

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Mémoire de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Automatique et Informatique Industriel**  
Spécialité : **Commande et diagnostic des systèmes industriels**

---

**Introduction à la surveillance des systèmes  
dynamiques hybrides : application sur un système à  
deux réservoirs**

---

Présenté par : **BOURIACHI FARES**

Sous la direction de : **KECHIDA SIHEM**



**JUIN 2011**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
مَنْ عَمِلَ صَالِحًا مَلَأْنَا لَهُ خَيْرًا  
مِنْهُ لِيُجْزِيَ اللَّهُ بِهِ  
الْعَالَمِينَ





## *Remerciements*

*Je tiens à remercier avant tout ALLAH le tous puissant, pour m'avoir éclairé le bon chemin et pour m'avoir donné tout ce que j'ai dans ma vie.*

*Cette étude a été menée sous la direction de la M<sup>elle</sup> "KECHIDA Sihem", MCA à l'université 08 mai 45 de Guelma, pour l'obtention du diplôme master 2 spécialité commande et diagnostic des systèmes industriels.*

*Un grand merci à M<sup>elle</sup> "KECHIDA Sihem" pour la confiance qu'elle m'a témoigné et l'entière liberté qu'elle m'a accordé tout le long de cette période de travail et pour ses conseils et remarques. Merci encore pour sa disponibilité et son immuable gentillesse qui ont été pour moi un réconfort et une aide précieuse pour l'aboutissement de ce travail et qu'elle trouve ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.*

*Je remercie également Monsieur le professeur "TEBBIKH Hicham" directeur de laboratoire de LAIG pour n'avoir ménagé aucun effort afin que les portes du labo me restent ouvertes.*

*Aussi, Merci à "TOLBI Bilal" et "BOURIACH Hamdi", pour leur aide et leurs conseils si précieux.*

*Mes plus vifs remerciements vont également à Mes parents qui se sont sacrifiés pour que mes années scolaires et universitaire se fassent dans des bonnes conditions.*

*Sans oublier de remercier vivement mes enseignants(es), durant les années universitaires.*

*Mes profonds remerciements à tous mes amies et collègues en particulier ceux et celles qui m'ont apportés un soutien moral et une amitié précieuse et inoubliable.*

*BOURIACHI Fares*

*À la mémoire de mes grands parents,  
À mes parents,  
À ma grande famille,  
À tous ceux et celles que j'aime,  
À ...*

---

## *Notations et Acronymes*

---

Listes des symboles et abréviations fréquemment utilisées dans le manuscrit.

<b>AH</b>	Automate Hybride
<b>FDI</b>	Fault Detection and Isolation
<b>GPF ou GdC</b>	Graphes de prédiction de fonctionnement Graphes des comportements
<b>GPDF ou GCD</b>	Graphes de prédiction de fonctionnement défaillant Graphes des comportements défaillants
<b>GPFN ou GCN</b>	Graphes de prédiction de fonctionnement normal Graphes des comportements normaux
<b>PWA systems</b>	Piecewise affine system
<b>SC</b>	Système continu
<b>SED</b>	Système a événement discrète
<b>RRA</b>	Relation de redondance analytique
<b>OBS (<math>C_i, A_i, S_i</math>)</b>	La matrice d'observabilité
<b>COM(<math>A_i, B_i, C_i, S_i</math>)</b>	La matrice de commandabilité

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la préparation de projet de fin études master en Automatique et informatique industriel à l'université de Guelma intitulé: Introduction à la surveillance des Systèmes dynamique hybrides.

Notre travail s'intéresse à la méthodologie de surveillance des procédés industriels à base de modèle, à savoir la surveillance des contraintes égalité et la surveillance des contraintes inégalité associées à chaque mode.

Les systèmes hybrides incluent à la fois des variables continues et discrètes. La dynamique continue est généralement fournie par des équations différentielles et algébriques alors que la partie discrète est modélisée par des automates ou des systèmes à transition. Le formalisme de modélisation adopté pour cette classe de systèmes s'appuie sur le modèle 'automate hybride' simulé en utilisant le Matlab (Simulink et Stateflow).

L'approche de diagnostic proposée est basée sur les Relations de Redondance Analytique. En se basant sur les propriétés structurelles des résidus, nous montrons comment les résidus d'élimination issus des RRA, permettent d'identifier le mode, et de contribuer à la détection et à la localisation des défaillances.

Mots clés : Modélisation et simulation des SDH, surveillance des SDH, Relation de redondance analytique, indicateur de défaut, génération de résidu.

## الخلاصة

هذا العمل يندرج ضمن التحضير لمشروع نهاية الدراسة لأجل نيل شهادة ماستر آليات و إعلام آلي صناعي-جامعة قالمة- تحت عنوان : مقدمة لتشخيص الأنظمة الديناميكية الهجينة .

عملنا يركز على منهجية مراقبة الأنظمة الصناعية المعقدة القائمة على نموذج، أي رصد قيود المساواة وعدم المساواة و مراقبة القيود المرتبطة بكل نمط.

الأنظمة الهجينة تشمل كلاً من المتغيرات المستمرة والمتقطعة. الديناميكا المستمرة نتحصل عليها بفضل معادلات تفاضلية جبرية بينما الجزء المتقطع يكون منمذج من قبل أنظمة التشغيل الذاتي أو التي تمر بمرحلة انتقالية. النمذجة الشكلية المعتمدة لهذه الفئة من الأنظمة القائمة على محاكاة النموذج "الآلي الهجين" تستخدم الماتلاب ( Simulink و Stateflow ).

يستند نهج التشخيص المقترح على علاقات التكرار التحليلية. على أساس الخصائص الهيكلية للرواسب، ونبين كيفية استنباط رواسب الحذف من العلاقة التكرارية التحليلية يسمح بتحديد النمط و المساهمة في اكتشاف وتحديد الخطأ

كلمات البحث : النمذجة والمحاكاة للأنظمة الديناميكية الهجينة، تشخيص الأنظمة الهجينة, العلاقات التكرارية التحليلية، مؤشر الخطأ، توليد الرواسب.

This work is part of the preparation of the final studies project master degree in automatic and computing Industrial science in Guelma University, entitled Introduction to Monitoring Systems dynamic hybrid.

Our work focuses on the methodology of monitoring industrial processes based on model, namely the monitoring of equality constraints and inequality constraints surveillance associated with each mode.

Hybrid systems include both continuous and discrete variables. The continuous dynamics is usually provided by differential equations and algebraic, while the discrete part is modeled by automata or transition systems. The modeling formalism adopted for this class of systems based on the model "hybrid automata" simulated using Matlab (Simulink and Stateflow).

The proposed diagnostic approach is based on analytical redundancy relations. Based on the structural properties of residues, we show how waste disposal from the RRA, identify the mode, and contribute to the detection and localization of failures.

Keywords: Modeling and simulation of SDH, monitoring of SDH, analytical redundancy relations, defect indicator, generation of residue.

## Liste des Figures

Figure1.1 : Générateur de résidus	05
Figure1.2 : L'observateur a entré inconnue	11
Figure1.3 : Sensibilité de la méthode à franchissement de seuils	13
Figure1.4 : Structure d'un système expert	16
Figure1.5 : Diagnostic d'un système avec l'approche par reconnaissance des formes	18
Figure 1.6 : Reconnaissance des formes par réseau de neurones	20
Figure 1.7 Technique du chien de garde	23
Figure 1.8 Principe de la surveillance séparée	24
Figure 2.1 : Système dynamique hybride	28
Figure 2.2 : Automate Hybride	33
Figure 2.3 : Réseau de Pétri hybride	34
Figure 2.4 Structure d'un modèle MLD	35
Figure 2.5 : système hydraulique à deux réservoirs	37
Figure 2.6 : Convention du signe des débits	39
Figure 2.7 : Les 4 configurations accessibles du système en exploitation	42
Figure 2.8 : Automate Hybride	42
Figure 2.9 : Schéma du bloc de télérupteur sur simulink	44
Figure 2.10 : schéma bloc du système physique	45
Figure 2.11 :Le schéma sous bloc du réservoir 1	45
Figure 2.12 : schéma bloc automate	46
Figure 2.13: Schéma global du système a deux réservoirs	47
Figure 2.14 : Évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs $R1$ et $R2$	48
Figure 2.15 : Séquence de mode	49
Figure 2.16 : Évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs $R1$ et $R2$ en changeant la configuration	50
Figure 2.17 : Séquence de mode en changeant la configuration physique du système	50

Figure 3.1 : GPFN et GPFD de profondeur 1	58
Figure 4.1 : GPFN de profondeur 1	78
Figure 4.1 : GPFD de profondeur 1	78
Figure 4.3: Évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs $R1$ et $R2$	85
Figure 4.4 : Séquence de mode	86
Figure 4.5 : évolution de niveaux $h_1$ et $h_2$ en présence de défaut $\Phi_{h_2}$	87
Figure 4.6 Résidus du mode 1 : Cas du système en fonctionnement normal	87
Figure 4.7 : Résidus du mode 2 : Cas du système en fonctionnement normal	88
Figure 4.8 : Résidus du mode 3 : Cas du système en fonctionnement normal	88
Figure 4.9 : l'évolution des modes en présence du défaut capteur $h_2$	89
Figure 4.10 : l'évolution des niveaux $h_1$ et $h_2$ en présence du défaut $\Phi_{C_3}$	90
Figure 4.11 : évolution des modes dans le cas défaillance du conduit $C_3$	91
Figure 12 : l'évolution des $h_1$ et $h_2$ en présence du défaut $\Phi_{C_3}$	92
Figure 4.14 : GPFN et GPFD en présence du défaut $\Phi_{C_3}$	93

## Liste des tableaux

Tab 1.1 : la table de signature	09
Tab 2.1 Paramètres du système considéré	37
Tab 3.1: Sous-ensembles de défauts associés à des situations de défaillances dans le mode $i$	57
Tab3.2 : Table des signatures théoriques pour l'identification du mode et la localisation de défauts dans ce mode	68
Tab 4.1 : Défaillances considérées	77
Tab 4.2 Ensemble des défauts détectables dans chaque mode $i$	77
Tab 4.3 : Signatures de défaillances influençant le mode 1	
Tab 4.4 : Tableau des signatures théoriques des défaillances dans les 4 modes	82
Tab 4.5 : les vecteurs d'écart des quatre modes	84
Tab 4.6 Mode réel	85

# Table des matières

Résumé	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Table des matières	iv
Introduction général	v
<b>Chapitre I. Rappels sur les méthodes de surveillance des systèmes dynamiques</b>	
1.1. Retour sur quelque définition	2
1.2. Approches de surveillance avec ou sans modèle du système continu	4
1.2.1 État d'art	4
1.2.2 Surveillance analytique (avec modèle)	4
1.2.3 Surveillance non analytique(ou sans modèle)	12
1.3 Surveillance des systèmes à évènements discrets	20
1.3.1 Tour d'horizon sur les méthodes de surveillance des SED	20
1.3.2 Les méthodes de surveillance des SED	21
1.4 Conclusion	24
<b>Chapitre II. Modélisation et Simulation d'un système dynamique hybride</b>	
2.1 Caractérisation des Systèmes Dynamiques Hybrides	28
2.1.1 Définition d'un SDH	28
2.1.2 Classe des SDH	30
2.2 Méthodes de modélisation des SDH	32
2.3 Modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs	36
2.4 Simulation d'un système hybride avec Simulink et Stateflow	43
2.5 Conclusion	51

### Chapitre III .Méthodologie de Surveillance des SDH

3.1	Modèle d'un système hybride et défaillance	53
3.2	Graphes de comportements normaux ou Graphes des prédicats	59
3.3	Surveillance des contraintes égalité dans un mode « i » donner	59
3.4	Surveillance des contraintes inégalité	59
3.5	Utilisation des résidus pour l'identification des modes	69
3.6	Conclusion	74

### Chapitre IV. Application de la méthodologie de surveillance

#### sur un système à deux réservoirs

4.1	Les graphes de prédiction	76
4.2	Surveillance des contraintes égalité et inégalité de chaque mode	79
4.3	Application de la méthodologie de surveillance	84
4.4	Scénarios de défauts	86
4.5	Conclusion	94
	Conclusion général et perspectives	vi
	Annexe	vii
	Bibliographie	viii

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Les systèmes automatisés sont constitués de composants en interaction. Chaque composant réalise une ou plusieurs fonctions (ou services) et contribue ainsi à la mission globale du système. La défaillance de l'un ou l'autre de ces éléments vient alors perturber plus ou moins fortement le comportement du système entraînant parfois un arrêt de la mission, voire des conséquences catastrophiques sur le système ou son environnement tant technique qu'humain.

Afin de pallier ces problèmes, un système de surveillance, couche logicielle et/ou matérielle, doit être implanté. L'objectif général d'un tel système est de fournir à chaque instant une information fiable de l'état du système lorsque celui-ci est en exploitation. En d'autres termes, la surveillance doit permettre de détecter précocement tout dysfonctionnement (on parlera par la suite de défaillance), de localiser le plus précisément possible l'élément incriminé et de fournir des informations précises sur la nature du problème et ses causes premières. Ces informations sont alors transmises à l'opérateur via une interface homme/machine. Des actions humaines ou automatiques pourront alors être entreprises suivant la gravité du problème et l'élément concerné.

Cependant De nombreux procédés industriels sont hybrides par nature, ce qui signifie que leur comportement résulte de l'évolution et de l'interaction de variables continues et de variables discrètes. Ces dernières années, ces systèmes ont fait l'objet d'importants travaux concernant la modélisation, la simulation, la vérification et la synthèse de lois de commandes (Branicky, 1996 ; Pettersson, 1999 ; Zaytoon and all, 1999).

Il n'existe que très peu de travaux actuellement concernant la surveillance des SDH en tenant compte des deux dynamiques continues et discrètes. L'objectif de nos travaux est d'illustrer une méthodologie de modélisation et de surveillance en utilisant conjointement des outils initialement dédiés à la surveillance des systèmes continus et d'autres spécifiques aux SED. La prise en compte explicite des deux dynamiques et de leurs couplages mutuels nécessite de développer une nouvelle

méthode de diagnostic combinant les deux types d'outils. De plus, de nouvelles propriétés relatives à la supervision, telle la discernabilité entre modes de fonctionnement, et de nouveaux concepts apparaissent du fait du caractère hybride des systèmes considérés.

Le manuscrit est organisé autour de 4 chapitres.

### **Chapitre I: Rappels sur les méthodes de surveillance des systèmes dynamiques**

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur le domaine de surveillance des systèmes dynamique. Il a pour objectif de faire un tour d'horizon sur les méthodes et techniques de surveillance avec ou sans modèle appliquées sur les systèmes continus et sur les systèmes à événements discretes

### **Chapitre II: Modélisation et simulation d'un système hybride**

Dans ce chapitre on a présenté les systèmes dynamiques hybrides. Tout d'abord, une description générale des SDH est réalisée dans le but d'illustrer les différentes classes de ces systèmes. Suite des outils de modélisation. ensuite nous avons appliqué la méthode de modélisation du système « le système à deux réservoir » en utilisant l'approche automate hybride, et en a simulé le système avec Matlab en utilisant Simulink et Stateflow

### **Chapitre III : Méthodologie de Surveillance des SDH**

Ce chapitre a pour objectif de présenter une méthode de surveillance des systèmes hybrides à base de modèle, à savoir la surveillance des contraintes égalité et la surveillance des contraintes inégalité associées à chaque mode.

Une méthodologie de surveillance est proposée afin d'organiser les tests de cohérence et de générer des hypothèses de défauts. Ces tests sont effectués de telle sorte que les observations continues et discrètes peuvent être confrontées avec les évolutions continues et discrètes prévues.

## **Chapitre IV: Application de la méthodologie de surveillance sur un système à deux réservoirs**

Ce dernier chapitre présente une illustration de la méthodologie de surveillance proposée dans le chapitre trois sur un système classiquement utilisé pour illustrer les problématiques de surveillance des SDH. Ce système hydraulique, constitué de deux réservoirs connectés entre eux par des conduits.

Enfin nous terminons ce mémoire par les conclusions générales et quelques perspectives liées à ce travail.

# Chapitre 1

## *Rappels sur les méthodes de surveillance des systèmes dynamiques*

### Résumé :

*Ce chapitre présente une étude bibliographique sur le domaine de surveillance des systèmes dynamique. Il a pour objectif de faire un tour d'horizon sur les méthodes et techniques de surveillance avec ou sans modèle appliquées sur les systèmes continus et sur les systèmes à événements discrets .*

### Abstract:

*This chapter presents a literature review on the field monitoring dynamic systems .It aims to be an overview on methods and technique of monitoring with or without model applied to continuous systems and discrete event systems.*

Sommaire

---

1.1 Définitions et terminologies	2
1.2 Approches de surveillance avec ou sans modèle des systèmes continus	4
1.2.1 Surveillance analytique (avec modèle)	4
a) Espace de parité	5
b) Relation de Redondance Analytique (RRA)	7
c) Observateurs et les filtres	
d) Estimation paramétrique	11
1.2.2 Surveillance non analytique(ou sans modèle)	12
1.2.2.1 Surveillance à base de traitement du signal	12
a) Outils statistique	12
b) L'analyse spectrale	14
1.2.2.2 Surveillance par intelligence artificielle	16
a) Systèmes experts	16
b) Reconnaissance de formes	17
c) Intelligence artificielle, réseaux de neurones	18
1.3 Surveillance des systèmes à évènements discrets	20
1.3.1 Méthodes de surveillance des SED	21
1.4 Conclusion	24

L'objectif de ce chapitre est de présenter une étude bibliographique sur les méthodes de surveillance. Après quelques définitions sur les terminologies employées dans ce domaine, nous présentons les principales méthodes et techniques de surveillance avec ou sans modèle appliquées sur les systèmes continus et sur les systèmes à événements discrets.

### **1.1 Définitions et terminologie**

Les définitions et la terminologie dans le domaine de la surveillance et du diagnostic de défauts font l'objet de nombreuses discussions entre les communautés discrètes et continues. La terminologie relative à ce domaine peut être trouvée dans (Rouchon, 92) pour les SED et (Isermann et Ballé, 97) pour les systèmes continus. Dans cette section, nous citons les définitions de quelques termes clés du domaine de la surveillance proposés par les deux communautés, et qui seront utilisés dans la suite de ce mémoire.

Défaillance, Défaut, Panne. On trouve de nombreuses définitions de ces termes dans la littérature. Dans ce mémoire nous prendrons les définitions suivantes :

- **Défaillance** ou panne est une anomalie fonctionnelle au sein du système, c'est à dire l'interruption permanente de la capacité d'un système à assurer intégralement une fonction requise dans des conditions opérationnelles spécifiées.
- **Défaut** est une déviation d'un paramètre caractéristique du système des conditions acceptables ou (et) standards entraînant la non vérification d'au moins une propriété.

