent à leurs valeurs initiales. Au temps  $t_{f2} = 60$  jours, où le deuxième défaut a été introduit, le résidu qui correspond au premier capteur  $S_1$  quitte sa valeur initiale. Il reste à sa nouvelle valeur mais les quatre autres résidus quittent aussi leur valeur initiale et y retournent après une période de temps assez courte. Le troisième résidu, qui correspond au troisième capteur, n'a pas été affecté par ce nouveau défaut.

Plus généralement chaque défaut affecte seulement le résidu correspondant donc l'isolation des défauts multiples est possible. Concernant l'identification du défaut, pour le premier défaut l'estimation vaut  $\hat{f}_{c3} = 5$  et la valeur réelle est  $f_{c3} = 5$  ; pour le deuxième défaut l'estimation vaut  $\hat{f}_{c1} = 2,9$  et la valeur réelle est  $f_{c1} = 3$ . Ainsi nous avons une bonne

estimation du défaut dans le cas d'un défaut simple mais également pour des défauts multiples.

### 6.2.3.4 Défauts simultanés

Dans ce paragraphe, nous étudions le cas où plus d'un défaut se produisent en même temps sur le système (défauts simultanés). Nous avons appliqué deux défauts, un sur le quatrième capteur  $X_S$  d'amplitude  $f_{c4} = 13$  et un sur le sixième capteur  $S_O$  d'amplitude  $f_{c6} = 1$  en même temps à  $t_f = 50$  jours.

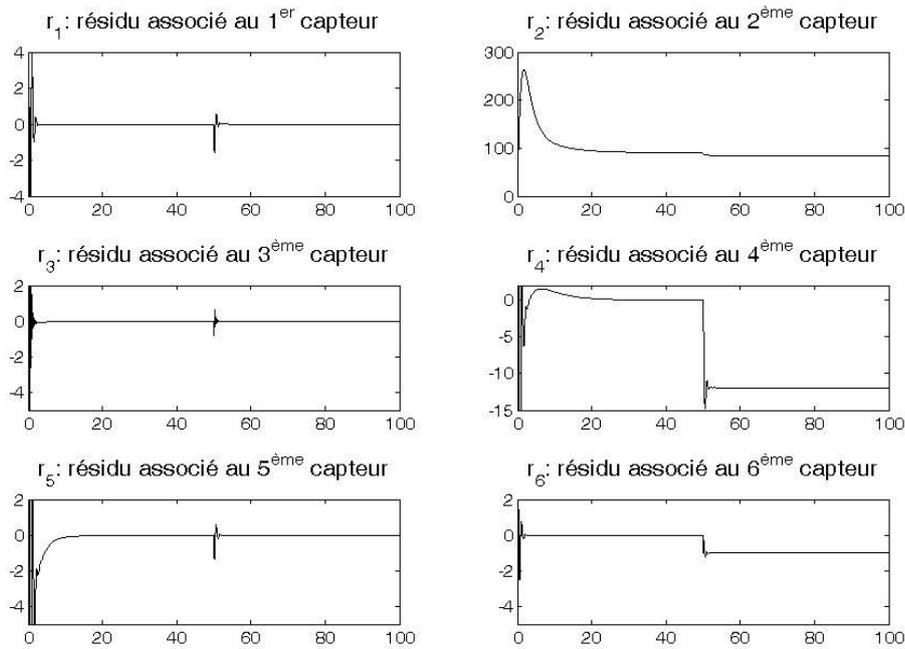


Figure 6.18 : Résidus des observateurs (défauts simultanés)

La figure 6.18 montre les résidus associés aux observateurs et nous pouvons voir qu'ils se stabilisent à une valeur constante jusqu'aux temps  $t_f = 50$  jours où les deux défauts se produisent. À ce moment-là, tous les résidus quittent leurs valeurs initiales et seuls les résidus associés au quatrième observateur et au sixième observateur restent à leur nouvelle valeur. Par contre, tous les autres retournent à leurs valeurs initiales. Par conséquent, nous avons isolé les deux capteurs en défaut. L'identification des deux défauts comme dans les exemples

précédents est tout à fait précise ainsi, pour le quatrième capteur l'estimation vaut  $\hat{f}_{c4} = 13$  et la valeur réelle du défaut est  $f_{c4} = 13$  ; pour le sixième capteur l'estimation vaut  $\hat{f}_{c6} = 1$  et la valeur réelle vaut  $f_{c6} = 1$ .

### 6.2.3.5 Défauts simples en présence bruit

Nous avons perturbé le signal mesuré avec un bruit blanc gaussien uniformément distribué de moyenne nulle et d'écart type 0,3. Nous considérons ici un défaut sur le premier capteur d'amplitude  $f_{c1} = 3$  aux temps  $t_f = 60$  jours.

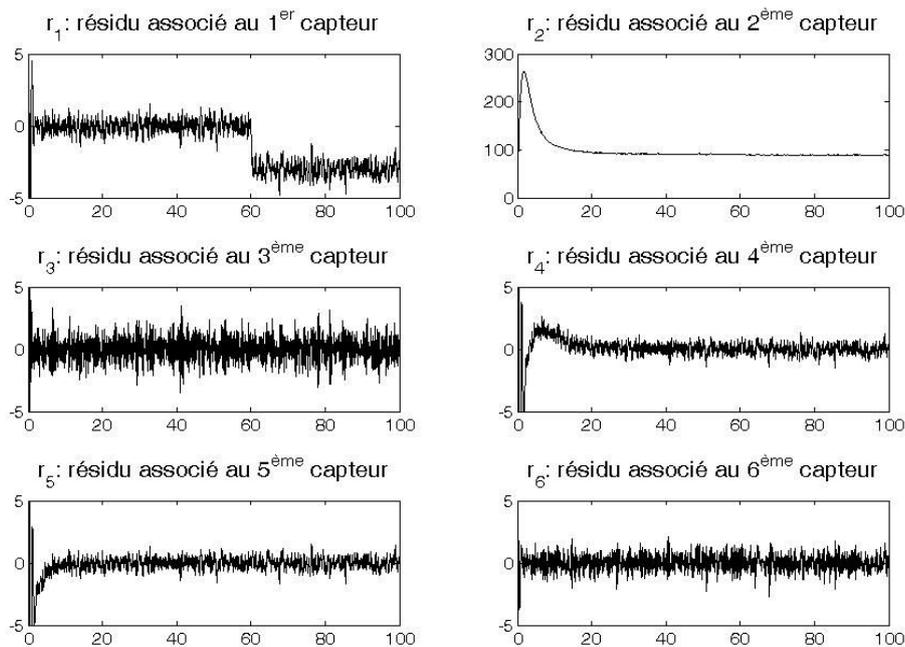


Figure 6.19 : Résidus des observateurs en présence du bruit (défaut simple)