Surveillance est une couche logicielle ou matérielle qui permet de déterminer les conditions physiques d'un système en temps réel, c'est à dire l'état réel dans lequel le système se trouve. Le principe général est de comparer le comportement en ligne du système avec le comportement donné par une référence : modèle analytique, base de données, caractéristiques de signaux.

La surveillance peut être plus ou moins précise et complète. Elle réalise plus ou moins précisément : la détection des défaillances, la localisation du ou des éléments physiques défaillants et l'identification des défaillances.

- **Détection** c'est constater un (ou plusieurs) défaut(s) dans le système et déterminer l'instant de son (leurs) apparition(s). La qualité de la détection est déterminée en considérant les taux de fausses alarmes et de non détections.
- **Localisation** c'est déterminer le ou les éléments défaillants. La localisation peut être plus ou moins fine, précise. Dans la plupart des cas, il sera impossible de déterminer précisément l'élément défaillant. Par contre la fonction de localisation permettra de déterminer un sous-ensemble de candidats, c'est à dire d'éléments physiques susceptibles d'être en défaut.
- **Identification** c'est estimer les caractéristiques statiques et dynamiques de ce défaut : amplitude permanente, évolution dynamique du défaut.
- **Diagnostic** c'est Détermination du type, de la taille, de l'endroit et de l'instant d'apparition d'un défaut. Le diagnostic inclut la localisation et l'identification d'un défaut (Isermann et Ballé ,97).
- **Conflit**, candidat apparaît lorsqu'une incohérence entre le fonctionnement d'un ensemble d'éléments et leur fonctionnement attendu est constatée (Kleer et al, 95). Le conflit est la réunion des éléments de cet ensemble qui ne peuvent pas tous fonctionner correctement à la fois tandis qu'un candidat est un ensemble d'hypothèses sur le mauvais fonctionnement des éléments d'un système physique qui permet de lever les conflits.
- **Supervision** est une macro-fonction incluant des tâches de commande et de surveillance. Dans un cadre général, la supervision doit piloter l'exécution de la séquence d'opérations et assurer la gestion et la commande en temps réel des ressources nécessaires à cette exécution (Dubois and Gentil, 90) et ceci que le système fonctionne de manière nominale ou présente des défaillances. La supervision doit donc adapter la commande en fonction de l'état du système. Ceci suppose un module de surveillance performant qui détecte et diagnostique précisément la défaillance (EL Mezyani, 05).

## 1.2 Les approches de diagnostic avec ou sans modèle

Les méthodologies de surveillance sont généralement divisées en deux groupes méthodologies de surveillance avec modèle et sans modèle (Dash et al, 2000).

Les premières se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent généralement les techniques de l'automatique suivant : Relations de Redondance Analytique (Gertler, 91 ; Patton et al, 91 ; Cocquempot et al ,04 ; Willsky et al, 84 ; 93) et l'espace de parité (Gertler et al, 03 ; Maquin ,97) et l'approche à base d'Observateurs et les Filtres, on peut citer les travaux de ( Gertler, 88 ; Frank et al ,94 ; Viswanadham, 87 ; Magni et Mouyon , 94 ; Edwards et Patton, 00 ; Balluchi et al, 05 ; Hamdi et al ,07) et Estimation et identification paramétrique (Isermann, 84 ; Isermann et Freyermuth ,1991 ; Willsky, 76).

La deuxième catégorie de méthodologies est plus intéressante dès lors qu'un modèle de l'équipement est inexistant ou difficile à obtenir. Deux solutions existent dans ce cas, on utilise les outils à base de traitement de signal et ce dernier comprend la surveillance avec outils statistique (Basseville, 1988 ; Zemouri, 03) et surveillance par analyse spectrale (Banks et Reichard,04 ; Durnerinet al,97) et la deuxième méthode base sur l'Intelligence Artificielle tels que les Systèmes experts (Botta,91 ;Zwingelstein,95 ;Farreny,89 ;Venkatasubramanian et al, 2003), Reconnaissance de formes ((Denoeux, 97 ; Mokhtari, 07), Logique floue (Boudaoud et Masson ,00) l'intelligence artificielle, réseaux de neurones((Reiter, 87 ;Raudys , 01 ; Kleer et al, 97 ;Loiez, 97 ; Washio et al, 98 ;Hines et al, 95 ).

### 1.2.1 Méthodes de surveillance avec modèles

Au cours de trois dernières décennies, la communauté scientifique s'est principalement intéressée à l'élaboration de méthodes de surveillance utilisant, qui reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé "indicateur de défaut" ou "résidu".

L'algorithme utilisé pour obtenir les résidus est appelé générateur de résidus.

La génération de résidus consiste à comparer les mesures issues du système à leurs estimations issues d'un modèle.

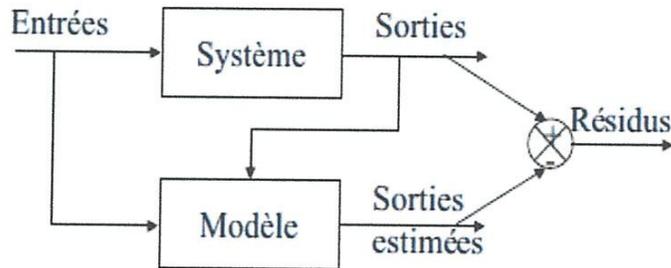


Figure1.1 : Générateur de résidus

Les approches sont principalement utilisées pour construire ce générateur de résidus sont :

**a) Espace de parité**

La méthode de l'espace de parité a été une des premières méthodes employées à des fins de FDI (Fault Detection and Isolation), (Ragot et al., 98). Le principe de cette méthode est la vérification de la consistance existant entre les entrées et les sorties du système surveillé.

Considérons le cas général d'une équation de mesure à l'instant k :

$$y(k) = Cx(k) + \varepsilon(k) + Fd(k) \quad (1.1)$$

On souhaite analyser la consistance des mesures et détecter la présence des défauts. Pour cela on cherche à établir des relations entre les mesures qui sont indépendantes des grandeurs inconnues mais qui restent sensibles aux défauts.

On définit le vecteur de parité  $p(k)$  projection du vecteur des mesures  $y(k)$

$$p(k) = Wy(k) \quad (1.2)$$

Où  $W$  est une matrice de projection. Parmi les propriétés de cette matrice, son orthogonalité avec  $C$  entraîne en particulier

$$p(k) = W\varepsilon(k) + WFd(k) \quad (1.3)$$

On note, que dans le cas idéal absence d'erreurs de mesure  $\varepsilon(k)$  et de défauts  $d(k)$  le vecteur parité est nul. Par conséquent, l'équation (1.2) traduit l'ensemble des redondances qui lient les mesures  $y(k)$ .

$$W y(k) = 0 \tag{1.4}$$

On peut noter que l'expression (1.2) permet le calcul numérique du vecteur parité à partir des mesures, c'est la forme de calcul du vecteur parité, alors que l'expression (1.3) explique l'influence des erreurs de mesure et des défauts, c'est sa forme d'évaluation.

De nombreuses méthodes peuvent être employées pour la détermination de cette matrice  $W$ . On peut, par exemple, effectuer une élimination directe par substitution des inconnues. La matrice  $C$ , de rang  $m$ , peut être décomposée sous la forme :

$$C = [C_1 \quad C_2] \tag{1.5}$$

Où  $C_1$  est régulière. Une matrice orthogonale à  $C$  s'écrit alors simplement :

$$W = [C_2 \times C_1^{-1} \quad -I] \tag{1.6}$$

**Exemple 1.1**

Considérons le système de mesure suivant :

$$Y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \varepsilon(k) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} d(k) \tag{1.7}$$

Qui peut être mise à profit pour générer deux équations de redondance liant les composantes  $y_i(k)$  du vecteur de mesure. On peut extraire de  $C$  une sous-matrice régulière de rang 3, notée  $C_1$  formée, par exemple, des trois premières lignes de  $C$  ; on a donc :

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{1.8}$$

D'après (5), la matrice  $W$  s'écrit :

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ -2 & 0 & 4 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{1.9}$$

ce qui permet de donner les deux formes du vecteur parité, en fonction des mesures ou en fonction des "perturbations" :

$$p(k) = \begin{bmatrix} -y_1(k) + 2y_3(k) - y_4(k) \\ -2y_1(k) + 4y_3(k) - y_5(k) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$p(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2d_1(k) - d_2(k) \\ -2d_1(k) \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

La forme (1.11) permet le calcul du vecteur parité, comme les erreurs  $\varepsilon(k)$  sont à valeur moyenne nulle, la forme (1.10) est utilisable pour détecter et estimer les défaillances éventuelles.

Le lecteur pourra dès à présent noter que la forme des équations de redondance n'est pas unique ; toute combinaison linéaire des équations (1.10) est également une équation de redondance, mais qui ne fait pas nécessairement apparaître les mêmes variables, cette remarque importante est à la base de la "structuration" des résidus pour faire apparaître les propriétés de localisabilité des défauts. Pour cet exemple de faible dimension, l'élimination de  $y_1(k)$  entre les deux équations conduit à la nouvelle équation de redondance :

$$-y_5(k) + 2y_4(k) = 0 \quad (1.13)$$

On remarquera que l'élimination de  $y_1(k)$  entraîne systématiquement celle de  $y_3(k)$ , les défauts éventuels intervenant sur ces deux mesures ne seront donc pas isolables (différentiables). On notera également que la mesure  $y_2(k)$  n'intervient dans aucune équation de redondance ; un défaut sur cette mesure ne sera donc pas détectable.

### b) Relation de Redondance analytique

Cette redondance consiste à utiliser des informations supplémentaires issues, non plus de capteurs, mais de modèles permettant l'élaboration de grandeurs de même nature que celles issues des capteurs. L'intérêt est de permettre de remplacer un capteur physique par un capteur informationnel.

#### Exemple 1.2 : redondance analytique

Soit un système défini par la représentation d'état suivant

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k) \end{cases} \quad (1.14)$$

Telles que  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

en effet sur un horizon  $[k, k+s_j]$ , les équations du système peut être regroupées sous la formes :

$$\begin{bmatrix} Y_1(k) \\ Y_1(k+1) \\ Y_1(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_1 A \\ C_1 A^2 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ C_1 B & 0 \\ C_1 A B & C_1 B \end{bmatrix} u(k) \quad (1.15)$$

Après calcul, on obtient :

$$\begin{aligned} Y_1(k) &= x_1 + x_3 \\ Y_1(k+1) &= 0.5x_1 + x_2 + 0.5x_3 \\ Y_1(k+2) &= 0.2x_1 + 0.6x_2 + 0.25x_3 + u_1(k) + u_2(k) \end{aligned} \quad (1.16)$$

En éliminant les variables d'état entre ces trios équation on obtient le résidu,  $r_1$  et  $r_2$  sous le même forme de calcul en obtient le vecteur d'auto-redondance.

$$r(k) = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_1(k) = Y_2(k) - 0.6Y_1(k-1) + 0.05Y_2(k-2) - u_2(k-1) - u_2(k-2) \\ r_2(k) = Y_2(k) - 0.6Y_2(k-1) + 0.5Y_2(k-2) - u_1(k-1) + 0.5u_1(k-2) + 0.4u_2(k-2) \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

L'analyse de ce vecteur permet de construire la matrice d'incidence (table de signature) soit  $Fy_1, Fy_2, Fu_1, Fu_2$  les défauts sur capteurs et sur actionneurs

Tab 1.1 : Table de signature

Résidus	Fy1	Fy2	Fu1	Fu2
r1	1	0	1	1
r2	0	1	1	1

Selon cette table de signature, le vecteur de parité ne permet pas de localiser un défaut actionneur, leur signature était identique.

**c) Observateur et Filtre**

Les approches à base d'observateurs ou de filtres sont les plus couramment utilisées. Les premiers travaux datent des années 70 (Clark et al., 1975; Jones, 1973). Les observateurs ou filtres sont des outils bien connus des automaticiens à des fins de commande en boucle fermée. Le principe général est de concevoir un système dynamique permettant de donner une image, ou estimation, de certaines variables, ou combinaisons de variables, nécessaires au bouclage. Lorsque le système est dynamique et que certaines variables (conditions initiales) sont inconnues, l'estimation n'est correcte qu'après un certain temps de convergence, fixé par la dynamique de l'observateur. Parmi les observateur utilisés, on distingue : Observateurs à entrées inconnues et l'observateurs de Luenberger, et Filtre de kalman ,...etc.

**\* Observateurs à entrées inconnues :**

Le principe d'un tel observateur est donne comme suit :

Soit la représentation d'état suivante d'un système linéaire:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + F d(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (1.18)$$

Avec  $x(t)$  vecteur d'état du système,  $u(t)$  vecteur d'entrées connues associé à la matrice B et  $y(t)$  vecteur des mesures,  $d(t)$  est agit sur l'évolution de l'état et sur la mesure est appelée *entrée inconnue*.

Soit l'observateur suivant :

$$\dot{z}(t) = N z(t) + G u(t) + L y(t) \quad (1.19)$$

$$\hat{x}(t) = z(t) - E y(t) \quad (1.20)$$

Ainsi l'erreur de reconstruction d'état et donnée par

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (1.21)$$

Répond au système suivant :

$$\hat{x}(t) = x(t)z(t) + Ey(t) = (1 + EC)x(t)z(t) \quad (1.22)$$

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = (1 + E \times C) \times (Ax(t) + Bu(t) + F_1 d(t)) \times (Nz(t) + Gu(t) + Ly(t)) \quad (1.23)$$

Le but étant de reconstruire au mieux le signal  $x$ , l'erreur de reconstruction doit tendre de manière asymptotique vers zéro. Ceci étant vérifié si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$P = 1 + EC \quad (1.23 \text{ a})$$

$$LC = PA NP \quad (1.23 \text{ b})$$

$$G = PB \quad (1.23 \text{ c})$$

$$PF = 0 \quad (1.23 \text{ d})$$

$$N \text{ stable} \quad (1.23 \text{ e})$$

Les équations (1.22 a) et (1.22 d) conduisent à  $F + ECF = 0$ . Notons  $(CF)^{-1}$  l'inverse généralisée de  $CF$ .

Sous réserve d'existences, on a donc :

$$E = -F(CF)^{-1}.$$

$$P = 1 + F(CF)^{-1} - C \quad (1.24 \text{ a})$$

$$G = PB \quad (1.24 \text{ b})$$

$$N = PA KC \quad (1.24 \text{ c})$$

$$L = K - NE \quad (1.24 \text{ d})$$

$$N \text{ stable} \quad (1.24 \text{ f})$$

#### d) Estimation paramétrique

Les méthodes d'estimation paramétrique supposent l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système et la connaissance des valeurs des paramètres en fonctionnement nominal. Elles consistent alors à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système (Willsky, 76). On dispose ainsi d'une estimation des paramètres du modèle, réalisée à partir des mesures prises sur le système, et de leurs

valeurs théoriques. Pour détecter l'apparition de défaillances dans le système, il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques. Comme pour les méthodes de redondance analytique, la théorie de la décision sert alors à déterminer si l'écart observé est dû à des aléas normaux du fonctionnement ou à des défaillances. La différence entre les méthodes de redondance analytique et les méthodes d'estimation paramétrique est qu'on effectue, pour les premières, la comparaison entre l'état estimé et l'état théorique du système, alors que pour les secondes, on compare les paramètres estimés aux paramètres théoriques du système (Zemouri, 03).

### **1.2.2 Méthodes de surveillance non analytique (sans modèles)**

#### **1.2.2.1 Surveillance à base de traitement du signal**

##### **a) Surveillance avec outils statistiques**

Les outils statistiques de détection de défaillances consistent à supposer que les signaux fournis par les capteurs possèdent certaines propriétés statistiques. On effectue alors quelques tests qui permettent de vérifier si ces propriétés sont présentes dans un échantillon des signaux mesurés de taille  $n$  (appelé fenêtre d'observation glissante). On considère que le signal mesuré est une variable aléatoire notée par  $\gamma$ . Nous ne présentons que trois tests statistiques, mais une grande variété de tests, applicables sur un échantillon de mesures, peut être trouvée dans (Basseville, 1988).

##### **\* Test de franchissement de seuils**

Le test le plus simple est de comparer ponctuellement les signaux avec des seuils préétablis. Le franchissement de ce seuil par un des signaux capteurs génère une alarme. On peut trouver dans l'industrie deux types de seuils. Un premier type est dit seuil de pré-alarme qui permet d'entreprendre une action de maintenance préventive ; le second type est le seuil d'alarme qui impose l'arrêt de la production et l'engagement d'une action de maintenance corrective. Ce type de méthode est très simple à mettre en œuvre mais ne permet pas d'établir un diagnostic des défaillances. Cette méthode est aussi très sensible aux fausses alarmes.

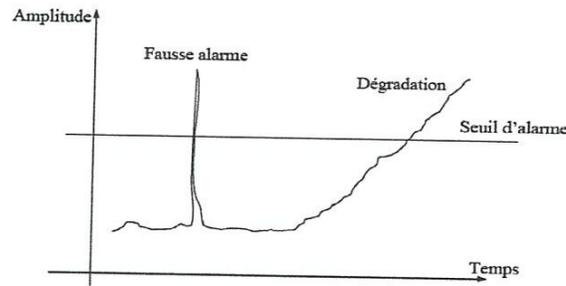


Figure 1.3 : Sensibilité de la méthode à franchissement de seuils aux fausses alarmes.

✱ **Test de moyenne**

Contrairement à la méthode précédente, le test de comparaison est effectué sur la moyenne  $\hat{y}$  du signal contenu dans une fenêtre de  $n$  valeurs plutôt que sur une valeur ponctuelle.

$$\hat{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t y_i \quad (1.25)$$

Ceci rejoint le principe du calcul des tendances, une des techniques les plus simples de la maintenance prédictive.

✱ **Test de variance**

On peut également calculer la variance d'un signal. Tant que cette variance se situe dans une bande située autour de sa valeur nominale, l'évolution du système est supposée normale.

La variance de l'échantillon est définie par :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t (y_i - \hat{y})^2 \quad (1.26)$$

**b) Diagnostic par Analyse Spectrale**

Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence dont le signal amplitude/temps est converti en amplitude/fréquence. Il est représenté sous forme d'un graphique montrant l'amplitude de la vibration à chaque fréquence. A partir des caractéristiques d'une machine surveillée, et des fréquences auxquelles

apparaissent les anomalies, il est donc possible de détecter l'origine d'un défaut et d'en suivre l'évolution. Les anomalies spectrales peuvent être classées en trois catégories:

- Pics apparaissant à des fréquences multiples ou sous multiples de la vitesse du rotor.
- Pics apparaissant à des vitesses indépendantes de la vitesse du rotor.
- Densité spectrale provenant de composantes aléatoires de la vibration

✱ **Méthodes non paramétrique d'analyse spectrale**

Ce sont des méthodes qui ne mettent pas en jeu la considération d'aucun modèle paramétrique. L'estimation spectrale s'effectue directement à partir de la transformée de Fourier du signal, ou de son autocorrélation. Nous exposons ici les méthodes les plus connues d'entre elles:

✓ **Périodogramme :**

La méthode la plus simple est de calculer une estimation de densité spectrale de puissance d'un signal  $x(n)$  est sans doute d'utiliser la technique dite du périodogramme, qui est tout simplement le module carré de la transformée de Fourier discrète du signal analysé, soit :

$$P_{pd}(f) = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-2\pi j n f} \right)^2 = \frac{1}{N} x(f) \hat{x}(f) \quad (1.27)$$

Où  $N$  est le nombre d'échantillons du signal. Il s'agit d'un estimateur non biaisé mais non consistant, ce qui est un inconvénient majeur si l'on recherche une résolution appréciable. On peut réduire cette variance en estimant le périodogramme moyenné : il s'agit de diviser le signal analysé en  $k$  tranches et d'estimer pour chacune des périodogrammes et de retenir comme estimation finale du périodogramme la moyenne des  $k$  estimations. La variance s'en trouve ainsi divisée par  $k$ , mais cela est au détriment de la résolution fréquentielle qui s'en trouve affaiblie puisqu'on réduit de  $k$  la proportion d'échantillons utilisés pour l'estimation de chaque périodogramme.

✓ **Corrélogramme:**

Le Corrélogramme est en fait une simple discrétisation sur une fenêtre d'analyse contenant N données de la formule d'estimation de la densité spectrale de puissance pour un signal continu, il vient donc :

$$P_{cor}(f) = \sum_{-N+1}^{N-1} R_n e^{-2\pi jnf} \quad (1.28)$$

Où  $R_n$  est l'autocorrélation du signal  $x_n$ . L'inconvénient majeur du corrélogramme est d'abord qu'il peut conduire à l'estimation d'une densité spectrale de puissance négative, due évidemment aux erreurs numériques de la discrétisation, par ailleurs son pouvoir de résolution est faible.

✓ **Le cepstre:**

L'analyse cepstrale est une méthode qui a un grand champ d'application surtout dans le diagnostic des signaux vibratoires. Elle peut détecter les périodicités dans un spectre (spectre d'engrenage par exemple). On peut dire que les techniques cepstrales sont très efficaces pour détecter la présence d'échos. Ces échos sont généralement espacés.

Cette méthode est définie comme le transformée de Fourier inverse du logarithme de la densité spectrale de puissance :

$$x_{cep} = F^{-1}(\ln(P_x(f))) \quad (1.29)$$

Où  $x_{cep}$  et  $P_x$  sont le cepstre et la densité spectrale du signal  $x(n)$ . Cette méthode est très efficace du point de vue résolution d'un train d'harmoniques de fréquences très proche et équidistantes. En outre, l'application du cepstre au même signal d'engrenage permet la détection.

\* **Méthodes paramétriques d'analyse spectrale**

Ces méthodes se ramènent à la sélection du modèle, l'estimation de ses paramètres et la substitution des valeurs estimées dans l'expression théorique de la densité spectrale. Il existe principalement trois grandes classes de modèles (Bdirin, 06).

- Modèle MA

- Modèle AR
- Estimateur ARMA
- ✱ **Méthodes de décomposition harmonique**

Cette méthode suppose que le signal est composé d'un certain nombre de raies spectrales dont il convient de trouver les fréquences et les puissances.

### 1.2.2.2 Surveillance par intelligence artificielle

#### a) Systèmes experts

Un système expert est un logiciel qui reproduit le comportement d'un expert humain accomplissant une tâche intellectuelle dans un domaine précis.

Il est composé de deux parties indépendantes :

- une base de connaissances, elle-même composée d'une base de règles qui modélise la connaissance du domaine considéré et d'une base de faits qui contiennent les informations concernant le cas que l'on est en train de traiter.
- un moteur d'inférences capable de raisonner à partir des informations contenues dans la base de connaissance, de faire des déductions, etc.

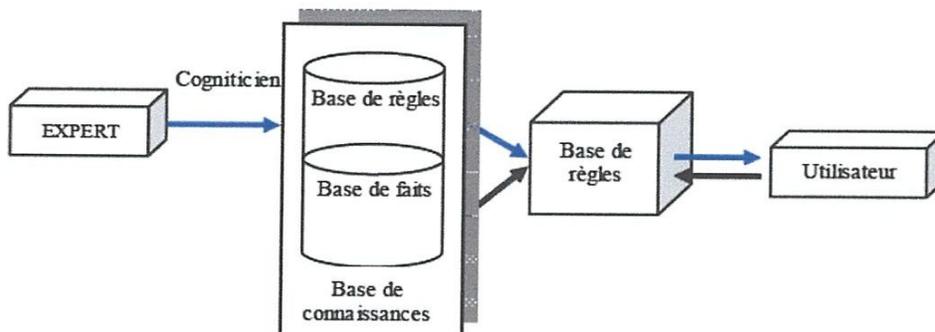


Figure 1.4 : Structure d'un système expert

Le rôle du cogniticien est de soutirer leurs connaissances aux experts du domaine et de traduire ces connaissances dans un formalisme se prêtant à un traitement automatique, c'est-à-dire en règles. Ces deux tâches sont aussi délicates l'une que l'autre. En effet, un expert est la plupart du temps inconscient de la majeure partie de son savoir, et s'il arrive à en exprimer une partie, c'est souvent sous une forme difficile à formaliser.

Les systèmes experts sont subordonnés à une base de règles logiques représentant l'ensemble des combinaisons importantes d'états, sélectionnées parmi l'explosion combinatoire des états possibles du système analysé. Les systèmes experts permettent l'exploitation d'une base de données informationnelle considérable. Ils présentent le désavantage d'un comportement rigide, dans un contexte qui s'avère souvent variable et évolutif (Racoceanu ,06).

**b) Surveillance par reconnaissance de formes**

Un problème de diagnostic peut se définir comme un problème de reconnaissance de formes. Il a pour but la reconnaissance d'une forme parmi différentes possibilités à partir d'observations bruitées. Il existe plusieurs approches : la reconnaissance de forme structurelle ou syntaxique qui exploite les relations entre les composants de la forme et la reconnaissance de formes de type numérique (statistique, floue, etc) qui exploite des modélisations de formes probabilistes ou floues (Denoeux, 01).

Une forme est représentée par un ensemble de paramètres ou attributs caractéristiques qui peuvent être numériques ou symboliques. Un prototype est défini par des valeurs précises de l'ensemble des paramètres caractéristiques d'une situation particulière (défaillance dans notre contexte). Une classe est définie par un ensemble possible de valeurs des attributs et est représentée par son prototype. La classification d'un objet (la reconnaissance d'une forme) parmi M classes est la décision d'affecter l'objet à une classe particulière. Les classes peuvent être définies de façon probabiliste ou encore comme des classes floues. Dans le cadre du diagnostic, le prototype un peut être lié au fonctionnement normal du procédé alors que les prototypes deux et trois peuvent représenter deux modes de défauts distincts. Le diagnostic consiste à décider de quel prototype cette forme est la plus proche en fonction d'un critère d'évaluation comme les distances euclidiennes (classes circulaires) ou les distances Malahanobis (classes elliptiques) par exemple. Dans (Dubuisson, 01), les approches probabilistes et non probabilistes (flou et crédibiliste) sont développées en détail. La figure 1.5 nous résume le principe du diagnostic par reconnaissance de formes.

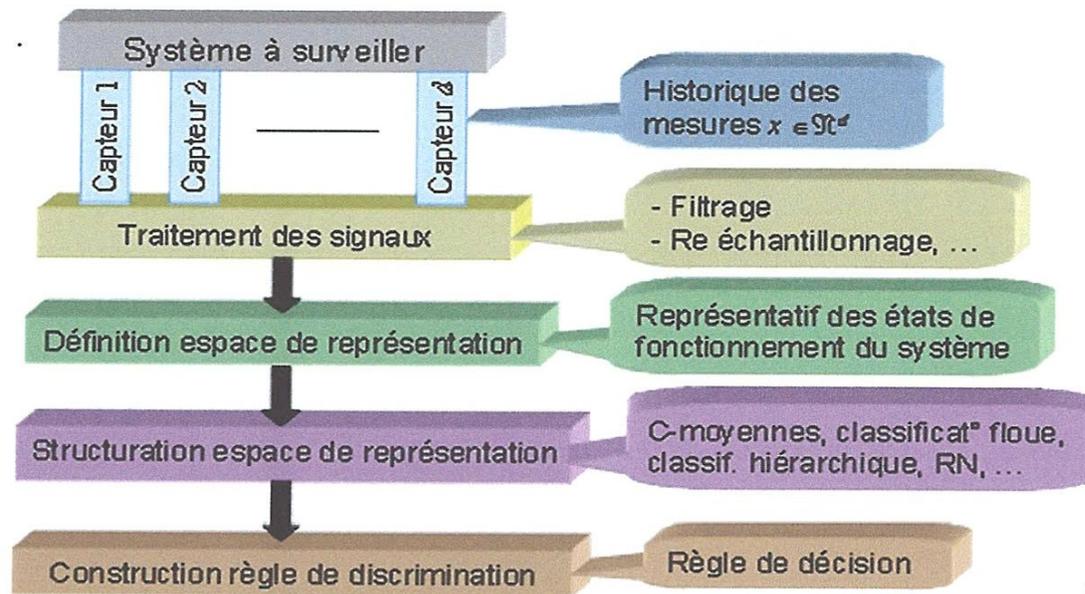


Figure 1.5 : Diagnostic d'un système avec l'approche par reconnaissance des formes  
 c) Reconnaissance de formes par réseaux neuronaux

Les réseaux de neurones sont des outils capables d'effectuer des opérations de perception, classification et prédiction. Leur fonctionnement est basé sur les principes de fonctionnement des neurones biologiques. Leur principal avantage par rapport aux autres outils est leur capacité d'apprentissage et de généralisation de leurs connaissances à des entrées inconnues. Une des qualités de ce type d'outil est son adéquation pour la mise au point de systèmes de surveillance modernes, capables de s'adapter à un système complexe avec reconfigurations multiples. Les réseaux de neurones peuvent être également implémentés en circuits électroniques, offrant ainsi la possibilité d'un traitement temps réel. Leur utilisation est principalement guidée par leurs propriétés suivantes:

- capacité d'apprentissage,
- capacité de généralisation,
- parallélisme dans le traitement (rapidité de traitement)
- adaptés aux non-linéarités des systèmes,

Chaque neurone réalise une fonction simple (fonction linéaire, linéaire par morceaux, fonction à seuil, sigmoïde, gaussienne), les propriétés globales de l'outil émergeant de sa structure. Toutes les caractéristiques des réseaux de neurones sont exploitées à

travers la propriété principale des réseaux de neurone qu'est l'apprentissage. En effet, les mécanismes d'apprentissage sont à l'origine des capacités de résolution de problèmes des réseaux neuronaux. Cet apprentissage permet de configurer les poids synaptiques ainsi que les fonctions d'activation afin d'adopter un comportement désiré. Deux types d'apprentissages sont utilisés : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

✱ **Apprentissage supervisé :**

Permet de déterminer les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés auxquels un expert a associé des réponses du réseau. Les paramètres du réseau sont donc modifiés de manière à minimiser l'erreur entre la sortie cible (fournie par l'expert) et la sortie réelle du réseau.

✱ **Apprentissage non supervisé :**

Les données fournies en entrée ne contiennent pas d'information sur la sortie désirée. L'apprentissage est réalisé à l'aide de règles qui modifient les paramètres du réseau en fonction des exemples fournis en entrée.

Les architectures les plus utilisées pour ces problèmes de surveillance des systèmes industriels sont le modèle de Hopfield (basé sur la mémoire associative), le réseau de Kohonen (carte topologique auto-adaptative), le Perceptron Multicouches (PMC ou MLP pour Multi layer Perceptron) et le Réseau à Fonctions de base Radiales (RFR ou RBF pour Radial Basis Function). Une description détaillée pourra être trouvée dans La figure ci-dessous montre l'architecture générale d'une application de surveillance par connaissance des formes avec réseaux de neurones. L'expert humain joue un rôle très important dans ce type d'application. Toute la phase d'apprentissage supervisé du réseau de neurones dépend de son analyse des modes de fonctionnement du système. Chaque mode est caractérisé par un ensemble de données recueillies sur le système. A chaque mode, on associe une expertise faite par l'expert. Cette association (ensemble de données -modes de fonctionnement) sera apprise par le réseau de neurones. Après cette phase d'apprentissage, le réseau de neurones passe en phase de classification, dans laquelle il associera les classes représentant les modes de fonctionnement aux formes d'entrée caractérisées par les données du système (Zemouri, 2003).

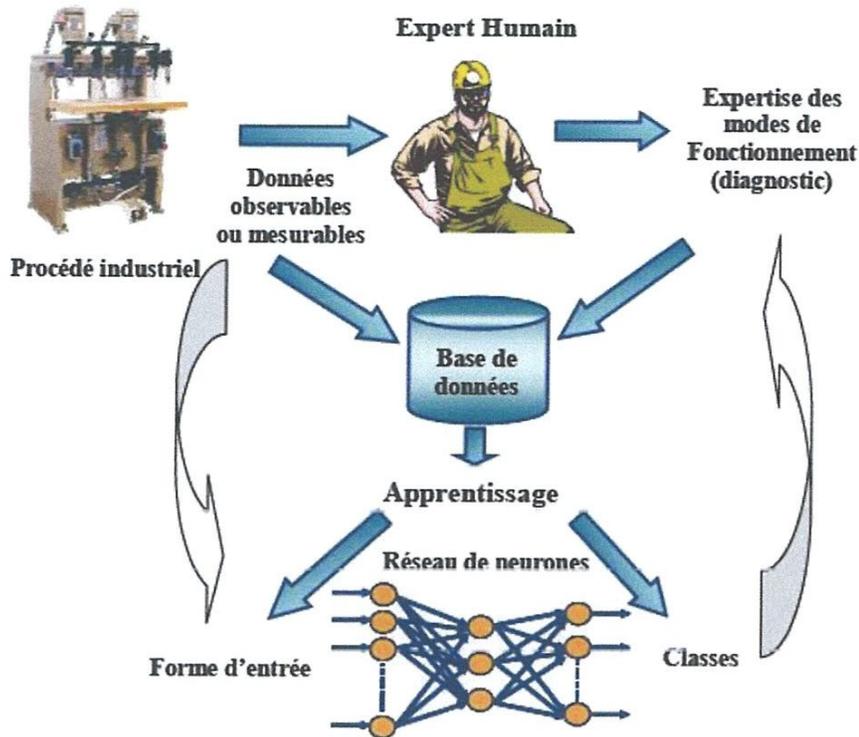


Figure 1.6 : Reconnaissance des formes par réseau de neurones.

### 1.3 Méthodes de surveillance des systèmes à évènements discrets (SED)

Les publications traitant la détection et l'identification des défaillances des systèmes à évènement discrets sont présentées soit sous un formalisme algébrique, soit en utilisant un automate à état fini. On peut citer les travaux de (Aghasaryan, 98 ; Hadjiscostis et Verghe, 00 ; Moody et Antsaklis, 00 ; Ruusunen et Paavola, 02 ; Lefebvre, 04 ; Li et al, 04 ; Wu et Hadjiscostis, 05).

Sur ce sujet, nous avons identifié deux approches traitant le problème des défaillances sur les transitions en utilisant les algorithmes d'estimation : avec la première approche, les séquences d'évènements sont observées et le marquage est estimé alors que la seconde consiste à observer le marquage et estimer l'occurrence des évènements.

La spécificité du diagnostic dans les SED réside dans l'observabilité des évènements à surveiller, la taille et la complexité importantes du système, et donc les

méthodes traditionnelles basées sur un modèle ne sont pas applicables de la même façon que dans la cas continu (kechida, 07).

### 1.3.1 Méthodes de surveillance des SED

Les démarches des techniques de FDI utilisées dans le cas des SED et des SC sont très proches. On compare bien l'état ou le comportement du système réel à celui du modèle et tout écart correspond à la détection d'une anomalie. Cette comparaison est fondée sur des valeurs, des occurrences d'évènements, ou bien elle fait intervenir le temps sous forme d'une durée écoulée entre deux changements de valeurs ou entre deux évènements. Toutefois une différence importante apparaît si l'on se pose le problème de la disposition des capteurs et de leur nombre. L'étude de FDI réalisée par la redondance matérielle possède plusieurs limitations, la plus importante est l'incapacité de détecter les défauts qui affectent les capteurs ou les actionneurs redondants de la même manière, c'est-à-dire les composants identiques fabriqués dans la même série peuvent se dégrader de la même façon et tomber en panne en même temps,

Les considérations pratiques dans beaucoup de conceptions de systèmes, telles que la puissance, l'espace et les contraintes de poids, limitent également l'ampleur de la redondance matérielle dans un système, particulièrement quand la complexité de conception augmente.

Pour le cas des SED modélisés par des RdP, si on rajoute des capteurs, on rajoute des évènements, le modèle change sans que les mécanismes de détection classiques ne soient nécessairement enrichis.

Par contre, on peut introduire la redondance analytique (caractérisée en termes d'espace de parité) et diagnostiquer les défauts en se basant sur les relations de parité. La méthodologie dans (Hadjicostis et Verghese, 99) utilise cette idée pour surveiller les défauts dans les SED à partir d'une modélisation par les RdP. Cette approche consiste à ajouter des places supplémentaires sous forme d'un modèle incorporé dans le modèle RdP Original. Ces places redondantes aboutissent à des

relations de parité qui permettant le diagnostic des défauts des transitions et/ou des places du système global. Dans ces conditions, des défauts de type place provoquent la corruption du nombre de marques dans quelques places du RdP tandis que des défauts de transition empêchent la marque d'être enlevée (déposée à) des places d'entrée (sortie) d'une transition particulière.

Cette méthode a l'avantage de conserver le modèle de base du SED en aboutissant à des résultats intéressants dans l'étude de la surveillance de ces systèmes.

Nous allons présentons a la suite deux des principales approches existantes pour le diagnostic des systèmes de production.

#### a) Méthode fondée sur les RdP temporisés

Le principe de la détection est tout simplement fondé sur les possibilités de franchissement des transitions, il s'agit de construire un RdP qui permet de surveiller les contraintes de séquences. Le temps peut être associé aux places (réseaux de Pétri p-temporisé) comme il est aussi possible d'utiliser des réseaux de Pétri T- temporisés pour lesquelles les durées sont associées aux transitions. Dans ce modèle, on suppose que le franchissement des transitions n'est pas instantané mais qu'il consomme du temps. Ces deux approches sont en fait totalement équivalentes.