Sur la figure 6.19, nous présentons les six résidus où au temps  $t_f = 60$  jours nous pouvons voir que tous les résidus quittent zéro. Après une période très courte, tous reviennent à leur valeur initiale, excepté le résidu associé au premier observateur (correspondant à la sortie  $S_I$ ) qui prend une nouvelle valeur constante. Ainsi, nous pouvons voir que la méthode peut détecter et isoler le défaut en présence de bruit de mesure. Pour l'identification du défaut

nous constatons que nous devons déterminer une moyenne sur une fenêtre glissante. L'estimation donne  $\hat{f}_{cl} = 2,85$  et la valeur réelle du défaut est  $f_{cl} = 3$ , nous constatons donc que les résultats de l'identification sont assez satisfaisants.

Tableau 6.8: Défaut simple pour chaque capteur (en présence du bruit)

Défaut			Détection	Isolation	Identification	Réinitialisation
capteur	instant ( $t_f$ ) (jours)	amplitude ( $f_c$ ) (mg/l)	instant ( $t_D$ ) (jours)	instant ( $t_I$ ) (jours)	valeur ( $\hat{f}_c$ ) (mg/l)	instant ( $t_R$ ) (jours)
$S_I$	60	3	60	61	2,8	61
$S_S$	70	10	70	70,5	9,7	70,5
$X_I$	50	5	50	50,5	5,3	50,5
$X_S$	50	13	50	50,5	13,4	50,5
$X_h$	50	2	50	50,5	1,9	50,5
$S_O$	45	1	45	45	0,95	45

Dans le tableau 6.8, nous donnons les résultats pour tous les défauts simples qui peuvent se produire sur le système en présence du bruit. Les colonnes du tableau sont les mêmes que celles du tableau 6.7. La seule différence entre les deux tableaux est qu'en présence de bruit l'erreur d'estimation de la valeur du défaut est beaucoup plus grande, elle est comprise entre 2% et 20%. Certains de ces résultats seront donc difficiles à l'utiliser pour la reconfiguration de la loi de commande.

### 6.3 Comparaison entre les deux méthodes

Nous allons comparer la méthode des observateurs classiques avec la méthode d'augmentation d'espace dans le cas de défauts capteurs simples avec et sans bruit de mesure. Les deux tableaux 6.4 et 6.7 nous donnent les propriétés du défaut et les caractéristiques des méthodes de FDI dans le cas sans bruit. Dans les tableaux 6.5 et 6.8 nous avons ces mêmes caractéristiques dans le cas avec bruit de mesure.

Dans le cas sans bruit, pour la détection de défauts les résultats sont les mêmes et nous pouvons considérer que la détection est instantané. Il faut rappeler que pour les deux méthodes, nous n'utilisons pas le même type de résidu. Pour la première méthode nous utilisons la norme 2 de la différence entre la sortie de l'observateur  $\hat{y}_i$  et la sortie du système  $y$ . Dans le cas de la méthode d'espace augmenté, nous utilisons directement le résidu de la différence entre l'estimation de la sortie considéré  $\hat{\theta}_i$  et la sortie du système  $c_i x$ . Dans les deux cas, l'estimation est assez précise et l'erreur d'estimation est comprise entre 0 et 5% pour la première méthode et entre 0 et 2,5% pour la deuxième. Le tableau 6.9 nous fournit l'erreur d'estimation pour tous les cas de défauts simples. La première colonne du tableau 6.9 donne le capteur qui contient le défaut ; les deux colonnes suivantes sont l'erreur d'estimation et le temps (en jours) pour l'isolation du défaut dans le cas des observateurs adaptatifs classiques. Les deux dernières colonnes donnent les mêmes caractéristiques mais cette fois pour la méthode d'augmentation d'espace.

Tableau 6.9: Performances des deux méthodes

Défaut	Méthode Classique		Méthode d'augmentation d'espace	
	erreur (%)	$t_{iso}$ (jours)	erreur (%)	$t_{iso}$ (jours)
$S_I$	0	0,5	1	1
$S_S$	2	1,5	1	0,5
$X_I$	0	1	0	0,5
$X_S$	1	3,5	0	0,5
$X_H$	5	2	2,5	0,5
$S_O$	0	1	0	0,5

Comme nous l'avons déjà signalé, l'estimation du défaut est presque la même ; nous voyons que pour tous les cas l'erreur est comprise entre 0 et 1% sauf dans le cas du cinquième capteur  $X_H$  où l'erreur de la première méthode est relativement importante 5%, cette différence n'est plus que de 2,5% pour la deuxième méthode. En ce qui concerne le temps d'isolation du défaut, les résultats des deux méthodes ne sont pas les mêmes. La méthode d'augmentation d'espace isole l'élément en défaut très rapidement, excepté pour le premier capteur qui a besoin de 1 jour, pour tous les autres capteurs nous isolons le défaut en moins

d'une journée. Pour la première méthode l'isolation est beaucoup plus lente, excepté pour le premier capteur.

Tableau 6.10: Performances de deux méthodes(en présence de bruit)

Défaut	Méthode Classique		Méthode d'augmentation d'espace	
	erreur (%)	$t_{iso}$ (jours)	erreur (%)	$t_{iso}$ (jours)
$S_I$	16	1,5	6	1
$S_S$	10	2	3	0,5
$X_I$	2	2,5	6	0,5
$X_S$	5	3,5	3	0,5
$X_H$	15	3	10	0,5
$S_O$	20	1,5	5	0,5

Les résultats du cas avec bruit de mesures sont donnés dans le tableau 6.10. Les caractéristiques du bruit sont données au paragraphe 6.2.3.5 et les colonnes du tableau sont les mêmes que celles du tableau 6.9. Le temps d'isolation de la méthode d'augmentation d'espace est identique avec le cas sans bruit. Par contre la méthode classique a besoin d'un peu plus de temps pour l'isolation. L'estimation du défaut est beaucoup plus influencée par le bruit. Pour la première méthode, nous avons une bonne identification pour le troisième et le quatrième capteur mais les autres résultats sont entachés d'une erreur assez importante entre 10 et 20%, laquelle peut provoquer des problèmes pour la commande tolérante aux fautes. Au contraire, la méthode d'augmentation d'espace donne une identification assez précise sauf pour le cinquième capteur, où nous avons une erreur de 10%, tous les autres résultats sont compris entre 3 et 5% valeurs légèrement supérieures au cas sans bruit.