Par contre, les RdP temporels sont plus généraux. Ils associent une borne inférieure et une borne supérieure à la durée pendant laquelle une transition reste franchissable sans être effectivement franchie.

Cette durée est celle pendant laquelle l'évènement associé doit être attendu. La notion de durée maximale d'attente est importante car elle correspond en fait au mécanisme classique du chien de garde. Cette solution consiste à temporiser chaque opération du graphe de commande, elle permet d'introduire une durée de sensibilisation  $\theta_s(t)$  à chaque transition. Une transition T n'est franchissable que si elle est restée sensibilisée durant  $\theta_s(t)$ . La différence vis à vis de la durée de franchissement est que pendant toute cette durée, les jetons sont disponibles dans les places d'entrée de T et peuvent éventuellement être utilisés par une transition en

conflit avec T. Cette temporisation, égale à la valeur du chien de garde, nécessite les connaissances de la durée maximale de chaque opération (figure 1.7).

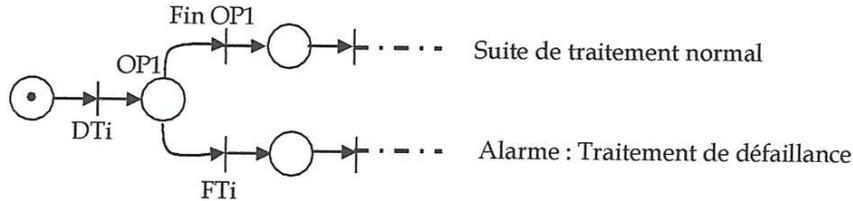


Figure 1.7 Technique du chien de garde

L'utilisation de la technique de chien de garde est un mécanisme simple, permettant de détecter facilement les comptes-rendus absents. Mais cette technique présente cependant de nombreux inconvénients (Toguyeni, 92).

**b) Méthode de la surveillance séparée des SED**

La conception de la surveillance repose sur l'application d'un modèle RdP représentant le système utilisé associée à un module RdP comportant des places supplémentaires dont le but est de surveiller les séquences de fonctionnement dynamique. Dans (Wu et Hadjicostis, 05), les auteurs considèrent l'identification de défaut dans un RdP où la transition est inobservable mais pour lequel l'état (marquage) est observable tout le long du cycle (la séquence). Plus spécifiquement, à la fin d'une séquence l'état final (marquage) du RdP redondant est observés et, en se basant sur cette information, les défauts qui ont pu être produits pendant cette séquence sont détectés et identifiés.

La structure générale réalisée est illustrée par la figure 1.8.

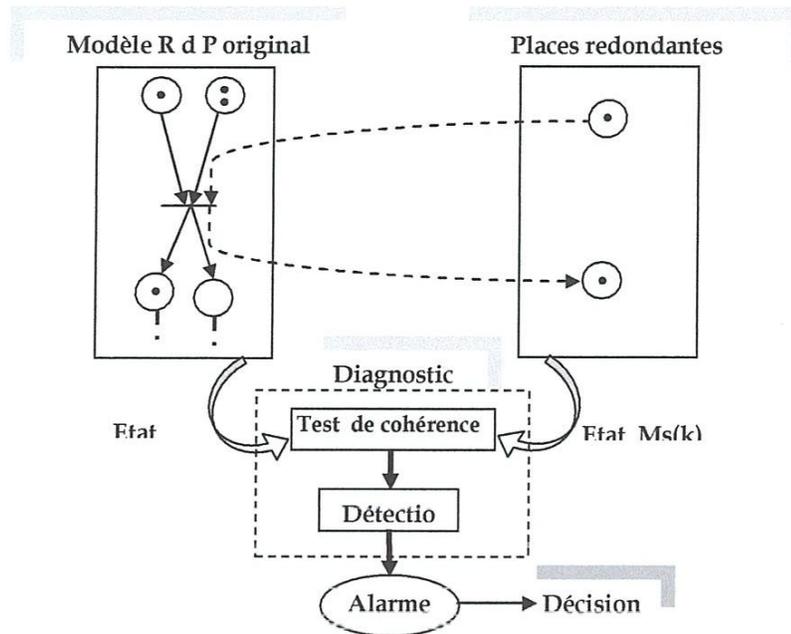


Figure 1.8 Principe de la surveillance séparée.

#### 1.4. Conclusion

Les méthodes de surveillance à base de modèles et les méthodes "sans modèle" sont développées parallèlement. Ces approches peuvent cependant dans bien des cas être complémentaires. L'information portée par les résidus peut être utilisée comme une donnée d'entrée des procédures d'apprentissage. De même les techniques d'apprentissage peuvent être utilisées pour améliorer par exemple les procédures de décision appliquées sur les résidus.

Enfin, d'une façon générale, on peut constater que les méthodes de surveillance que nous développons restent relativement théoriques et ne sont pour le moment que très peu utilisées dans le monde industriel. Un effort doit être fait par l'ensemble de la communauté pour rendre ces approches plus attractives (moins théoriques) et plus facilement utilisables et implémentables dans un contexte industriel. La complexité des systèmes industriels et les contraintes d'exploitation doivent ainsi être mieux prises en compte dans la conception des outils et méthodes destinés à améliorer la sécurité et la disponibilité de ces systèmes.

# Chapitre 2

## *Modélisation et simulation d'un système dynamique hybride*

### Résumé :

Dans ce chapitre on a présenté les systèmes dynamiques hybrides. Tout d'abord, une description générale des SDH est réalisée dans le but d'illustrer les différentes classes de ces systèmes. Suite des outils de modélisation, en suite nous avons appliqué la méthode de modélisation du système « le système à deux réservoir » en utilisant l'approche automate hybride, et on a simulé le système avec Matlab en utilisant Simulink et Stateflow ce dernier mettre en œuvre pour simuler le comportement hybride de système <sup>par</sup> <sup>é</sup> <sup>ce</sup> <sup>HC</sup>

### Abstract:

This chapter has presented the hybrid dynamic systems. First, a general description of HDS is conducted to illustrate different classes of these systems. Follow modelling tools. The following we apply the method of modelling the systems "the system has two tanks" approach using the hybrid automaton, and to simulate the system using Matlab, Simulink and Stateflow to this last effort to simulate the behaviour of hybrid system

---

**Sommaire**

---

2.1 Caractérisation des Systèmes Dynamiques Hybrides	28
2.1.1 Définition d'un SDH	28
2.1.2 Classe des SDH	30
2.2 Méthodes de modélisation des SDH	32
a) Automates hybrides	32
b) Réseaux de Pétri hybrides	33
c) Modèle mixte dynamique et logique	34
d) Multémodèle	36
2.3 Modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs	36
2.3.1 Description du système	36
a) Aspects discrets	38
b) Aspects continus	39
2.3.2 Modèle automate Hybride du système avec spécification	40
2.4 Simulation d'un système hybride	43
2.4.1 Généralité sur Stateflow	43
a) Création du bloc continu (système physique)	44
b) Création du bloc Automate (les modes)	46
2.4.2 Teste de Simulation	47
2.5 Conclusion	51

Le développement massif de l'automatisation au XX<sup>e</sup> siècle s'est longtemps fait suivant deux types de technologies, misent en œuvre selon des méthodologies qui leur étaient propres et par des personnels d'origine différente : les systèmes continus et les systèmes à événements discrets.

Les systèmes continus, sont constitués d'éléments caractérisés par une mesure qui peut prendre une infinité de valeurs : température d'une pièce ou d'un objet, vitesse d'un mobile, niveau dans un réservoir, La gestion de ces systèmes fait appel à des outils mathématiques aptes à la représentation de la dynamique continue : équations différentielles assorties de diverses transformations (Laplace, Fourier...), méthodes d'état à forme matricielle.

Quant aux systèmes à événements discrets sont des systèmes à éléments caractérisés par deux états : ouvert ou fermé, marche ou arrêt, sorti ou rentré... L'appareillage « tout ou rien » (TOR) correspondant est classiquement géré en s'appuyant sur l'algèbre de Boole, issue des travaux des logiciens anglais du XIX<sup>e</sup> siècle, puis, en prenant en compte la chronologie des états, leur séquençement, par des méthodes états-transitions assorties d'une représentation graphique : graphes d'état, réseaux de Pétri, Grafcet.

Cette répartition en deux catégories de systèmes n'est pas parfaite, tant au niveau des problèmes traités. Les méthodes d'analyse et de contrôle et de diagnostic « classiques » prennent en compte un seul aspect à la fois, l'aspect continu ou l'aspect événementiel.

La plupart des systèmes réels sont composés de sous-processus continus (moteurs, procédés chimiques, systèmes de freinage) qui sont démarrés, reconfigurés et arrêtés par une commande logique, à état discrets (ordinateur, automate programmable).

L'évolution d'un système réel est à la fois continue et événementielle. Pour garantir le bon fonctionnement d'un ensemble automatisé réel, il est nécessaire de prendre en compte simultanément les aspects continus et événementiels de sa dynamique. Les systèmes dynamiques hybrides (SDH) ont été introduits pour répondre à cette demande (Zaytoon ,01).

## 2.1 Caractérisation des SDH

Depuis les dix dernières années, le thème des systèmes dynamiques hybrides connaît une évolution considérable. En effet, les communautés scientifiques des informaticiens et des automaticiens se rejoignent et une branche commune émerge. Ceci d'autant plus fort qu'il représente un enjeu économique d'envergure dans les technologies de l'information et de la communication.

Le concept de Système Dynamique Hybride est né durant les journées de santa clara lors des travaux présentées par ( Willsky et al,87 ). Alors on peut citer dans la modélisation des SDH les travaux de ( Kalman, 69 ; Alla,92 ; Branicky,95 ; Zaytoon,98 ;Valentin ,01 ; Zaytoon, 01).

### 2.2.1 Définition d'un SDH

Un système dynamique hybride est un système faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes ou des modèles de type dynamique continu et événementiel (Figure 2.1), Un SDH permet de représenter globalement l'interdépendance d'éléments dynamiques continus-discrets au sens classique d'équations différentielles ou d'équations aux différences, soumis à des éléments décisionnels discrets ou à événements discrets qu'ils soient de types déterministes et/ou stochastiques. De telles représentations sont caractéristiques de diverses situations

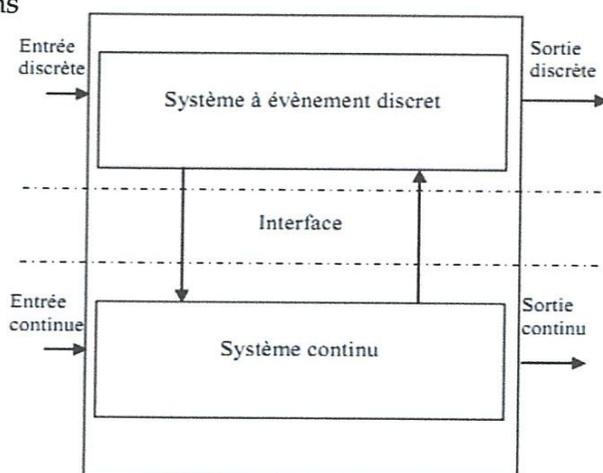


Figure 2.1 : Système dynamique hybride

**Définition 2.1** Un système hybride est formellement modélisé par les 8 éléments suivants :

$$\langle Q, X, G, F, Y, H, \sigma_s, \sigma_c \rangle$$

Ou

- $Q$  est l'ensemble de modalités que peut prendre le vecteur d'état discret  $q$ ,  $Q = \{q_i : i \in M\}$  et  $q_0$  est l'état discret initial.
- $X = \bigcup_{i \in M} X_i$  Définit l'espace d'état continu.  $X_i$  Représente l'espace d'état atteignable dans le mode  $i$ .  $x_i(t) \in X_i$  ( $\dim[x_i(t)] = n_i$ ) est le vecteur d'état continu à l'instant  $t$ . Le domaine  $X_i$  est décrit par un ensemble de contraintes inégalité  $g_i : g_i(x_i(t)) \leq 0$   $G$  représente l'ensemble de toutes les contraintes inégalité.

Le couple  $(q_i(t), x_i(t)) \in Q \times X$

- $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  est un ensemble fini de fonctions lisses. Chaque fonction définit une trajectoire du vecteur d'état continu  $x_i(t)$ 

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t)) \quad \text{ou} \quad u_i(t) \in R^{p_i} \text{ est un vecteur d'entrée (commande continue) supposé connu, } d_i(t) \in R^{\delta_i} \text{ est un vecteur d'entrées inconnues (ou de perturbations).}$$
- $Y = \bigcup_{i \in M} Y_i$  définit l'espace des sorties.  $Y_i \subseteq R^{r_i}$  dénote l'espace de sortie associé au mode  $i$ .  $y_i(t) \in Y_i$  est le vecteur des sorties mesurées à l'instant  $t$ .
- $H = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$  est un ensemble fini de fonctions vectorielles qui décrit le lien entre les variables d'état et les variables  $y_i = h_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t))$ .
- $\sigma_s = \{\sigma_s^{ij}\}$ , ou  $\sigma_s^{ij}$  est une application :  $Q \times X \times \mathfrak{T} \rightarrow Q \times X$  qui définit une transition spontanée
- $\sigma_s^{ij}(q_i, x_i, t) = (q_j, x_j^0)$ , ( $q_i$  et  $q_j \in Q$ ;  $x_i \in X_i$  and  $x_j^0 \in X_j$ )

Une transition d'un mode  $i$  vers un mode  $j$  (appelé mode successeur) se produit lorsque la trajectoire d'état continue  $x_i(t)$  intersecte une surface :  $S_{ij} = \{x_i \in X_i \text{ t.q. } s_{ij}(x_i) = 0\}$  ou  $s_{ij}(x_i)$  représente la condition de transition.

- $\sigma_f = \{\sigma_f^{ij}\}$ , ou  $\sigma_f^{ij}$  est une application :  $Q \times E \rightarrow Q \times X$  qui définit une transition

contrôlée :  $\sigma_f(q_i, e_{ij}) = (q_j, x_j^0)$  ou  $e_{ij} \in E$  est un événement externe contrôlé (Cocquempot, 04).

### 2.1.2 Classes des SDH

Dans la pratique, parmi les systèmes les plus souvent rencontrés, on trouve les systèmes multimodaux, regroupant plusieurs sous modèles résultant soit d'une partition de l'espace d'état (systèmes linéaires par morceaux), soit des systèmes avec un changement de paramètres selon un signal le plus souvent discontinu et provenant d'une logique de décision (systèmes à commutations avec ou sans mémoire), soit des systèmes avec des éléments en commutations. Cette dernière catégorie inclue des éléments de commutations comme les relais, les zones mortes ou les hystérésis (Zaytoon, 01).

On peut les classer suivant les systèmes indiqués et détaillés ci-après :

- Systèmes à saut (Jump Linear Systems - JLS)
- Systèmes à commutation (Switched Systems)
- Systèmes affines par morceaux (Piecewise Affine Systems - PWA)

#### a) Systèmes à saut

Les systèmes JLS sont une classe de SDH caractérisée par un état hybride  $(q, x)$  composé d'un état discret  $q$  dont l'évolution est régie par des entrées discrètes externes non contrôlables (inconnues) et d'un état continu  $x$  dont l'évolution est régie par une équation différentielle sans entrée (un système autonome), Les transitions associées aux systèmes JLS sont uniquement de type transitions de commutation

On a deux types de JLS :

- **Saut autonome**

Où la variable d'état  $x$  change de façon discontinue, lorsqu'elle atteint une certaine région de l'espace d'état. La balle en rebondissement est un exemple illustratif de ce phénomène (kechida, 07).

- **Sauts commandés**

Où la valeur de  $x(\cdot)$  change de façon discontinue sous l'influence d'une action extérieure. Les systèmes électrotechniques avec des entrées impulsionnelles illustrent un cas du saut commandé (kechida, 07).

**b) Systèmes linéaire à commutation**

Les systèmes SLS sont caractérisés par une évolution continue régie par une collection de sous-systèmes linéaires et une évolution discrète régie par des entrées contrôlables. Ces entrées sont souvent le résultat d'une stratégie de commande discrète. Par conséquent, on a deux types :

- **Commutations autonomes (avec continuité de l'état)**

Caractérisées par un changement de  $\dot{x}(\cdot)$  lorsque l'état continu  $x(\cdot)$  atteint certains domaines dans l'espace des états continus. Ce domaine constitue les valeurs limites imposées pour une variable continue dans un processus technologique. Exemple d'un circuit électrique comportant une diode (kechida, 07).

- **Commutations contrôlées**

Où la variable d'état  $x$  change instantanément en réponse à une entrée externe (commande). La détermination de l'état discret du processus est réalisée en tenant compte des événements de contrôle du processus et des événements physiques du processus issus du générateur d'événement. Le système constitué d'un réservoir avec une vanne d'alimentation et une vanne d'évacuation présente clairement un cas de système à commutation commandée (kechida, 07).

**c) Systèmes linéaires affines constants par morceaux PWA**

Un système hybride est dit linéaire par morceaux si les lois décrivant son évolution continue sont formulées au moyen d'équations différentielles linéaires. Nous venons d'illustrer que cette classe de système résulte d'un partitionnement de l'espace entrée/état du système en un ensemble de régions. Chaque fonction

décrivant l'état du système est affectée à chacun des polyèdres ou de régions obtenus. Ainsi, l'ensemble des régions est délimité par des frontières où les sous systèmes peuvent évoluer. Ces limites constituent les conditions portées sur l'invariant définissant le domaine de validité de chaque sous modèle. Ces derniers sont régis par l'évolution de l'équation (2.1)

$$\dot{x} = A_i x, \quad x \in R_{i \in \{1, \dots, q\}} = \{R_1, R_2, \dots, R_q\} \subseteq \mathbb{R} \quad (2.1)$$

$A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$  définit la matrice d'état dans chaque région,  $x \in \mathbb{R}^n$  le vecteur d'état continu du SDH,  $R$  est l'ensemble des régions de l'espace d'état et  $i \in Q$  le nombre de mode du système (Hamdi, 10).

## 2.2 Méthodes de modélisation des SDH

Le modèle est la traduction du comportement dynamique du système physique en une représentation abstraite. C'est une étape nécessaire à toute étude qui ne se réduit pas à l'expérimentation. Sa qualité, en termes de fidélité à la réalité, mais aussi sa lisibilité et ses possibilités d'utilisation, sont essentielles. Dans la littérature, on trouve des travaux concernant la modélisation, la simulation, (Branicky, 1996 ; Alla, 92 ; Pettersson, 1999 ; Zaytoon et al, 1999).

### a) Automates hybrides

L'automate hybride prend en charge explicitement la partie discrète et la partie continue dans une structure unifiée. Les auteurs (Lygeros et al, 2002) décrivent l'automate hybride comme étant une extension de l'automate à état fini associé à une dynamique continue. La représentation graphique de l'automate hybride est formée d'un ensemble de sommets et d'arcs (Figure 2.2). Les sommets définissent les états discrets du SDH contenant des jeux d'équations, décrivant la dynamique continue (équations différentielles ou de différences) aux quelles est associé la structure de commutation spécifiant le domaine d'invariant. Les sommets reliés par des arcs représentent les transitions liées à des conditions nommées garde. En général, la condition de garde d'une transition est exprimée en fonction de la région de l'espace d'état continu. Elle peut être représentée par des intervalles. Ainsi, une transition est franchie si la condition de garde correspondant est vérifiée par les valeurs des variables d'état continues du système à l'instant considéré (Hamdi, 10).

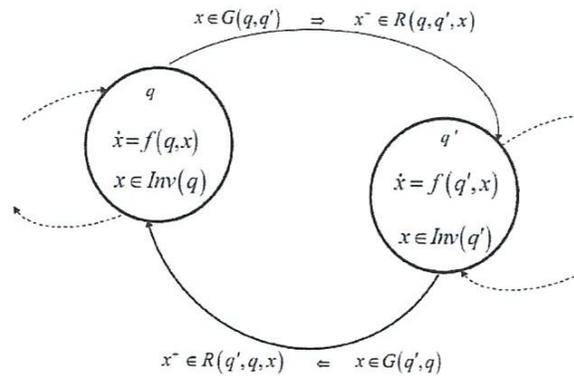


Figure 2.2 : Automate Hybride

### b) Réseaux de Pétri hybride

Définis au début des années 1960, les réseaux de Petri (RdP) ont été largement utilisés pour représenter des systèmes à événements discrets (SED). Une des difficultés que soulève l'exploitation des réseaux de Pétri est l'augmentation rapide de la complexité du modèle, induite par la possibilité d'avoir un nombre quelconque de jetons dans les places. Cela a conduit à introduire des réseaux de Pétri continus (RdPC) où le marquage devient un nombre réel positif. Des RdPC, on est passé aux réseaux de Pétri continus temporisés, puis aux réseaux de Pétri hybrides (RdPH), aux réseaux de Pétri lots et à d'autres extensions, telle que le RdP différentielle...

La figure 2.3 fournit un RdPH relatif à la fontaine. Les doubles cercles y matérialisent des places continues (dont le marquage  $m$  représente le niveau dans le bassin correspondant), les rectangles des transitions continues, associées à une vitesse de franchissement, soit ici à un débit d'eau.

Cette description est totalement graphique, y compris pour le fonctionnement continu. Le franchissement des transitions continues  $y$  est conditionné par le marquage continu des places  $P_1$  et  $P_2$  (correspondant au niveau d'eau dans les bassins), mais aussi par le marquage de places discrètes ( $P_3$  à  $P_6$ ) traduisant le fonctionnement ou le non-fonctionnement de la pompe, le fait que le niveau dans le bassin 1 atteigne ou non son seuil de débordement.

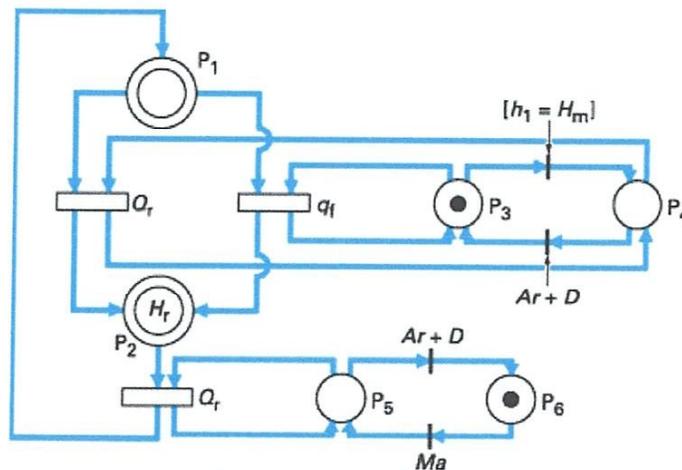


Figure 2.3 : Réseau de Pétri hybride

Les marquages initiaux correspondent au même état initial que dans la figure 2.3 :  $m_1 = h_1 = 0$ ,  $m_2 = h_2 = H_r$  pour les places continues, pompe arrêtée ( $m_5 = 0$ ,  $m_6 = 1$ ), niveau maximum en 1 non atteint ( $m_3 = 1$ ,  $m_4 = 0$ ), pour les places discrètes (Zyatoon, 01).

### c) Modèle mixte dynamique et logique (MDL)

Dans (Bemporad et Morari ,99), une classe de modèles hybrides a été présentée dans laquelle une proposition logique sous forme de contraintes sur les variables logiques est introduite. Ce formalisme permet de modéliser les systèmes hybrides comportant des états, des entrées et des sorties mixtes (continus/logiques), ainsi que des systèmes faisant intervenir des relations logiques et des contraintes. Cette structure s'avère très intéressante car elle permet de décrire un grand nombre de systèmes, comme les systèmes linéaires par morceaux, les systèmes à entrées et états mixtes, les systèmes dynamiques non linéaires.

Un modèle MLD est composé de deux parties, une partie liée aux dynamiques continues et l'autre aux dynamiques discrètes décrites par les variables logiques et leur interaction mutuelle. La figure 2.4 illustre la structure globale du modèle ainsi que les passages associés (Thomas, 04).

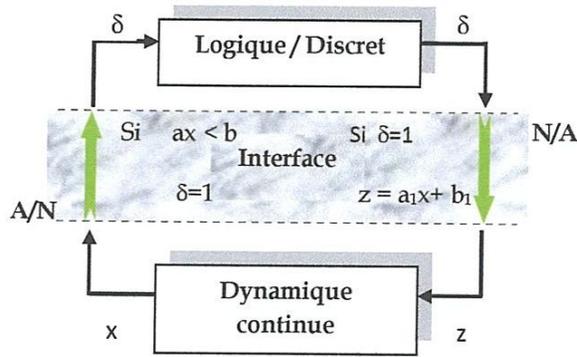


Figure 2.4 Structure d'un modèle MLD

Ceci mène à une mise en équation de la forme

$$\begin{cases} x(k+1) = A.x(k) + B_1u(k) + B_2\delta(k) + B_3z(k) \\ y(k) = C.x(k) + D_1u(k) + D_2\delta(k) + D_3z(k) \\ E_2\delta(k) + E_3z(k) \leq E_1u(k) + E_4x(k) + E_5 \end{cases} \quad (2.2)$$

où l'état :  $x(k) = [x_c(k) \ x_l(k)]^T$ ,  $x_c(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$  et  $x_l(k) \in \{0,1\}^{n_l}$ ,  $n = n_c + n_l$

la sortie :  $y(k) = [y_c(k) \ y_l(k)]^T$ ,  $y_c(k) \in \mathbb{R}^{m_c}$  et  $y_l(k) \in \{0,1\}^{m_l}$ ,  $m = m_c + m_l$

l'entrée :  $u(k) = [u_c(k) \ u_l(k)]^T$ ,  $u_c(k) \in \mathbb{R}^{r_c}$  et  $u_l(k) \in \{0,1\}^{r_l}$ ,  $r = r_c + r_l$

Les variables binaires auxiliaires :  $\delta(k) \in \{0,1\}^{q_l}$

Les variables continues auxiliaires :  $z(k) \in \mathbb{R}^{q_c}$

Les matrices  $A$ ,  $B_i$ ,  $C$ ,  $D_i$  et  $E_i$  sont des matrices constantes et  $E_5$  un vecteur réel.

L'ensemble des contraintes de la forme MLD regroupe donc d'une part les contraintes du système, d'autre part les inégalités issues des propositions logiques et des variables auxiliaires.

Un système MLD est dit "bien posé" si les variables auxiliaires sont uniques pour la paire  $(x, u)$  (kechida ,07).

#### d) Modélisation par multimodèle

L'approche multimodèle consiste à représenter un système complexe (hybride, ou non linéaire) sous forme d'un ensemble de sous-modèles appelés modes de fonctionnement, avec des commutations entre les différents modes. Ainsi, un multimodèle peut être présenté par un automate dont chaque état est associé à un modèle continu et chaque transition à une ou plusieurs conditions de commutation.

### 2.3 Modélisation d'un système hydraulique à deux réservoirs

Le système hydraulique donné figure 2.5, en mettant en évidence les dynamiques continue et événementielle. Dans une première étape nous modélisons ce système hydraulique par un automate hybride. Des limitations de fonctionnements associées aux conditions initiales et aux paramètres du système, sont ensuite considérées. Ceci a pour effet de supprimer certaines transitions ou certains modes du modèle initial. Enfin, nous déclinons un modèle réduite considérant le système commandé dans un mode d'exploitation donné .

#### 2.3.1 Description du système

Considérons le système hydraulique de la figure 2.5, constitué de :

- Deux réservoirs  $R_1$  et  $R_2$  , de section  $S_1$  et  $S_2$  son identique reliés par les conduites  $C_2$  et  $C_3$  .La conduite  $C_2$  est équipée de la vanne  $V_2$  .
- Deux vannes  $V_1$  et  $V_4$  permettant l'évacuation du liquide pour l'utilisation,
- Une pompe  $P_1$  de débit  $Q_p$  , et l'autre pompe  $P_2$  est une pompe de secours
- Trois capteurs : deux capteurs de débits mesurant  $Q_p$  et  $Q_1$  (débit au travers de  $V_1$ ) et un capteur de niveau mesurant  $h_2$  la hauteur de liquide dans le réservoir  $R_2$

La pompe  $P_1$  commandée en tout ou rien, fournit au réservoir  $R_1$  un débit  $Q_p$ . Les conduites  $C_1, C_2$  et  $C_4$  sont munies des vannes respectivement  $V_1, V_2$  et  $V_4$  qui sont aussi commandées en tout ou rien. Les variables  $h_1$  et  $h_2$  correspondent aux niveaux du liquide dans les réservoirs  $R_1$  et  $R_2$  .

Le système est équipé de deux capteurs de débit ( $Q_p$  et  $Q_1$ ), d'un capteur de niveau qui mesure  $h_2$ , et d'un capteur discret qui indique si le niveau  $h_1$  est supérieur à  $h_s$

**Remarque 2.1 :** Afin de simplifier l'étude, nous avons considéré que les vannes  $V_1$  et  $V_2$  sont maintenues constamment ouvertes.

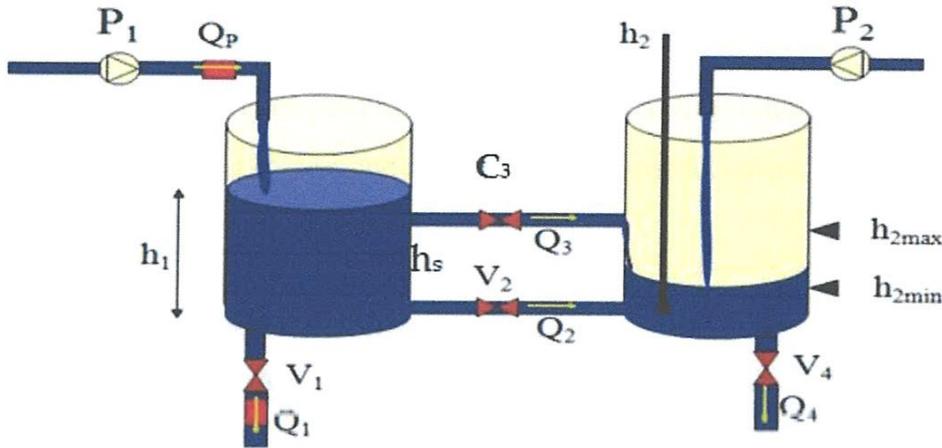


Figure 2.5 : Système hydraulique à deux réservoirs

Tab 2.1 Paramètres du système considéré

Section de réservoirs 1,2	$S_1$ et $S_2$	$S_1=S_2=0.0154 \text{ m}^2$
Section des conduites $C_i$ ( $i=1,\dots,4$ )	$A_i$	$A_1 = \dots = A_4 = 3.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2$
Débit maximal de la pompe $P_1$	$Q_0$	$0.001 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Accélération de la pesanteur	$g$	$9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

#### a) Aspects discrets

Les vannes  $V_i$  ( $i = 1;2;4$ ) et la conduite  $C_3$  sont des éléments pouvant prendre chacun deux modalités.

- Pour ( $i = 1;2;4$ ), l'état  $EV_i$  de la vanne  $V_i$  peut prendre les deux modalités *Ouverte* : O ou *Fermée* : F.

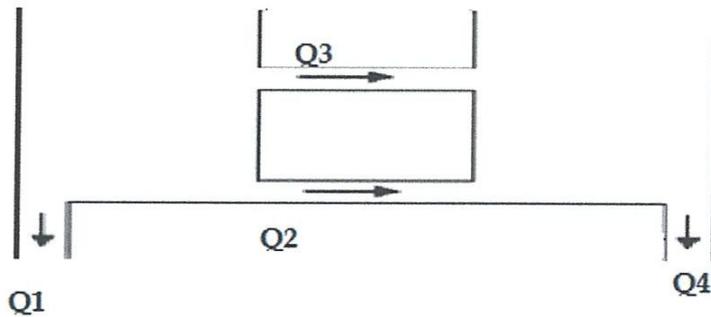


Figure 2.6 : Convention du signe des débits

$Q_1, Q_2$  et  $Q_2$  correspondent respectivement aux débits du liquide à travers les vannes  $V_1, V_2$  et  $V_4$  qui peuvent être exprimés par rapport à l'état de la vanne  $V_i$  par

$$Q_i = \begin{cases} 0 & \text{si la vanne } V_i \text{ est fermée} \\ Q_i & \text{si la vanne } V_i \text{ est ouverte} \end{cases} \quad (2.4)$$

$Q_3$  Représentent les débits d'eau dans la conduite  $C_3$ . Ils peuvent être exprimés par rapport à l'état de la conduite :

$$Q_3 = \begin{cases} 0 & \text{si la conduite } C_3 \text{ est vide} \\ Q_3 & \text{si la conduite } C_3 \text{ est pleine} \end{cases} \quad (2.5)$$

• Expressions des débits :

Les expressions des débits données par la loi de Torricelli sont :

$$\begin{aligned} Q_1(t) &= S_1 \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1(t)}, \\ Q_2(t) &= A_2 \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_s(t)) \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1(t) - h_s(t))} \\ Q_4(t) &= S_4 \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2(t)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$Q_3$  peut être donné par trois expressions en fonction du niveau du liquide dans les réservoirs  $h_1$  et  $h_2$ .

$$Q_3 = \begin{cases} A_3 \sqrt{2g(h_1(t) - h_s(t))} & \text{si } h_1 > h_s \text{ et } h_2 < h_s \\ -A_3 \sqrt{2g(h_1(t) - h_s(t))} & \text{si } h_1 < h_s \text{ et } h_2 > h_s \\ A_3 \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \sqrt{2g|h_1(t) - h_s(t)|} & \text{si } h_1 > h_s \text{ et } h_2 > h_s \end{cases} \quad (2.7)$$

Pour simplifier l'écriture, nous réécrivons  $Q_3$  par l'expression suivant

$$Q_3 = A_3 \text{sign}(H_1(h_1) - H_2(h_2)) \sqrt{2g(H_1(h_1) - H_2(h_2))} \quad (2.8)$$

où  $H_1$  et  $H_2$  sont respectivement des fonctions non linéaires de  $h_1$  et  $h_2$ , soit :

$$H_1(h_1) = \begin{cases} 0 & \text{si } h_1 < h_s \\ h_1 - h_s & \text{si } h_1 \geq h_s \end{cases} \quad \text{et} \quad H_2(h_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } h_2 < h_s \\ h_2 - h_s & \text{si } h_2 \geq h_s \end{cases} \quad (2.9)$$

- **Contraintes inégalité (invariants)**

L'état continu dans chaque mode évolue dans un domaine admissible défini par des contraintes inégalité. Ces contraintes limitent l'évolution continue du système dans une région de l'espace d'état continu du système hybride. Chaque mode du système est défini dans un domaine admissible, donné par les contraintes inégalité. Ainsi, nous distinguons 4 régions dans l'espace d'état continu défini par des contraintes sur l'état continu  $h_1$  et  $h_2$ . La réunion, ou l'intersection de ces régions entre elles, constitue un domaine admissible de l'espace d'état où il est défini. Ainsi, nous distinguons deux domaines admissibles :

$$\begin{aligned} & (h_1 - h \leq 0) \cap (h_2 - h \leq 0) \\ & (h_1 - h \geq 0) \cup (h_2 - h \geq 0) \end{aligned} \quad (2.10)$$

- **La configuration physique du système**

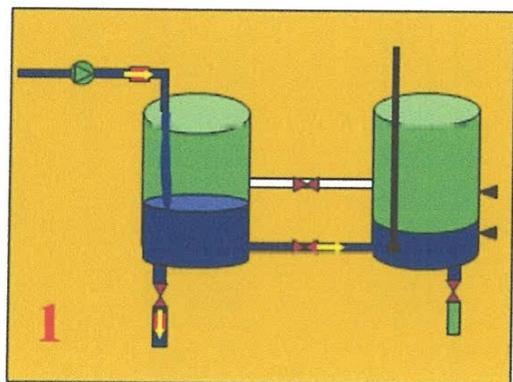
Considérons les spécifications suivantes :

Les vannes  $V_1$  et  $V_2$  sont toujours ouvertes, La pompe est commandée en tout ou rien de manière à maintenir  $h_2$  dans un intervalle fixé. Le débit de la pompe étant mesuré, l'état de la pompe (marche ou arrêt) n'est pas considéré par la suite. Lorsque la pompe est à l'arrêt, le débit est nul ( $Q_p = 0$ ), lorsqu'elle fonctionne  $Q_p = Q_0$

La vanne  $V_4$  est manuelle. Elle peut être ouverte ou fermée à tout instant par l'utilisateur.