En résumé : les deux méthodes détectent le défaut rapidement ; la méthode d'augmentation d'espace isole le défaut plus rapidement que la méthode classique avec et sans bruit de mesure ; les deux méthodes donnent une estimation précise de la valeur du défaut pour les cas sans bruit ; finalement en présence du bruit de mesure les estimations de la méthode d'augmentation d'espace sont beaucoup plus précises donc beaucoup plus utiles. Nous rappelons que la méthode classique ne peut pas traiter les cas de défauts multiples et simultanés alors que la seconde le fait aisément.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié deux méthodes pour surveiller les défauts dans les capteurs. Une méthode basée sur les observateurs adaptatifs classiques et une nouvelle méthode combinant une augmentation d'espace et des observateurs adaptatifs. Pour cette deuxième méthode, nous avons reformulé le problème initial de surveillance de défauts dans les capteurs en un problème de surveillance de défauts dans les actionneurs, en utilisant un filtre. Nous avons conçu un ensemble d'observateurs adaptatifs pour traiter la procédure de FDI.

Ces deux méthodes ont été appliquées à un modèle académique et à un modèle de procédé de traitement des eaux usées. Nous avons appliqué la première méthode sur ces deux exemples dans le cas d'un défaut simple sans et avec bruit de mesure. Ensuite, nous avons appliqué et testé la deuxième méthode avec un défaut simple puis avec des défauts multiples et simultanés. Nous avons montré l'efficacité de cette nouvelle méthode sur divers cas. Finalement nous avons comparé les deux approches et nous avons vu les avantages et les inconvénients de chacune.

## Conclusions et Perspectives

Dans cette thèse, nous avons focalisé notre étude sur les défauts additifs provenant d'actionneurs et de capteurs pour une classe de systèmes dynamiques continus non linéaires. Des algorithmes de détection, d'isolation et d'identification de défauts basés sur des observateurs adaptatifs ont été développés, en supposant que nous disposons de l'état du système, dans le cas d'un modèle non linéaire avec entrées affines pour des défauts simples et multiples. Nous avons supposé que seule une classe de défaut apparaisse chaque fois et que nous n'avons pas de défauts simultanés d'actionneurs. Les méthodes développées sont appliquées sur un exemple académique issu de la littérature et ensuite sur un système plus complexe qui est le modèle d'un procédé de traitement des eaux usées. Ce système a quatre entrées et six sorties ce qui nous conduit à surveiller quatre actionneurs et six capteurs.

Tout d'abord, nous avons traité les défauts provenant des actionneurs. Nous avons analysé et donné les résultats de simulation pour deux méthodes de détection, d'isolation et d'estimation de défaut basées sur les observateurs adaptatifs. La première méthode utilise les observateurs adaptatifs classiques qui sont souvent rencontrés dans la littérature. Dans cette approche nous créons une banque d'observateurs où chacun supervise une entrée du système. Les résultats que nous obtenons dans le cas d'un défaut simple nous montrent que nous avons bien détecté, isolé et identifié le défaut. La vitesse d'isolation est satisfaisante et l'estimation de la valeur du défaut est assez précise. La deuxième méthode est aussi basée sur les observateurs adaptatifs, mais elle a une structure différente, ce qui nous permet d'isoler des défauts multiples également. La méthode proposée fait dans un premier temps la détection et l'identification du défaut et ensuite sur la base des valeurs candidates, issues de l'identification, isole l'actionneur en défaut. Pour cela nous construisons une banque d'observateurs qui fait la détection du défaut et simultanément nous donne  $m$  valeurs

candidates pour l'identification du défaut. Ensuite nous construisons  $m$  nouveaux vecteurs d'entrées du système en utilisant les entrées initiales et les valeurs candidates. Finalement nous construisons une banque d'observateurs pour les  $m$  différents systèmes. Nous avons comparé les résultats de cette nouvelle approche avec les résultats de la première méthode pour le cas des défauts simples, multiples et simples avec bruit de mesures. La nouvelle approche isole les défauts beaucoup plus vite dans tous les cas et elle est capable de traiter des défauts multiples avec un petit délai entre les deux défauts. L'identification du défaut dans les deux méthodes pour le cas sans bruit est assez précise. Dans le cas avec bruit de mesure la méthode à base d'observateurs adaptatifs classiques fait une estimation du défaut assez précise, par contre l'estimation de la méthode de valeurs candidates contient une erreur importante.

Pour la suite, nous avons traité le problème de défauts provenant des capteurs. Comme dans le premier cas de défauts actionneurs un algorithme basé sur les observateurs adaptatifs a été développé. Une banque d'observateurs est construite où chaque observateur est dédié à une sortie du système. Avec cette méthode nous pouvons traiter les défauts simples et par les résultats obtenus nous concluons que l'isolation est rapide et que l'erreur d'estimation est assez petite. Un deuxième algorithme est proposé pour les défauts capteurs multiples. Avant de traiter ce problème, nous avons reformulé le modèle avec l'aide d'un filtre, ce qui a permis d'augmenter l'état du système et ainsi transformer les capteurs du système originel en actionneurs du nouveau système augmenté. Une méthode basée sur la création d'une banque d'observateurs non linéaires, comme la première méthode de défauts actionneurs où chaque observateur isole le défaut de chaque actionneur, a été appliquée. Les résultats de cette approche ont été comparés avec les résultats de la première méthodologie pour le cas des défauts simples, multiples, simultanés et simples avec bruit de mesures. Les avantages de la méthode proposée sont qu'il est possible de détecter, d'isoler et d'identifier les défauts simples, multiples et simultanés par contre la première approche est capable de traiter seulement les défauts simples. La vitesse d'isolation du défaut est aussi assez grande et dans tous les cas le temps d'isolation est plus court. Finalement l'erreur d'estimation de la taille du défaut est assez petite pour les deux méthodes dans tous les cas que nous avons examinés.

Les perspectives que nous pouvons envisager, par rapport aux résultats obtenus dans ce travail, sont :

- La conception d'un système de commande tolérante aux fautes (FTC) actif. Comme les méthodes développées isolent les éléments en défaut assez rapidement, estiment la valeur du défaut très précisément et peuvent traiter les cas de défauts simples et multiples, elles peuvent nous donner des résultats de FTC intéressants.
- Dans cette thèse nous avons pris en compte le bruit de mesure en ajoutant un bruit blanc et nous avons vu que l'utilisation de la première dérivée dans la méthode de valeur candidate provoque des problèmes sur l'estimation de la valeur du défaut. L'amélioration de cette estimation par l'utilisation de filtre ou par l'utilisation de différents types de dérivation pourraient nous donner de résultats plus précis.
- Les erreurs de modélisation sont un aspect assez important dans la pratique. Dans cette thèse nous n'avons pas considéré les problèmes des incertitudes du modèle. La prise en compte des incertitudes est essentielle pour l'application de nos méthodes à plusieurs classes de système.
- La détermination de quel élément (actionneur, capteur ou dynamique) est en défaut, avant l'isolation de l'élément défectueux, est un point essentiel pour le système non linéaire. C'est un aspect nouveau qui a été introduit par Chen et Saif (2008), pour les systèmes linéaire et les auteurs ont défini pour cela le vocable : isolation de la classe du défaut (FCI). Cela veut dire que nous faisons la détection du défaut et qu'en même temps nous déterminons la source du défaut (actionneur, capteur ou dynamique).
- L'utilisation d'autres observateurs non linéaires pour la détection/identification et pour l'isolation de défauts dans la méthode de valeurs candidates et la comparaison avec les résultats obtenus dans cette thèse devra nous permettre une meilleure évaluation de ce travail.
- La validation des méthodes de simulation développées sur le même modèle de traitement des eaux usées mais en utilisant des données réelles est un point très important qui va nous permettre d'exhiber la pertinence et la potentialité de notre approche sur une application pratique.



## Annexe

### Modèle de simulation d'un procédé de traitement des eaux usées par boues activées (PBM)

#### Modèle de réacteur

Afin d'évaluer la pertinence du module de diagnostic proposé, il est important d'utiliser un modèle qui simule de façon réaliste un « vrai » procédé. Nous avons donc choisi une variante du modèle [Nejjari (2001)] de traitement des eaux usées par boues actives ASM1 proposé par [Henze *et al.* (1987)]. Ce modèle est utilisé afin de modéliser chacun des réacteurs.

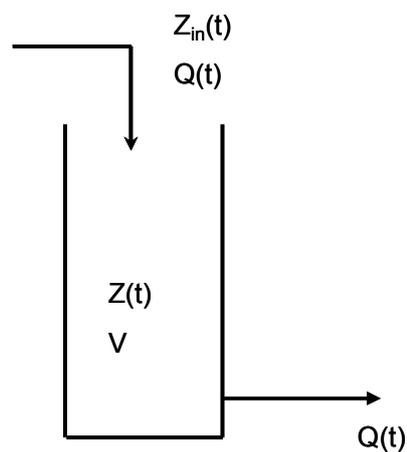


Figure A1 : Représentation schématique d'un réacteur

## Equations Différentielle

Pour un réacteur infiniment mélangé, dans le cas d'une croissance en culture continue, en supposant que la stœchiométrie de réaction conserve la masse, nous obtenons pour un composant général  $Z$  [Bastin et Dochain (1990)] :

$$\frac{dZ}{dt} = R_Z(t) + \frac{Q(t)}{V} (Z_{in}(t) - Z(t))$$

où  $Z_{in}$  est la concentration dans l'effluent d'entrée,  $Z(t)$  est la concentration dans le milieu,  $Q(t)$  représente le débit d'alimentation et de soutirage,  $V$  est le volume du réacteur et  $R_Z(t)$  représente la vitesse de réaction pour le composant  $Z$  étudié. Ce qui permet d'obtenir le modèle suivant pour le procédé considéré :

$$\begin{aligned} \frac{dS_I}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_r} (S_{I,in} - S_I) \\ \frac{dS_S}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_r} (S_{S,in} - S_S) - \frac{1}{Y_H} \mu_1 + \mu_3 \\ \frac{dX_I}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_r} (X_{I,in} - X_I) + \frac{Q_r}{V_r} (X_{I,rec} - X_I) + f_{X_I} \mu_2 \\ \frac{dX_S}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_r} (X_{S,in} - X_S) + \frac{Q_r}{V_r} (X_{S,rec} - X_S) + (1 - f_{X_I}) \mu_2 - \mu_3 \\ \frac{dX_H}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_r} (X_{H,in} - X_H) + \frac{Q_r}{V_r} (X_{H,rec} - X_H) + \mu_1 - \mu_2 \\ \frac{dS_O}{dt} &= \frac{Q_{in}}{V_r} (S_{O,in} - S_O) + Q_L \frac{\beta}{C_S} (C_S - S_O) - \frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu_1 \\ \frac{dX_{H,rec}}{dt} &= \frac{Q_{in} + Q_r}{V_{dec}} X_H - \frac{Q_r + Q_W}{V_{dec}} X_{H,rec} \\ \frac{dX_{I,rec}}{dt} &= \frac{Q_{in} + Q_r}{V_{dec}} X_I - \frac{Q_r + Q_W}{V_{dec}} X_{I,rec} \end{aligned}$$

$$\frac{dX_{S,rec}}{dt} = \frac{Q_{in} + Q_r}{V_{dec}} X_S - \frac{Q_r + Q_w}{V_{dec}} X_{S,rec}$$

Où, les vitesses spécifiques sont décrites par les relations :

$$\mu_1 = \mu_{H,max} \frac{S_S}{(K_S + S_S)} \frac{S_O}{(K_O + S_O)}$$

$$\mu_2 = b_H X_H$$

$$\mu_3 = K_H \frac{X_S}{(K_X X_H + X_S)} \frac{S_O}{(K_O + S_O)} X_H$$

**Remarque :** dans l'équation différentielle représentant l'évolution de l'oxygène dissous, le terme  $Q_L \frac{\beta}{C_S}$  représente le coefficient de transfert d'oxygène  $K_L a$ .