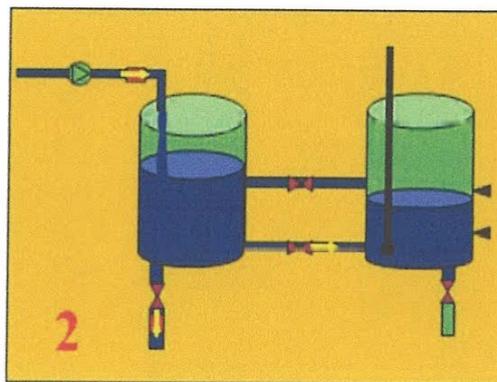
Seuls deux états discrets sont considérés : l'état de la conduite  $C_3$  qui peut prendre les modalités Vide (V) ou Pleine (P), et l'état de la vanne  $V_4$  qui peut prendre les modalités Ouverte (O) ou Fermée (F). 4 modes permettent donc de caractériser le comportement du système. Chacun d'entre eux est caractérisé par une modalité de l'état discret (état conduite  $C_3$ , état vanne  $V_4$ ), des équations d'état et des contraintes inégalités.

**Quatre modes** permettent de décrire le comportement normal du système hybride



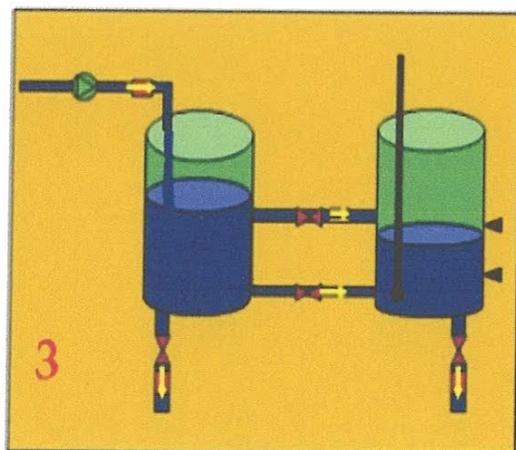
(a) Mode 1 :

conduite  $C_3$  Vide et vanne  $V_4$  Fermée



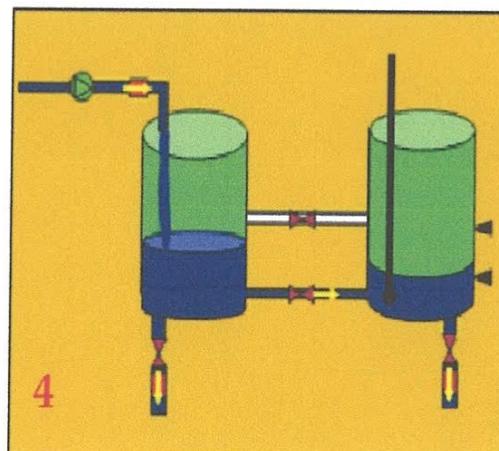
(b) Mode 2 :

conduit  $C_3$  Pleine et vanne  $V_4$  Fermée



(c) Mode 3 :

conduit  $C_3$  Pleine Et vanne  $V_4$  ouverte



(d) Mode 4 :

conduit  $C_3$  Vide et vanne  $V_4$  ouverte

Figure 2.7 : Les quatre configurations accessibles du système en exploitation

L'automate hybride correspondant au fonctionnement normal du système dans le mode d'exploitation considéré est représenté par la figure 2.8

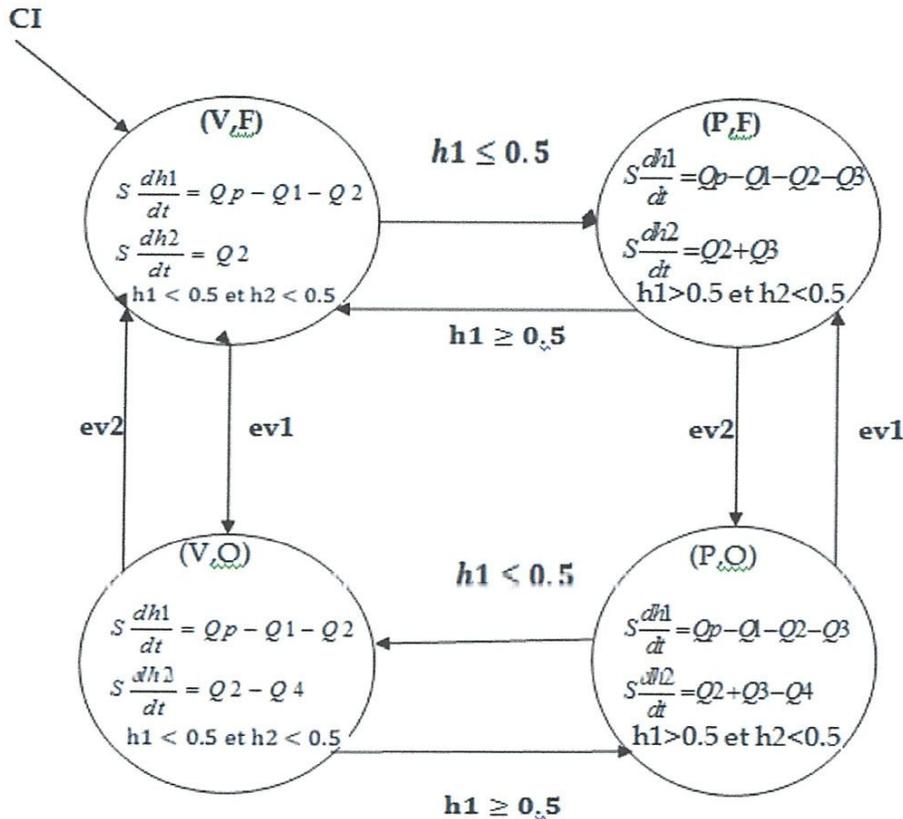


Figure 2.8 : Automate Hybride

## 2.4 Simulation d'un système hybride

Les ensembles industriels sont bien souvent des systèmes hybrides dans lesquels un automatisme supervise et coordonne le fonctionnement d'un plusieurs ensembles continus ou éventuellement échantillonnés.

### 2.4.1 Généralité sur stateflow

**Stateflow** est destiné à la représentation des systèmes discrets et à la simulation de leur fonctionnement, il communique parfaitement avec simulink dont il renforce la capacité de pris en compte des séquences logique que les blocs conditionnelle avaient commencé à introduire. D'ailleurs, le bloc stateflow n'est autre qu'un bloc de simulink masqué.

Stateflow s'utilise de manière analogue à Simulink. On construit tout d'abord le schéma en plaçant, grâce a un éditeur, les différents élément du diagramme (chart)

à construire et qui sont essentiellement :

- les **états** (states)
- leur **liaisons** (transition)
- ansi que les **libellés** attribués à l'événement (events) et aux **actions**

Comme pour les schémas Simulink, cette représentation graphique recouvre en fait la construction d'un programme MATLAB selon la syntaxe d'un S-fonction.

Le schéma Stateflow étant inclus dans un modèle Simulink.

Exemple 2.1

Un interrupteur à deux position (**ouvert, fermé**) est manœuvré par un unique bouton de commande. Un premier appui ferme le contact, un deuxième l'ouvre, le télérupteur alimenté une lampe.

La machine comprend un seul diagramme comportant deux états (**ouvert, fermé**).

L'état initial est l'état **ouvert** et la lampe sera éteinte. L'événement **appui** fait franchir sans condition la transition qui mène à l'état **fermé** (allumage de la lampe). Le même événement ramène à l'état **ouvert**

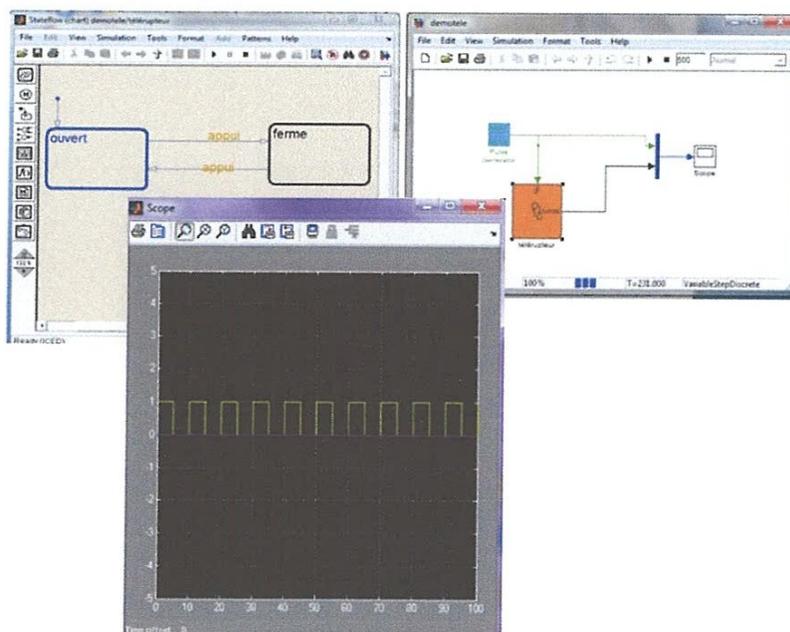


Figure 2.9 : Simulation de l'interrupteur

2.4.2 Simulation du système à deux réservoirs

Nous allons dans ce partie mettre en œuvre simulink et stateflow pour simuler le comportement d'un système dynamique hybride .le processus est formé de deux réservoir cylindriques  $R_1$  et  $R_2$  identiques, reliés entre eux par deux conduites  $C_1$  et  $C_2$ , Le vecteur d'entrées discrètes  $u=(V_1, V_2, V_3, V_4, P_1, P_2)$  est composé de quartes vannes identiques et de deux pompes identiques, délivrant chacune un débit de  $Q_p=0$  (pompe arrêtée) ou  $Q_p=D$  (pompe en fonction). Ces actionneurs ont une dynamique rapide (le mode transitoire est négligé) de types TOR (Tout  $P_i=1$  Ou Rien  $P_i=0$ ).

a) Création de bloc continu (système physique)

Le bloc système physique est constitué du schéma suivant traduisant la description donnée au paragraphe 2.3.1:

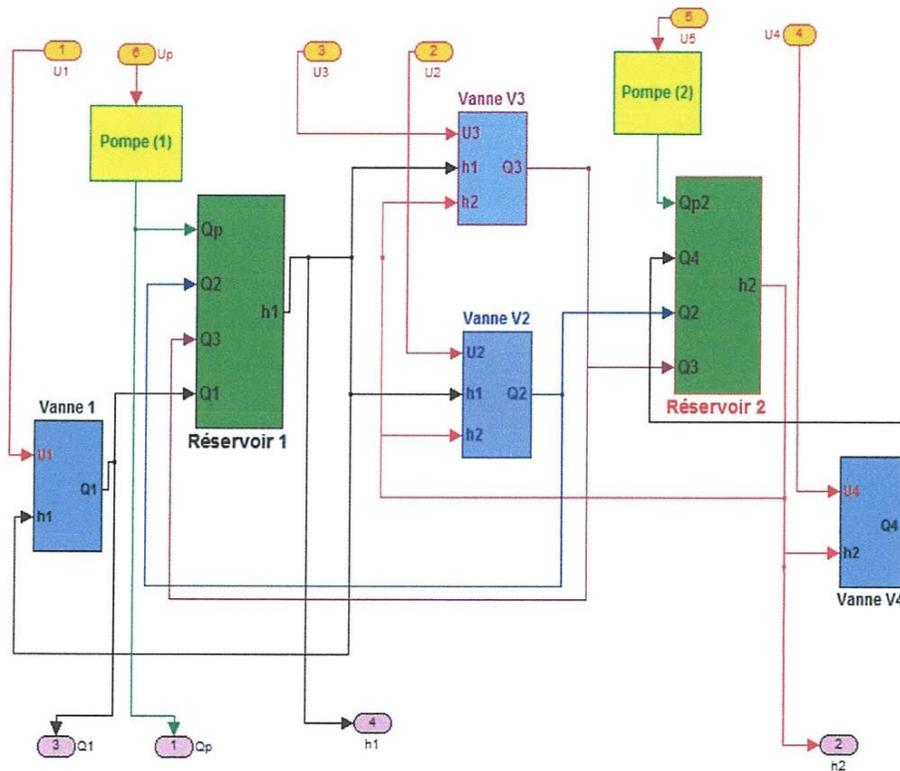


Figure 2.10 : Schéma bloc du système physique

Les sous bloc réservoir 1 et réservoir 2 construit à partir des équation différentielle décrivant les dynamique des éléments du processus. Chaque dynamique est obtenue par simulation du schéma bloc suivant :

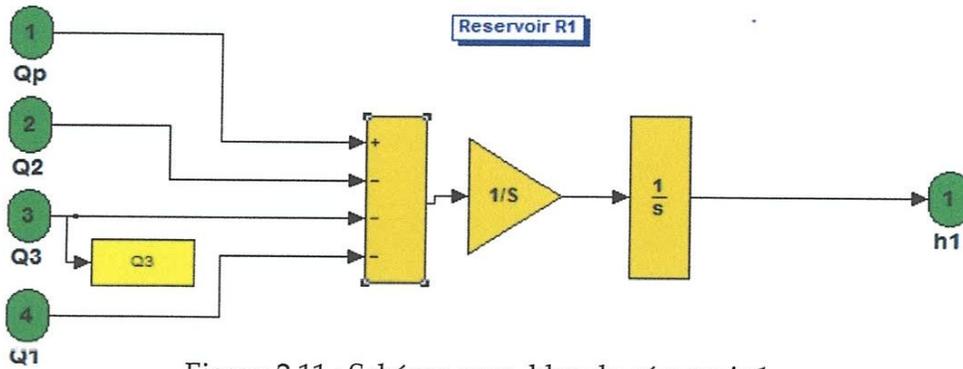


Figure 2.11 : Schéma sous bloc du réservoir 1

**Remarque 2.2 :** il faut préciser que, dans cette configuration, les conditions initiales sont maintenues à  $x_0=[0.4 \ 0]^T$  dans le bloc intégrateur.

**b) Création du Bloc automate (SDH sys2réservoir)**

Nous allons maintenant présenter le bloc **SDH sys2réservoir** sous l'environnement Stateflow. Le modèle automate hybride est réalisé séparément à l'aide du Stateflow sous forme d'un bloc. Le fonctionnement du système dépendra de l'état discret ainsi que les conditions de transitions ou événements.

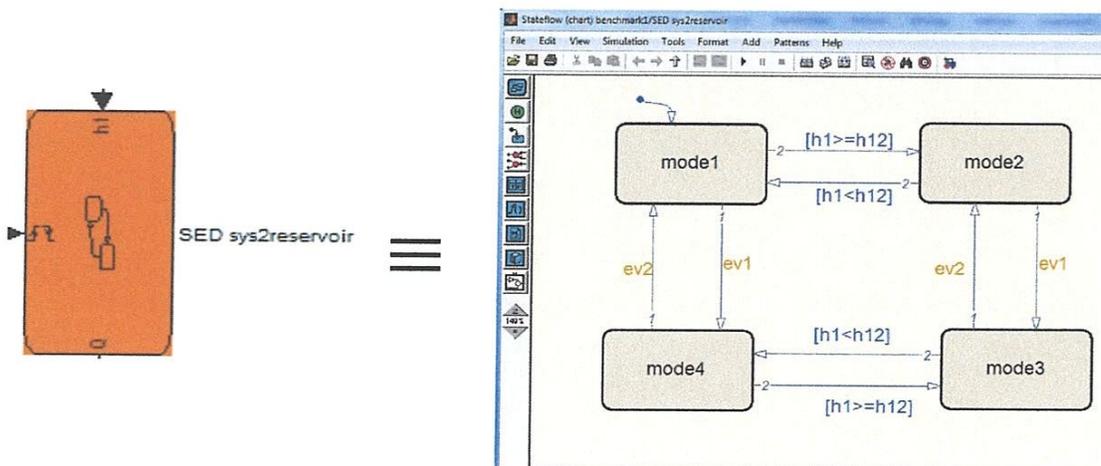


Figure 2.12 : Schéma bloc de l'automate

Réalisons maintenant la connexion des trois blocs « système physique », « SDH sys2réservoir » et « commande des entrées discrètes », nous obtenons le modèle global suivant :

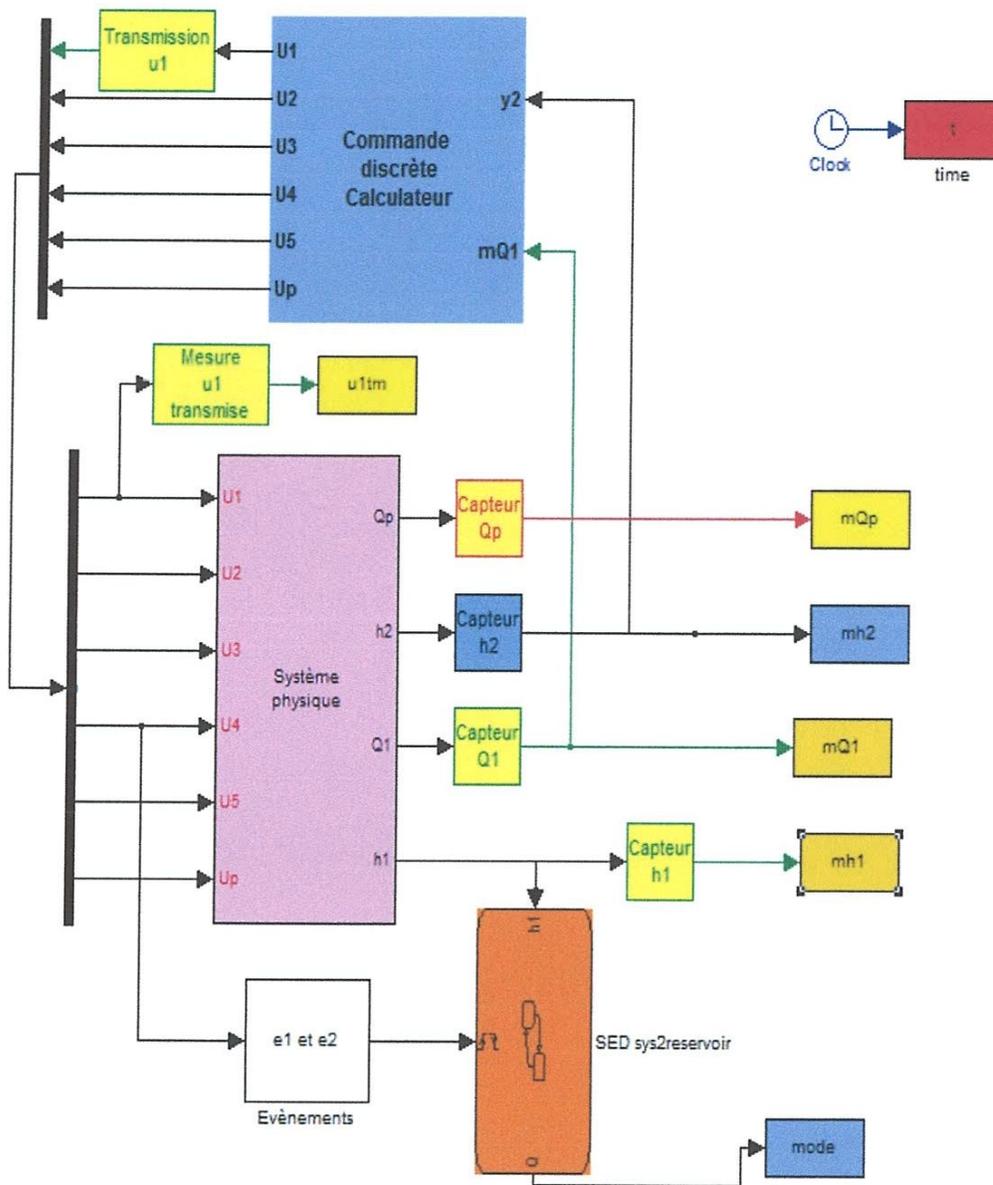


Figure 2.13: Schéma global du système à deux réservoirs.