## Données pour la simulation

Les conditions initiales et les paramètres constitutifs du modèle par boues activées décrit par le système précédant sont reportés dans les deux tableaux ci-dessous. Le tableau A.1 fournit les valeurs des conditions initiales des diverses concentrations liées au bassin d'aération et au clarificateur. Le tableau A.2 regroupe les valeurs des paramètres cinétiques et stoechiométriques du modèle ASM1 utilisé ainsi que les conditions d'alimentation des différents composés.

Tableau A1 : Conditions initiales

Variabes	Valeur (mg/l)	Variabes	Valeur (mg/l)
$S_{I0}$	35	$S_{O0}$	2
$S_{S0}$	45	$X_{H,rec0}$	583
$X_{I0}$	25	$X_{I,rec0}$	339
$X_{S0}$	50	$X_{S,rec0}$	670
$X_{H0}$	43		

Tableau A2 : Conditions d'alimentation et valeurs des paramètres

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
$S_{I,in}$	30(mg/l)	$K_S$	20(mg/l)
$X_{I,in}$	25(mg/l)	$K_O$	0,2(mg/l)
$X_{S,in}$	125(mg/l)	$Y_H$	0,67
$X_{H,in}$	30(mg/l)	$f_{X_I}$	0,086
$S_{O,in}$	0,5(mg/l)	$K_H$	3(1/h)
$S_{S,in}$	50(mg/l)	$K_X$	0,03
$b_H$	0,62(1/h)	$C_S$	10(mg/l)
$\mu_{H\max}$	0,67(1/h)	$V_r$	2000(1/h)
$V_{dec}$	1500(l)	$\beta$	1(1/l)

**Variables et paramètres du modèle :**

$S_I(t)$  : Concentration de la matière organique soluble inerte (mg/l)

$S_S(t)$  : Concentration de substrat facilement biodégradable (mg/l)

$X_I(t)$  : Concentration de la matière organique particulaire inerte (mg/l)

$X_S(t)$  : Concentration de substrat lentement biodégradable (mg/l)

$X_H(t)$  : Concentration de biomasse hétérotrophe (mg/l)

$S_O(t)$  : Concentration de l'oxygène dissous (mg/l)

$X_{H,rec}(t)$  : Concentration de la biomasse hétérotrophe recyclée (mg/l)

$X_{I,rec}(t)$  : Concentration de la matière organique particulaire inerte recyclée (mg/l)

$X_{S,rec}(t)$  : Concentration de substrat lentement biodégradable recyclé (mg/l)

$S_{I,in}$  : Concentration de la matière organique soluble inerte dans l'alimentation (mg/l)

$S_{S,in}$  : Concentration de substrat facilement biodégradable dans l'alimentation (mg/l)

$X_{I,in}$  : Concentration de la matière organique particulaire inerte dans l'alimentation (mg/l)

$X_{S,in}$  : Concentration de substrat lentement biodégradable dans l'alimentation (mg/l)

$X_{H,in}$  : Concentration de biomasse hétérotrophe dans l'alimentation (mg/l)

$S_{O,in}$  : Concentration de l'oxygène dissous dans l'alimentation (mg/l)

$Q_{in}$  : Débit d'entrée (l/h)

- 
- $\mu_1(t)$  : Vitesse spécifique de croissance des hétérotrophe (1/h)
- $\mu_2(t)$  : Vitesse spécifique de mortalité des hétérotrophes (1/h)
- $\mu_3(t)$  : Vitesse spécifique d'hydrolyse de la matière organique absorbée (1/h)
- $b_H$  : Coefficient de mortalité des organismes hétérotrophes (1/h)
- $f_{XI}$  : Fraction de DCO inerte générée par de décès de la biomasse
- $Q_r$  : Débit du recyclage entre le décanteur et le réacteur (1/h)
- $Q_w$  : Débit de purge (1/h)
- $Y_h$  : Coefficient de rendement de la biomasse hétérotrophe
- $K_{La}$  : Coefficient de transfert d'oxygène (1/h)
- $Q_L$  : Débit d'air dans le bassin d'aération (1/h)
- $C_S$  : Constante de saturation de l'oxygène dissous (mg/l)
- $V_r$  : Volume du bassin d'aération (l)
- $V_{dec}$  : Volume du décanteur (l)
- $K_O$  : Coefficient de demi-saturation de l'oxygène pour la biomasse hétérotrophe (mg/l)
- $\mu_{H,max}$  : Taux de croissance maximal des micro-organismes hétérotrophes (1/h)
- $K_S$  : Coefficient de demi-saturation du substrat facilement biodégradable pour la biomasse hétérotrophe (mg/l)
- $K_H$  : Taux spécifique maximal pour l'hydrolyse (1/h)
- $K_X$  : Coefficient de demi-saturation pour l'hydrolyse du substrat lentement biodégradable
- $\beta$  : Constant strictement positive (1/l)



## Références bibliographiques

Åström, K. J., P. Albertos, M. Blanke, A. Isidori, R. Santz and W. Schaufelberger (2000). Control of Complex Systems, Springer Verlag.

Basseville, M. and I. V. Nikiforov (1993). Detection of Abrupt Changes: Theory and Application, *Information and System Science*, Prentice Hall, New York.

Basseville, M. and I. V. Nikiforov (1994). Statistical Change Detection, Prentice Hall.

Bastin, G. and M. Gevers (1998). Stable adaptive observers for non linear time varying systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 33(7), pp. 650-658.

Bastin, G. and D. Dochain (1990). On-line estimation and adaptive control of bioreactors, *Vol.1 of Process Measurements and Control*, Elsevier.

Ben Youssef, C. (1997). Benchmark of a waste-water treatment process, *Rapport LAAS N°97458*, Rapports de Contrat FAMINO.

Besançon, G. (2007). Nonlinear Observers and Applications, Springer.

Besançon, G. and A. Tiçlea (2007). Immersion-based observer design for rank-observable nonlinear systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 52(1), pp. 83-88.

Blanke, M. and T. F. Lootsma (1999). Adaptive Observer for Diesel Fault Detection in Ship Propulsion Benchmark, *Proceedings of the European Control Conference ECC'99*, August 31-September 3, Karlsruhe, Germany.

Blanke, M., M. Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki (2003). Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Springer-Verlag, Berlin.

Blom, H. and E. Bloem (2004). Particle filtering for stochastic hybrid systems, *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control CDC'04*, December 14-17, Atlantis, Paradise Island, Bahamas.

Bøgh, S. A. (1997). Fault Tolerant Control Systems - a Development Method and Real-Life Case Study, *PhD thesis*, Dept. of Control Eng., Aalborg University, Denmark.