### 2.4.3 Test de Simulation

#### a) Simulation des niveaux $h_1$ et $h_2$ lors d'un fonctionnement normal

La figure suivante illustre l'aspect continu du système sur un horizon de travail [0 500s], elle représente l'évolution de niveaux d'eau  $h_1$  et  $h_2$  dans le réservoir 1 et 2 respectivement en respectant le cahier de charges cité auparavant.

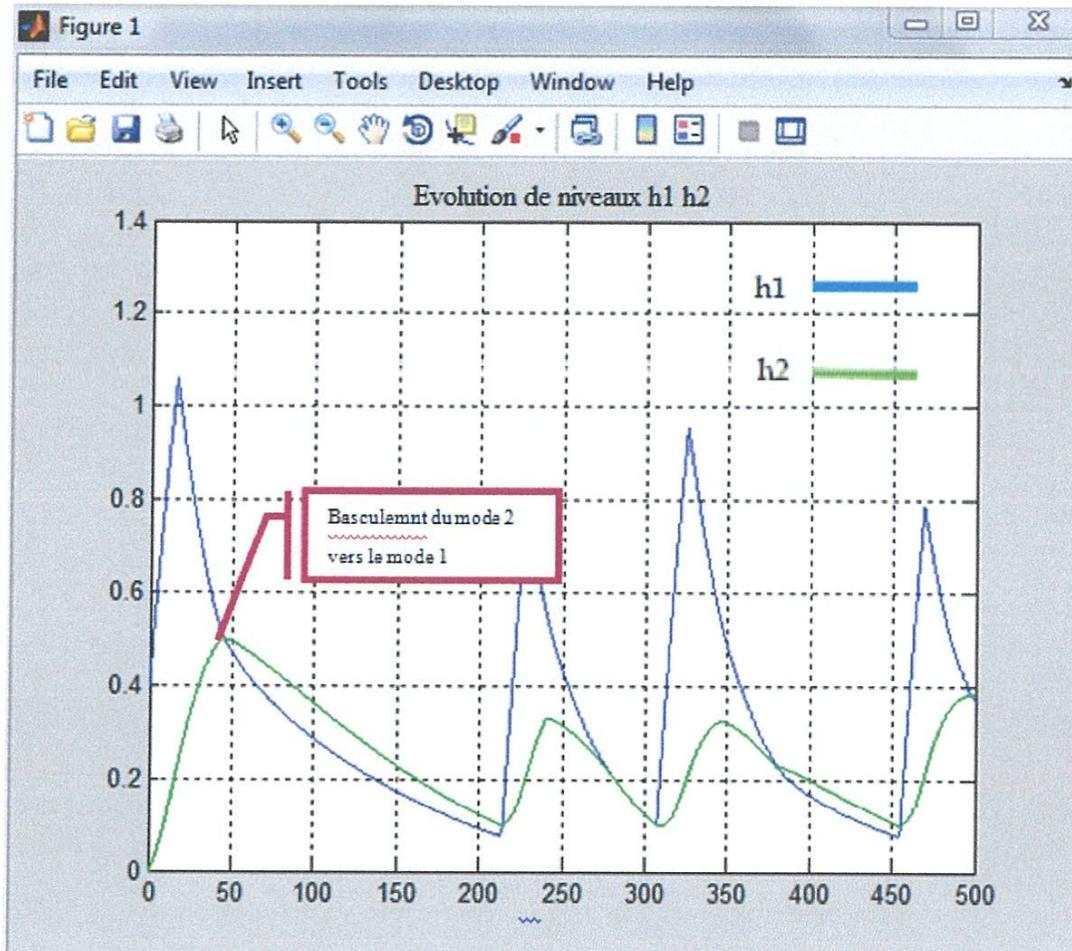


Figure 2.14 : Évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs  $R_1$  et  $R_2$

#### b) Évolution des modes, cas non défaillant

La figure suivante illustre l'aspect discret dans un environnement sans défauts et en absence de bruit et de perturbations. La Séquence des modes normaux est 1- 2-1-2-3-4-3-4-1-2-1

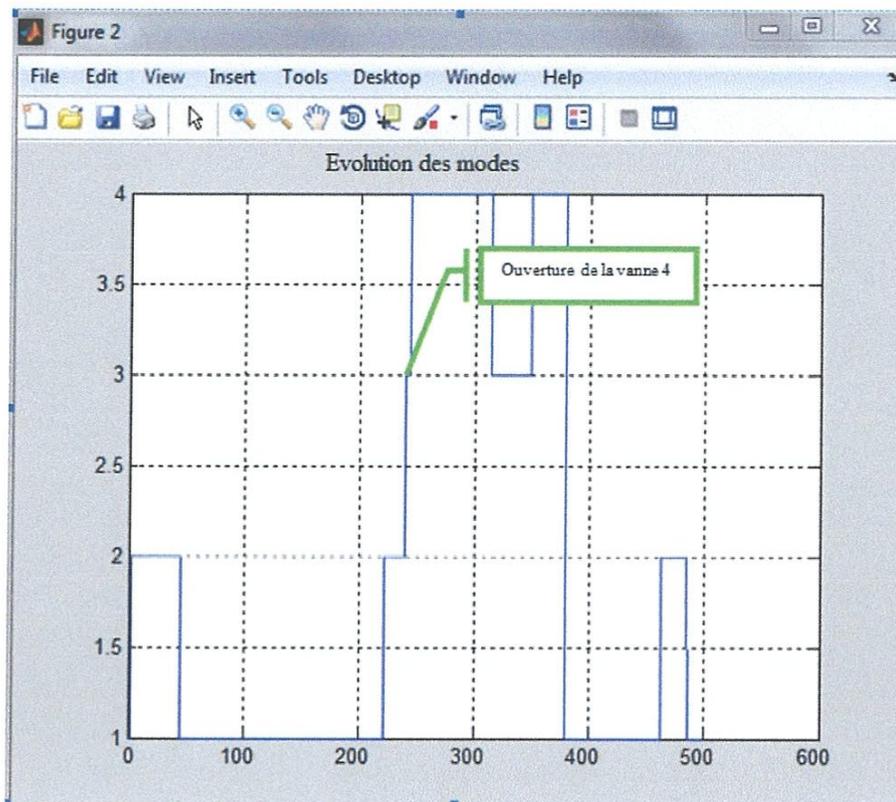


Figure 2.15 : Séquence des modes

**Remarque 2.3** Si on modifie le cahier de charge et on suppose que la vanne  $V_1$  est fermée ( $V_2$  est toujours ouverte, la pompe  $P_1$  est en marche et la vanne  $V_4$  est contrôlée), on aboutit à un comportement anormal des deux niveaux qui peuvent être interprété comme une dynamique résultant de l'apparition d'une défaillance (figures 2.16 et 2.17). On constate alors :

- \* Un débordement des deux réservoirs (les conditions de sécurité ne sont plus respectées).
- \* Evolution anormale des états discrets et donc les contraintes d'inégalité ne sont plus vérifiées.

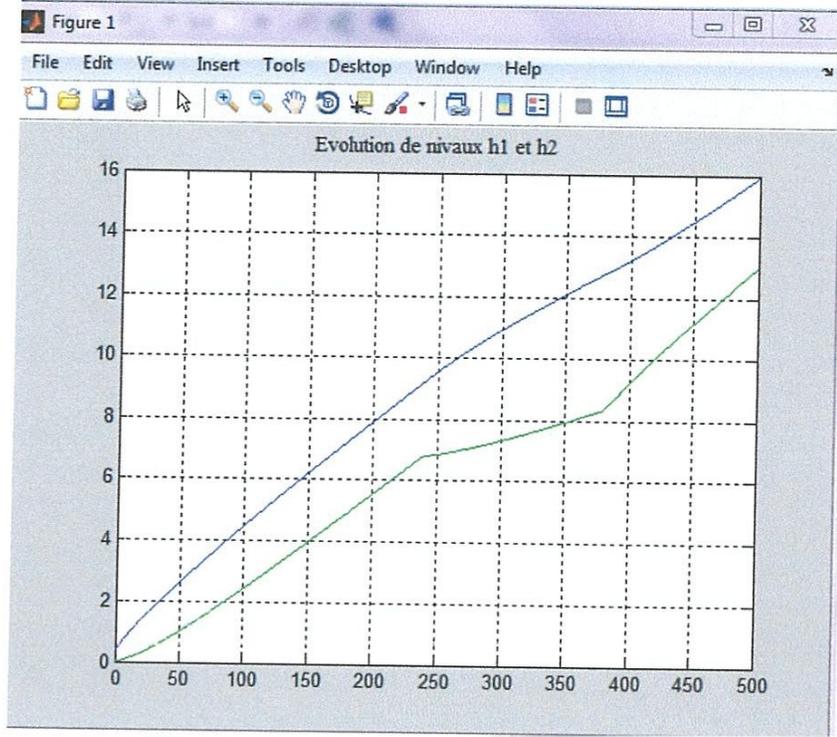


Figure 2.16 : Évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs  $R_1$  et  $R_2$  avec  $V_1$  fermée

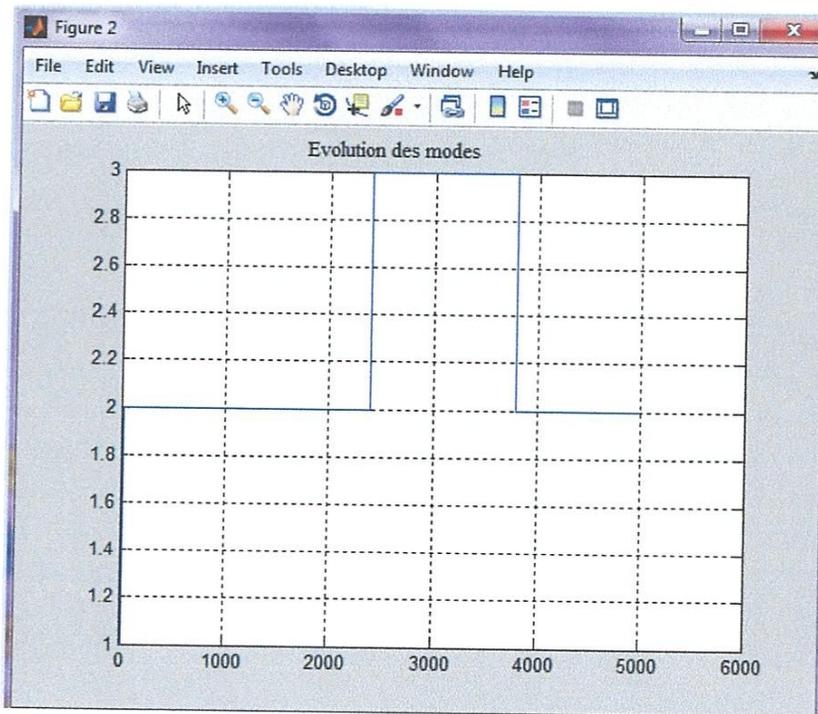


Figure 2.17 : Séquence des modes correspondants à  $V_1$

## 2.5 Conclusion

Plusieurs formalismes ont été proposés afin d'établir un modèle permettant de décrire complètement l'évolution de la partie continue, de la partie discrète et les interactions entre elles. Notre choix s'est fixé sur un modèle de SDH de type automate hybride. Ce modèle a pour avantage de décrire explicitement et avec des outils adaptés les phénomènes continus et discrets.

# Chapitre 3

## *Méthodologie de surveillance des SDH*

**Résumé :**

*Ce chapitre a pour objectif de présenter une méthode de surveillance des systèmes hybrides à base de modèle, à savoir la surveillance des contraintes d'égalité et la surveillance des contraintes d'inégalité associées à chaque mode.*

*Une méthodologie de surveillance est proposée afin d'organiser les tests de cohérence et de générer*

**Abstract: a**

*This chapter aims to present a method of monitoring systems based on a hybrid model, namely the monitoring of equality constraints and inequality constraints monitoring associated with each mode.*

*A monitoring methodology is proposed to organize the consistency tests and generate*

---

**Sommaire**

---

3.1	Modèle d'un système hybride et défaillance	53
3.2	Graphes de comportements normaux ou Graphes des prédicats	59
3.3	Surveillance des contraintes égalité dans un mode « i » donner	59
3.3.1	RRA et résidus dans un mode « i » donner	60
3.3.2	Cas linéaire : méthode de l'Espace de Parité	64
3.3.3	Calcul effectif des résidus	66
3.4	Surveillance des contraintes inégalité	67
3.5	Utilisation des résidus pour l'identification des modes	69
3.5.1	Discernabilité entre les modes	69
3.5.2	Identification des modes	70
3.5.3	Algorithme de Surveillance	72
3.6	Conclusion	74

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la méthode à base de Relations de Redondance Analytique (RRA). De manière générale, les RRA sont obtenues par élimination des variables inconnues dans un système d'équations différentielles.

La surveillance des SDH nécessite la surveillance des équations d'état (contraintes égalité), la surveillance des invariants (contraintes inégalité) et la surveillance de l'état discret et de son évolution. En se basant sur les propriétés structurelles des résidus, nous montrons comment les résidus d'élimination issus des RRA, permettent d'identifier le mode, et de contribuer à la détection et à la localisation des défaillances. Et on appliquant la méthode de diagnostique sur le système a deux réservoir de benchmark qui illustrer notre démarche (El Mezyani ,05).

### 3.1 Modèle d'un système hybride et défaillances

L'évolution dynamique d'un système hybride peut être décrite par une succession de modes. Chaque mode  $i (i \in M; M = \{1, 2, \dots, m\})$ , où  $m$  est le nombre de modes) correspond à une configuration physique possible.

#### 3.1.1 Modèle de bon fonctionnement

Dans ce qui suit, nous utilisons le formalisme des automates hybrides pour représenter le comportement des SDH. Cet outil résulte de la combinaison d'un automate à état fini avec des équations d'état continues. Dans cette représentation, les arcs orientés sont étiquetés par les conditions de transition (spontanée ou contrôlée). Chaque place correspond à un mode. Dans chacune des places, les équations différentielles et algébriques qui contraignent l'évolution de l'état continu dans ce mode ainsi que le domaine (contraintes inégalité) associé au mode sont indiqués (Starowiecki et al, 04).

#### 3.1.2 Description et caractérisation des défaillances

Comme nous l'avons spécifié dans le chapitre 2, un système est dit défaillant lorsque son comportement réel ne correspond pas au modèle de bon fonctionnement. Plusieurs sortes de défaillances peuvent se produire sur un système hybride. En effet, les défaillances peuvent affecter soit l'évolution de l'état continu dans un mode, soit l'évolution discrète c'est à dire la séquence d'états discrets. Défaillances affectant le comportement du système dans un mode.

Un mode est entièrement défini par :

- Un ensemble de contraintes égalité (équations différentielles ou algébriques)
- Un domaine défini par un ensemble de contraintes inégalité.
- Une modalité de l'état discret, c'est à dire une configuration physique du système.

Une défaillance se produisant dans un mode peut affecter une de ces trois entités.

Nous proposons dans cette section une classification des défaillances suivant leurs effets sur le modèle (Cocquempot, 04).

### 3.1.3 Défaillances influençant le comportement continu du système dans un mode

En fonctionnement normal, un mode  $i$  (correspondant à l'état discret  $q_i$ ) est entièrement caractérisé par:

- une modalité de l'état discret représentant une configuration physique du système

$$q(t) = q_i$$

les contraintes algébro différentielles  $\dot{x}_i = f_i(\cdot)$  et  $y_i = h_i$  représentant un ensemble de contraintes égalité,

- une région (ou invariant) dans laquelle évoluent les variables d'état continues. Ce domaine est décrit par un ensemble de contraintes inégalité  $g_i(x_i(t), u_i(t)) \leq 0$

Une défaillance se produisant dans un mode, sans que cela n'entraîne de changement de mode (donc d'état discret), peut affecter soit les contraintes égalité soit les contraintes inégalité du mode.

#### a) Défaillances affectant les contraintes égalité.

Ces défaillances sont classiquement considérées dans la communauté FDI ( Fault Detection and Isolation). Dans le cas où l'objectif de surveillance est de localiser et identifier les défaillances, des modèles de niveau 2 de connaissance seront considérés pour chaque mode. Des variables représentant les défaillances sont ajoutées aux équations d'état afin de décrire quelles composantes du système sont affectées par chaque défaillance.

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t), \varphi_i(t)) \\ y_i(t) = h_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t), \varphi_i(t)) \end{cases} \quad (3.1)$$

où  $\varphi_i \in IR^{k_i}$  est le vecteur de défaillances associé au mode  $i$ . Ce modèle représente le fonctionnement défaillant du mode  $i, (i \in M)$  dont la défaillance modifie la trajectoire d'état continu du système dans le mode  $i$  (EL Meznyani,05).

#### b) Défaillances affectant les contraintes inégalité.

L'invariant du mode est décrit par un ensemble de contraintes inégalité qui représentent soit des limitations physiques du système, soit des domaines pour lesquels il n'y a pas de changement de caractéristiques physiques du système. Les défaillances de composants entraînant la non vérification d'un ensemble de contraintes inégalité (ou en abrégé *défaillances de contraintes inégalité*) n'ont reçu que très peu d'attention dans la littérature même si elles entraînent souvent de très lourdes conséquences pour le système lui-même ou son environnement et constituent de ce fait une classe très importante de défaillances

#### c) Défaillances affectant l'évolution discrète

L'évolution discrète du système correspond à un chemin (ou trajectoire) dans l'automate hybride, c'est à dire à une succession de places dans un ordre déterminé lorsque le système est en bon fonctionnement. Toute évolution dans l'automate non conforme au comportement normal est considérée comme une défaillance. Trois types de défaillances peuvent être considérés :

- **Transition vers un mode non successeur** Si le système fonctionne correctement, seul un sous ensemble  $\sum(i)$  de modes (appelés successeurs) sont accessibles à partir d'un mode  $i$ . Une transition du mode  $i$  vers un mode n'appartenant pas à  $\sum(i)$  est donc une défaillance.