- Bornard, G., F. Celle-Couernne and G. Gilles (1995). Observability and observers, *Nonlinear Systems – T.1, Modeling and Estimation*, pp. 173-216, Chapman & Hall, London.
- Bornard, G., N. Couernne and F. Celles (1988). Regularly persistent observer for bilinear systems, *New Trends in Nonlinear Control Theory*, pp. 130-140, Springer-Verlag, Berlin.
- Bornard, G. and H. Hammouri (2002). A graph approach to uniform observability of nonlinear multi output systems, *Proceedings of the 41nd Conference on Decision and Control CDD'02*, December 10-13, Las Vegas, Nevada USA.
- Boskovic, J. D. and R.K. Mehra (2001). A robust adaptive reconfigurable flight control scheme for accommodation of control effect failures, *Proceedings of the American Control Conference ACC'01*, June 25-27, Arlington, VA, pp. 1127-1132.
- Cassar, J. Ph., M. Staroswiecki and P. Declerck (1994). Structural Decomposition of Large Scale Systems for the Design of Failure Detection and Isolation Procedures, *Journal of Systems Science*, 20(1), pp. 31-42.
- Chee, P. T. and C. Edwards (2003). Sliding mode observers for reconstruction of simultaneous actuator and sensor faults, *Proceedings of the 42nd Conference on Decision and Control CDD'03*, December 9-12, Maui, USA.
- Chen, J. and R. J. Patton (1999). Robust Model-based Fault Diagnosis for Dynamic Systems, Kluwer Academic Publishers.
- Chen, W. and M. Saif (2005). An Actuator Fault Isolation Strategy for Linear and Nonlinear Systems, *Proceedings of the American Control Conference ACC'05*, June 8-10, Portland, OR, USA.
- Chen, W. and M. Saif (2006). Fault detection and isolation based on novel unknown input observer design, *Proceedings of the American Control Conference ACC'06*, June 14-16, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Chen, W. and M. Saif (2007). Adaptive Sensor Fault Detection and Isolation in Uncertain Systems, *Proceedings of the American Control Conference ACC'07*, July 11-13, New York City, USA.
- Chen, W. and M. Saif (2008). Fault Class Isolation Systems with Unknown Inputs, *Proceedings of the American Control Conference ACC'08*, June 11-13, Seattle, USA.
- Clark, R. N. (1994). State estimation schemes for instrument fault detection, *Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application*, Chap. 2, pp. 21-45, Prentice Hall.
- DePersis, C. (1999). A necessary condition and a backstepping observer for nonlinear fault detection, *Proceeding of the 38th Conference on Decision and Control CDD'99*, 7-10 December, Phoenix, Arizona USA.

- DePersis, C. and A. Isidori (1999). On the Problem of Residual Generation for Fault Detection in Nonlinear Systems and some related facts, *Proceedings of the European Control Conference ECC'99*, August 31-September 3, Karlsruhe, Germany.
- Deza, F., D. Bossanne, E. Busvelle, J. P. Gauthier and D. Rakotopara (1993). Exponential observers for nonlinear systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(3), pp. 482-484.
- Edwards, C. and S. Spurgeon (1994). On the development of a discontinuous observer, *International Journal of Control*, 59, pp. 1211-1229.
- Ekman, M. (2003) Urban Water Management - Modelling, Simulation and Control of the Activated Sludge Process, *Phd thesis*, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Fragkoulis, D., G. Roux and B. Dahhou (2007). Actuator fault isolation strategy to a waste water treatment process, *Conference on Systems and Control CSC'07*, Mai 16-18, Marrakech, Morocco.
- Fragkoulis, D., G. Roux and B. Dahhou (2007). A new scheme for detection, isolation and identification of single and multiple actuator faults, *International Conference on Prognostic and Health Management*, October 6-9, Denver, USA.
- Fragkoulis, D., G. Roux and B. Dahhou (2007). Sensor fault detection and isolation scheme for single and multiple faults, *Internal Report LAAS N°08317*.
- Frank, P. M. (1996). Analytical and Qualitative Model-based Fault Diagnosis - A Survey and Some New Results, *European Journal of Control*, 2(1), pp. 6-28.
- Frank, P. M., G. Schreier and E. A. García (1999). New Directions in Nonlinear Observer Design, *Chap. Nonlinear Observers for Fault Detection and Isolation*, pp. 399-422, Springer-Verlag, London.
- García, E. A. and P. M. Frank (1997). Deterministic Nonlinear Observer-Based Approaches to Fault Diagnosis: A Survey, *Control Engineering Practice*, 5(5), pp. 663-760.
- Gauthier, J. P., H. Hammouri and S. Othman (1992). A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 37(6), pp. 875-880.
- Gautier, J. P. and A. K. Kupka (1997). Deterministic observation theory and applications, Cambridge Univ. Press.
- Gauthier, J. P., and G. Bornard (1981). Observability for any  $u(t)$  of a class of nonlinear systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 26(4), pp. 922-926.
- Gelb, A. (1992). Applied optimal estimation, *MIT Press*, Cambridge.

- Gertler, J. J. (1993). Analytical redundancy methods in failure detection and isolation, *Control Theory and Advanced Technology*, 9(1), pp. 259-285.
- Gertler, J. J. (1998). *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, Marcel Dekker Inc.
- Gujer, W., M. Henze, T. Mino and M. C. M. van Loosdrecht (1999). Activated Sludge Process Model No. 3, *Water Science and Technology*, 39(1), pp. 183-193.
- Hammouri, H., M. Kinnaert and E. H. Yaagoubi (1998). Fault Detection and Isolation for State Affine Systems, *European Journal of Control* (4), pp. 2-16.
- Hammouri, H., M. Kinnaert and E. H. Yaagoubi (1999). Observer-Based Approach to Fault Detection and Isolation for Nonlinear Systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 44(10), pp. 1879–1884.
- Henze, M., C. P. Leslie Grady, W. Gujer, G. V. R. Maris and T. Matsuo (1987). Activated Sludge Process Model No. 1, *Scientific and Technical Report 1*, IAWQ, London, UK.
- Henze, M., W. Gujer, T. Mino, G. V. R. Marais and T. Matsuo (1995). Activated Sludge Process Model No. 2, *Scientific and Technical Report 3*, IAWQ, London, UK.
- Henze, M., W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wetzel, G. V. R. Marais and M. C. M. van Loosdrecht (1999). Activated Sludge Process Model No. 2d, *Water Science and Technology*, 39(1), pp. 165–182.
- Hermann, R. and A. J. Krener (1977). Nonlinear controllability and absorbability, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 22(5), pp. 728-740.
- Ibragimov, I. and R. Khasminskii (1981). *Statistical estimation: Asymptotic theory*, Springer Verlag.
- Ibrir, S. (2003). Online Exact Differentiation and Notion of Asymptotic Algebraic Observers , *IEEE Transaction on Automatic Control*, 48(11), pp. 2055-2060.
- Isermann, R. (1994). On the applicability of Model-based fault detection for technical processes, *Control Engineering Practice*, 2, pp. 439-450.
- Isermann, R. and P. Balle (1997). Trends in the Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes, *Control Engineering Practice*, 5(5), pp. 709-719.
- Isermann, R., R. Schwarz and S. Stolzl (2002). Fault-tolerant drive-by-wire systems, *IEEE Control Systems Magazine*, 22(5), pp. 64-81.
- Isermann, R., A. Schwarte and F. Kimmich (2004). Model based fault detection of a Diesel engine with turbo charger – a case study –, *IFAC Symposium Automotive Systems*, April 19-23, Salerno, Italy.

- Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems* (3rd edition), Springer Verlag.
- Izadi-Zamanabadi, R. and M. Blanke (1999). A Ship Propulsion System as a Benchmark for Fault-tolerant Control, *Control Engineering Practice*, 7(2), pp. 227-239.
- Jeppsson, U. (1996). Modeling aspects of wastewater treatment processes, *PhD thesis*, IEA, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- Kabbaj, N., A. Doncescu, B. Dahhou and G. Roux (2002). Wavelet based residual evaluation for fault detection and isolation, *17<sup>th</sup> IEEE Symposium on Intelligent Control*, September 16-19, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Kabbaj, N., M. Polit, B. Dahhou and G. Roux (2001). Adaptive observers based fault detection and isolation for an alcoholic fermentation process, *8<sup>th</sup> IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, October 15-18, 2(2), pp. 669-673, Antibes – Juan les Pins, France.
- Kabbaj, M. N. (2004). Développement d'algorithmes de détection et d'isolation de défauts pour la supervision des bioprocédés, *PhD thesis*, University of Perpignan, Perpignan, France.
- Kalachev, M. G. (1970). One method of multiple differentiation applied to a signal in automatic regulation systems, *Automation and Remote Control*, 6, pp. 890-896.
- Kalman, R. E. and R. S. Bucy (1961). New results in linear filtering and prediction theory, *Journal of Basic Engineering*, 83, pp. 95-108.
- Kiupel, N. and P. M. Frank (1997). A Fuzzy FDI Decision Making System for the Support of the Human Operator, *IFAC Safeprocess '97*, August 26-28, pp. 731-736, Hull, UK.
- Krener, A. J., and A. Isidori (1983). Linearization by output injection and nonlinear observers, *Systems & Control Letters*, 3, pp. 47-52.
- Kwakernaak H. and R. Silvan (1972). *Linear Optimal Control Systems*, Wiley-Interscience, New York.
- Köppen-Seliger, B. and P. M. Frank (1996). Neural Network in Model-Based Fault Diagnosis, *13th IFAC World Congress*, June 30-July 5, pp. 67-72, San Francisco, California, USA.
- Li, Z., N. Kabbaj, B. Dahhou and J. Aguilar-Martin (2003). Fault-tolerant control for non-linear dynamic systems, *IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control*, September 16-19, Seoul, Korea.
- Li, Z. (2006). Contribution à l'élaboration d'algorithmes d'isolation et d'identification de défauts dans les systèmes non linéaires, *PhD thesis*, INSA, Toulouse, France.
- Li, Z. and B. Dahhou (2006). Parameter intervals used for fault isolation in nonlinear dynamic systems, *International Journal of Modeling, Identification and Control*, 1(3), pp. 215-229.

- Li, Z. and B. Dahhou (2007). Fault Isolation for Nonlinear Dynamic Systems Based on Parameter Intervals, *International Journal of Systems Science*, 8(7), pp. 531-547.
- Luenberger D. G. (1966). Observer for multivariable systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11 (2), pp. 90-197.
- Lunze, J. (2000). Diagnosis of Quantised Systems, *IFAC Safeprocess'00*, June 14-16, pp. 28-39, Budapest, Hungary.
- Massoumnia, M. A., G. C. Verghese and A. S. Willsky (1989). Failure detection and identification, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 34(3), pp. 316-321.
- Marino R. and P. Tomei (1992). Global adaptive observers for nonlinear systems via filtered transformations, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 37(8), pp. 1239-1245.
- Mayne, D. Q. and H. Michalska (1992). Moving horizon observer based control, *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control CDC'92*, December 16-18, Tucson, Arizona, USA.
- Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures, *Ann. Rev. Microbiol.*, 3, pp. 371-394.
- Morel, E., B. Tartakovsky, R. Guiot and M. Perrier (2006). Design of a multi-model observer-based estimator for anaerobic reactor monitoring, *Computers & chemical engineering*, 31(2), pp. 78-85.
- Mulas, M. (2006). Modelling and Control of Activated Sludge Processes, *Phd thesis*, Università degli Studi di Cagliari, Cagliari, Italy.
- Nejjari, F. (1997). Modélisation, estimation et commande d'un bioprocédé de traitement des eaux usées, *Phd thesis*, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Morocco.
- Nejjari, F. (2001). Benchmark of an Activated Sludge Plant, *Internal report*, Terrassa, Spain.
- Nijmeijer, H. and T. I. Fossen (1999). *New Directions in Nonlinear Observer Design*, Springer-Verlag, London.
- Nyberg, M. (1999). Model Based Fault Diagnosis Methods, Theory, and Automotive Engine Applications, *PhD thesis*, Linköping University, Linköping, Sweden.
- Patton, R., P. Frank and R. Clark (1989). Fault diagnosis in Dynamic systems, *Systems and Control Engineering*, Prentice Hall.
- Patton, R. J. (1997). Fault Tolerant Control: The 1997 Situation, *IFAC Safeprocess'97*, August 26-28, pp. 1033-1055, Hull, United Kingdom.

- Paviglianiti, G. and F. Pierri (2006). Sensor Fault Detection and Isolation for Chemical Batch Reactors, *International Conference on Control Applications*, October 4-6, Munich, Germany.
- Rajamani, R. and A. Ganguli (2004). Sensor fault diagnosis for a class of nonlinear systems with unknown inputs, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 77(10), pp. 920-930.
- Rios Bolivar A. (2001). Sur la synthèse de filtres de détection de défaillances, *PhD thesis*, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Rocco, T., F. Szigeti and E. Colina-Morles, (2000). Generalized Luenberger observer-based fault-detection filter design: an industrial application, *Control Engineering Practice*, 8, pp. 665-671.
- Sastry, S. and M. Bodson (1989). Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness, Prentice-Hall International Editions.
- Schroder, D. (2000). Intelligent Observer and Control Design for Nonlinear Systems, Springer.
- Sreedhar, F., B. Fernandez and G. Y. Masada (1993). Robust Fault Detection in Nonlinear Systems Using Sliding Mode Observers, *IEEE Conference on Control Applications*, September 13-16, Vancouver, Canada.
- Staroswiecki, M. and P. Declerck (1989). Analytical redundancy in non-linear interconnected systems by means of structural analysis, *IFAC Advanced Information Processing in Automatic Control AIPAC'89*, July 3-5, 2, pp. 23-27, Nancy.
- Sussmann, H. J. (1979). Single input observability of continuous time systems, *Math. Systems Theory*, 12, pp. 371-393.
- Thein, M. W. and E. Misawa (1999). A Parallel Observer System for Multirate State Estimation, *Proceedings of the American Control Conference ACC'99*, June 2-4, San Diego, California, USA.
- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, K. Yin and S. N. Kavuri (2003). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods, *Computers and Chemical Engineering*, 27, pp. 293-311.
- Wang, H., Z. J. Huang and S. Daley (1997). On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis, *Automatica*, 33(2), pp. 217-225.
- Willsky, A. S. (1976). A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems, *Automatica*, 12(6), pp. 601-611.
- Xing-Gang, Y. and C. Edwards. (2005). Robust sliding mode observer-based actuator fault detection and isolation for a class of nonlinear systems, *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control CDC 05 and the European Control Conference ECC 05*, December 12-15, Seville, Spain.

Yau, S.-T. and G.-Q. Hu (2001). Finite-Dimensional Filters with Nonlinear Drift X: Explicit Solution of DMZ Equation, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 46(1), pp. 142-148.

Zhang, K., S. Hu and B. Jiang (2007). Sliding Mode Integral Observers for Sensor Faults Detection and Isolation in Nonlinear Systems, *IEEE International Conference on Control and Automation*, May 30-June 1, Guangzhou, China.

Zhang, Q. (1999). Fault detection and isolation based on adaptive observers for nonlinear dynamic systems, *Rapport technique 1261*, IRISA, Rennes, France.

Zhang, Q. (2000). A new residual generation and evaluation method for detection and isolation of faults in non-linear systems, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 14, pp. 759-773.

**TITLE:** Actuators and sensors faults detection and localisation:  
Application to nonlinear systems

---

**ABSTRACT:** In this thesis we were interested in fault detection, isolation and identification in a class of nonlinear continuous dynamic systems. We focused our study on the actuators and sensors additive faults. Algorithms of fault detection, isolation and identification, based on adaptive state observers, were developed. The first proposed algorithm treats the actuators faults and consists of two banks of adaptive observers whose structure is quite particular but enables us to isolate simple and multiple faults. The first bank is dedicated to fault detection and identification; then the second bank based on candidates values obtained from the previous observer isolates the faulty actuator. A second algorithm is proposed for the sensors faults. Before dealing with the problem, we reformulated the model by using a transformation filter, which augment the system's state and thus transform the sensors of the original system into actuators of the new augmented system. This second algorithm is based on the creation of a bank of nonlinear adaptive observers, where each one isolates the fault associated with each sensor. The advantages of the proposed method is that it can detect, isolate and identify simple, multiple and simultaneous faults. The validity of the two algorithms has been examined by using an academic model of the literature and a model of a waste water treatment process in the presence of measurement noise.





**AUTEUR** : Dimitrios FRAGKOULIS

**TITRE** : Détection et localisation des défauts provenant des capteurs et des actionneurs : application sur un système non linéaire

**DIRECTEURS DE THESE** : Boutaib DAHOU et Gilles ROUX

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE** : LAAS-CNRS 13 novembre 2008

---

**RESUME** : Dans cette thèse nous nous sommes intéressés à la détection, l'isolation et l'identification de défauts pour une classe de systèmes dynamiques continus non linéaires avec entrées affines. Nous avons focalisé notre étude sur les défauts additifs qui apparaissent au niveau des actionneurs et des capteurs. En supposant que nous disposons de l'état du système, des algorithmes de détection, d'isolation et d'identification de défauts basés sur des observateurs adaptatifs ont été développés. Le premier algorithme proposé traite les défauts actionneurs et est constitué de deux banques d'observateurs adaptatifs ayant une structure particulière qui nous permet d'isoler des défauts simples et multiples. La première banque est dédiée à la détection et l'identification du défaut ; ensuite sur la base des valeurs candidates, issues de l'identification, la deuxième banque isole l'actionneur en défaut. Un deuxième algorithme est proposé pour les défauts capteurs. Avant de traiter le problème, nous avons reformulé le modèle avec l'aide d'un filtre, ce qui a permis d'augmenter l'état du système et ainsi transformer les capteurs du système originel en actionneurs du nouveau système augmenté. Ce deuxième algorithme est basé sur la création d'une banque d'observateurs adaptatifs non linéaires, où chaque observateur isole le défaut associé à chaque capteur. Les avantages de la méthode proposée est qu'il ait possible de détecter, d'isoler et d'identifier les défauts simples, multiples et simultanés. La pertinence de ces deux algorithmes est examinée à partir de résultats de simulation obtenus sur un modèle académique de la littérature et sur un modèle d'un procédé de traitement des eaux usées en présence de bruit de mesure.

---

**MOTS-CLES** : Détection et Identification de défauts, Isolation de défauts, Systèmes non linéaires, Observateurs Adaptatifs, Défauts multiples, Traitement des eux.

---

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE** : AUTOMATIQUE

---

**INTITULE ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE** : LAAS-CNRS ; 7, avenue du colonel Roche 31077 Toulouse