- **Non transition.** Ce type de défaillance se produit lorsque le système reste dans le mode courant alors que la condition de transition est vérifiée et que le système devrait normalement changer de mode.
- **Transition anormale vers un mode successeur.** Ce type de défaillance se produit lorsque le système passe d'un mode  $i$  vers un successeur potentiel  $j$  alors que la condition normale de transition n'est pas vérifiée.

Ces trois types de défaillances peuvent être détectés en comparant l'évolution de l'état discret du système en fonctionnement avec l'évolution prévue si le système se comporte normalement. Ceci revient à comparer les trajectoires réelles et théoriques dans l'automate hybride.

Si le seul objectif est de détecter les comportements anormaux, seuls les modes accessibles en fonctionnement normal sont considérés. Si le mode courant ne fait pas partie de l'ensemble de modes normaux accessibles, le système est déclaré défaillant. Par contre, si l'on veut caractériser voire diagnostiquer complètement (identifier la cause) les défaillances, il est nécessaire de considérer toutes les configurations (atteignables ou non en fonctionnement normal) du système, c'est à dire toutes les modalités que peut prendre l'état discret. Ceci entraîne bien évidemment une explosion du nombre de modes, mais le diagnostic des défaillances est à ce prix! Des solutions intermédiaires (utilisation d'un mode correspondant à plusieurs types de défaillances) peuvent être envisagées afin de réduire le nombre de modes à considérer. Cependant ces solutions ne permettront pas d'atteindre la même finesse de diagnostic. (Cocquempot,04)

### 3.1.4 Classification des défaillances détectables

Les défaillances dans un système peuvent provenir des capteurs, des actionneurs ou du procédé lui-même. Le cahier des charges de surveillance, élaboré à partir d'une analyse de risques menée hors-ligne, précise quels éléments du système doivent être surveillés.

Une défaillance du cahier des charges est détectable si au moins une des composantes du modèle, à savoir les contraintes égalité, les contraintes inégalité et les transitions, est

affectée par cette défaillance. La détectabilité d'une défaillance dépend du mode dans lequel évolue le système.

Nous distinguons par la suite 4 ensembles de défauts associés à chaque mode  $i$ :

- $\Phi_{CE}(i)$  représente l'ensemble de défauts qui influencent les Contraintes Égalité.  $\bar{\Phi}_{CE}(i)$  représente les défaillances du cahier des charges n'affectant pas la contrainte égalité du mode  $i$ .
- $\Phi_{CI}(i)$  représente l'ensemble de défauts qui influencent les Contraintes Inégalité.  $\bar{\Phi}_{CI}(i)$  représente les défaillances du cahier des charges n'affectant pas la contrainte inégalité du mode  $i$ .
- $\Phi_{NT}(i)$  représente l'ensemble de défauts qui entraînent des non-transitions, c'est-à-dire qui maintiennent le système dans le mode  $i$  alors qu'il devrait, en fonctionnement normal, quitter ce mode.  $\bar{\Phi}_{NT}(i)$  représente les défaillances du cahier des charges n'entraînant pas de non-transition dans le mode  $i$ .
- $\Phi_{FT}(i)$  représente l'ensemble de défauts qui forcent une transition à se produire à partir du mode  $i$ , c'est à dire qui entraînent un changement de mode.

L'ensemble de défaillances détectables dans le mode  $i$  noté  $\Phi^d(i)$  et défini par

$$\Phi^d(i) = \Phi_{CI}(i) \cup \Phi_{CE}(i) \cup \Phi_{NT}(i) \cup \Phi_{FT}(i) \quad (3.2)$$

Les ensembles  $\Phi_j$  correspondent à des signatures de défaillances. Ces signatures sont récapitulées dans la table des signatures théoriques (Tab 3.1) en attribuant un 1 lorsque la défaillance influence théoriquement soit la CE du mode  $i$ , soit la CI du mode  $i$ , soit encore engendre une incohérence au niveau de la transition en maintenant le système dans le mode  $i$ . Dans la procédure de surveillance en ligne, des tests de cohérence par rapport aux CE, aux CI et aux transitions seront réalisés et permettront d'obtenir une signature pratique du défaut. La comparaison des signatures pratiques et des signatures théoriques permettra ainsi de caractériser le défaut.

Tab 3.1: Sous-ensembles de défauts associés à des situations de défaillances dans le mode  $i$

	Ensembles de défauts
$\Phi_1(i)$	$\Phi_{CE}(i) \cap \bar{\Phi}_{CI}(i) \cap \bar{\Phi}_{NT_r}(i)$
$\Phi_2(i)$	$\bar{\Phi}_{CE}(i) \cap \Phi_{CI}(i) \cap \bar{\Phi}_{NT_r}(i)$
$\Phi_3(i)$	$\bar{\Phi}_{CE}(i) \cap \bar{\Phi}_{CI}(i) \cap \Phi_{NT_r}(i)$
$\Phi_4(i)$	$\Phi_{CE}(i) \cap \Phi_{CI}(i) \cap \bar{\Phi}_{NT_r}(i)$
$\Phi_5(i)$	$\bar{\Phi}_{CE}(i) \cap \Phi_{CI}(i) \cap \Phi_{NT_r}(i)$
$\Phi_6(i)$	$\Phi_{CE}(i) \cap \bar{\Phi}_{CI}(i) \cap \Phi_{NT_r}(i)$
$\Phi_7(i)$	$\Phi_{CE}(i) \cap \Phi_{CI}(i) \cap \Phi_{NT_r}(i)$

### 3.2 Graphes de comportements normaux

Les GPFN sont utilisées comme modèle de référence de bon comportement du système. Tout écart, synonyme d'anomalie, permet la détection. Quant aux GPFD permettent la localisation des défaillances détectées. Ainsi, les événements indiqués sur les arcs du GPFD sont des éléments des ensembles des défaillances détectables (figure 3.1).

où  $x_i(t) \in X_i \subseteq R^n$  ( $\dim[x_i(t)] = ni$ ) est le vecteur d'état,  $u_i(t) \in R^{p_i}$  est un vecteur d'entrée (commande continue) supposé connu,  $y_i(t) \in Y_i \subseteq R^{\gamma_i}$  ( $\dim[y_i(t)] = \gamma_i$ ) est le vecteur des sorties mesurées. Les fonctions  $f_i$  et  $h_i$  sont supposées analytiques de classe  $C^\infty$

La forme générale de RRA est :

$$\overline{y}^{(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{i\gamma_i})} = \overline{y}^{\overline{s}_i} = G_{\overline{s}_i}(x_i, \overline{u}^{\overline{s}_i}) \tag{3.4}$$

Où  $\overline{y}_i^{\overline{s}_i}$  est le vecteur des mesures et ces dérivées successives jusqu'à l'ordre  $\overline{s}_i$ :

$$\overline{y}_i^{\overline{s}_i} = \begin{bmatrix} y_{i1} \\ \frac{dy_{i1}}{dt} \\ \frac{d^{s_{i1}y_{i1}}}{dt^{s_{i1}}} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{i\gamma_i} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{d^{s_{i\gamma_i}y_{i\gamma_i}}}{dt^{s_{i\gamma_i}}} \end{bmatrix}$$

Le système d'équation (3.4) comporte comme inconnues les composantes du vecteur x. Par un choix correct des indices de dérivation si, l'élimination de ce vecteur x peut être rendue possible. Différentes techniques d'élimination du vecteur x peuvent être utilisées suivant la nature des fonctions f et h :

- le cas linéaire a été très largement étudiée dans la littérature (voir par exemple (Chow and Willsky, 1984; Gertler, 1991; Patton and Chen, 1991a)). L'équation (.) fait alors apparaître les matrices d'observabilité et de commandabilité. En projetant cette équation dans l'espace supplémentaire à l'espace engendré par la matrice d'observabilité, on obtient l'ensemble de RRA. Cet espace dans lequel les équations sont projetées est appelé : Espace de Parité.

-le cas non linéaire où les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  sont polynomiales a fait l'objet de nombreux développements dans les dix dernières années. En peut cité les travaux (Comtet-Varga, 1997; Staroswiecki and Comtet-Varga, 2001) et (Guernez-Jean, 1998), (Christophe, 2001).

Les expressions analytiques des RRA peuvent être obtenues en utilisant des algorithmes d'élimination formelle tels l'utilisation des bases de Groebner (Cox et al, 1992), la théorie de l'élimination (Diop, 1991) ou les ensembles caractéristiques (Ljung and Glad, 1999; Ritt, 1950; Glad, 1989).

-dans le cas où les fonctions  $f(\cdot)$  et  $h(\cdot)$  ne sont pas polynomiales, en basent sur les résultats de travaux de Dilek Düstegor en utilisant l'analyse structurelle méthode générale permettant de générer les RRA automatique.

En éliminant le vecteur  $x$  dans l'équation (3.5), on obtient un ensemble de RRA que l'on peut mettre sous la forme générale :

$$w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) = 0 \quad (3.5)$$

#### \* Forme de calcul et forme d'évaluation des résidus

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, un résidu est un signal qui quantifie la cohérence des données prélevées sur le système avec un modèle comportemental de celui-ci. Pour être utilisable en surveillance, un résidu doit être indépendant des conditions initiales internes inconnues du système. De plus pour garantir la détection des défaillances, un résidu doit être affecté par ces défaillances mais ne doit pas être affecté par les perturbations.

La fonction vectorielle  $w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i})$ , appelée communément *forme de calcul du résidu*, est calculable en ligne si on suppose que les entrées et sorties ( $u_i$  et  $y_i$ ) ainsi que leurs dérivées successives sont accessibles à tout instant.

Les RRA seront vérifiées, donc les résidus seront nuls, si le système se comporte nominalement, c'est à dire si aucune perturbation ni défaillance ne vient perturber son comportement.

Dans le cas contraire certains résidus sont différents de zéro et indiquent un écart entre le comportement en ligne du système et la référence nominale. Les résidus s'expriment en fonction des entrées inconnues et des défaillances. L'expression du résidu en fonction de ces variables inconnues est appelée *forme d'évaluation du résidu*. Elle est obtenue en considérant les équations d'état associées au mode  $i$  et considérées en présence des perturbations et des défauts

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t), \varphi_i(t)) \\ y_i(t) = h_i(x_i(t), u_i(t), d_i(t), \varphi_i(t)) \end{cases} \quad (3.6)$$

où  $d_i \in IR^\delta$  est le vecteur des perturbations et  $\varphi_i \in IR^{k_i}$  est le vecteur des défaillances. En répétant la même procédure de dérivation et de substitution que précédemment, on obtient:

$$\bar{y}_i^{(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im})} = \bar{y}_i^{\bar{s}_i} = \Gamma_{\bar{s}_i}(x_i, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i}) \quad (3.7)$$

En éliminant le vecteur  $x_i$  en suivant exactement la même méthode d'élimination qui a permis d'obtenir l'expression analytique de la fonction vectorielle  $w_i^c$ , on obtient

$$w_i^f(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i}) = 0 \quad (3.8)$$

La relation 3.8 est vérifiée en présence ou en absence de perturbations et de défaillances.

En retirant à chaque membre de l'égalité la quantité  $w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i})$ , on obtient

$$w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) = w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) - w_i^f(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i}) \quad (3.9)$$

La fonction  $w_i^e = w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) - w_i^f(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i})$  est appelée *forme d'évaluation du résidu*.

**Remarque 3.1** Si les fonctions  $f_i$  et  $h_i$  sont polynomiales, la fonction  $w_i^e$  peut être simplifiée. En effet, dans ce cas, la fonction  $w_i^f$  peut toujours se décomposer de la manière suivante:

$$w_i^f(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i}) = w_i^c(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) + w_i^{\varphi_i}(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i}) \quad (3.10)$$

L'expression de  $w_i^f$  devient donc:

$$w_i^e = w_i^{\varphi_i} (\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}, \bar{d}_i^{\bar{s}_i}, \bar{\varphi}^{\bar{s}_i}) \quad (3.11)$$

#### \* Résidus structurés et robustes

Les résidus obtenus sont *a priori* sensibles aux perturbations (vecteur  $di$ ) et aux défaillances (vecteur  $\varphi_i$ ). Afin de les rendre utilisables pour la détection de défauts, ces résidus doivent être robustes (au sens strict, c'est à dire complètement insensibles) vis à vis des perturbations  $di$ . On dit qu'ils sont *découplés (strictement)* des perturbations. De plus, la localisation d'une défaillance peut être réalisée à l'aide d'un ensemble de résidus structurés, Chaque résidu doit donc être sensible à un sous-ensemble de défaillances et robuste aux autres. Les résidus structurés et robustes aux perturbations peuvent être obtenus de deux manières différentes :

- en une seule étape, c'est à dire en étendant la procédure d'élimination du vecteur  $x_i$  aux perturbations et à des sous ensembles de défaillances. Cette méthode sera détaillée dans le cas linéaire dans le paragraphe suivant.
- en deux étapes, c'est à dire en considérant dans un premier temps l'élimination de  $x_i$ , puis en éliminant les perturbations et défaillances par combinaisons des RRA obtenue (Staroswiecki et al, 04).

### 3.3.2 Cas linéaire : méthode de l'Espace de Parité

La génération des RRA et des résidus associés dans le cas des systèmes linéaires a été très largement étudiée dans la littérature (voir par exemple (Chow and Willsky,84); Gertler,91; Patton and Chen,91) Nous revenons dans cette section en détail sur cette approche. En présence des perturbations et de défaillances, les équations d'état et de mesure dans le mode  $i$  dans le cas linéaire s'écrivent :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i(x_i(t), B_i u_i(t) + G_i^1 d_i(t) + F_i^1 \varphi_i \\ y_i(t) = C_i x_i(t), D_i u_i(t) + G_i^2 d_i(t) + F_i^2 \varphi_i \end{cases} \quad (3.12)$$

où  $A_i, B_i, C_i$  et  $D_i$  sont des matrices de dimensions appropriées associées au mode  $i$ . Les matrices constantes  $G_i^1, G_i^2$  sont associées aux perturbations et  $F_i^1, F_i^2$  sont associées aux défaillances. Ces matrices d'influence sont supposées connues et de dimensions appropriées.

En appliquant la procédure de dérivation et de substitution décrite précédemment dans le cadre général, on obtient le système d'équation (3.7) sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \bar{y}_i^{\bar{s}_i} - OBS(C_i, A_i, s_i)x_i + COM(A_i, B_i, C_i, D_i, s_i)\bar{u}_i^{s_i} \\ + COM(A_i + G_i^1, C_i, G_i^2, s_i)d_i^{\bar{d}_i} + COM(A_i + F_i^1 + C_i, F_i^2, s_i)\bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i} \end{aligned} \quad (3.13)$$

où  $OBS(C_i, A_i, s_i), COM(A_i, B_i, C_i, D_i, s_i)$  sont respectivement les matrices d'observabilité et d'influence de commande à l'ordre  $s_{ij}$  de la  $j$ ème composante de  $y_i$ . Les formes explicites de ces matrices sont les suivantes:

$$OBS(C_i, A_i, s_i) = \begin{bmatrix} C_{ij} \\ C_{ij}A_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{ij}A_i^{s_{ij}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Et

$$COM(A_i, B_i, C_i, D_i, s_i) = \begin{bmatrix} D_{ij} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ C_{ij}B_i & D_{ij} & 0 & \dots & \cdot \\ C_{ij}A_iB_i & C_{ij}B_i & 0 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ C_{ij}A_i^{s_{ij}-1}B_i & C_{ij}A_i^{s_{ij}-2}B_i & \dots & C_{ij}B_i & D_{ij} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Les RRA sont obtenues en projetant l'équation (3.13) dans l'espace orthogonal à celui engendré par la matrice c'est à dire dans le noyau à gauche de  $OBS(C_i, A_i, s_i)$ . Cet espace est appelé classiquement espace de parité d'ordre  $\bar{s}_i$ .

Une base génératrice de l'espace de parité est donnée par la matrice  $W_i$  de rang plein ligne telle que :

$$W_i \cdot OBS_i = 0 \quad (3.16)$$

En multipliant à gauche les deux membres de l'équation (3.13) par  $W_i$ , on obtient la relation suivante

$$W_i \cdot (\bar{y}_i^{\bar{s}_i} - C_i(A_i, B_i, \bar{s}_i) \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) - W_i (C_i(A_i, G_i^l, \bar{s}_i) \bar{d}_i^{\bar{s}_i} + C_i(A_i, F_i^l, \bar{s}_i) \bar{\varphi}_i^{\bar{s}_i}) = 0 \quad (3.17)$$

Les formes de calcul et d'évaluation sont alors déduites

- La forme de calcul de résidu est

$$r_i(t) = (W_i \bar{y}_i^{\bar{s}_i} - W_i C_i(A_i, B_i, C_i, D_i, \bar{s}_i) \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) \quad (3.18)$$

Les résidus calculés sont a priori sensibles aux perturbations et aux défaillances. Les résidus doivent être robustes (strictement) aux perturbations. De plus pour faciliter la localisation de la défaillance, les résidus doivent être structurés.

### 3.3.3 Calcul effectif des résidus

Les formes de calcul des résidus sont des fonctions des variables d'entrées connues et des sorties mesurées et de leur dérivées successives. En pratique, les résidus sont calculés à chaque instant  $t = k \cdot t_e$ , où  $t_e$  est une période d'échantillonnage. Le calcul de la valeur numérique des résidus à chaque instant nécessite l'évaluation des dérivées des variables d'entrées et de sortie. Ceci n'est pas sans poser un certain nombre de difficultés dans un environnement bruité. Différents algorithmes sont proposés dans la littérature: approximation polynômiale (Christophe, 01), utilisation de fonctions splines (Dierckx, 94), utilisation d'observateurs (Levant, 98). Ces algorithmes sont en général associés à des procédures de filtrage des données. Afin d'éviter le calcul des dérivées, une autre voie possible consiste à considérer dès le départ un modèle d'état sous forme discrétisée. La méthode d'obtention des résidus est alors similaire à celle exposée précédemment, en considérant les variables de sortie à des instants d'échantillonnage successifs. Il est alors possible d'exprimer le vecteur des sorties sur un horizon temporel

$[k; k+p]$  en fonction des entrées  $u$  sur ce même horizon et de la condition initiale sur l'état  $x(k)$ . Le problème se ramène alors à l'élimination de cette condition initiale  $x(k)$ . Cette méthode est attractive puisqu'elle permet d'obtenir les résidus comme des fonctions algébriques de variables connues prélevées à des instants spécifiés. Cette méthode n'est cependant pas toujours utilisable puisqu'il n'existe pas de méthode systématique permettant de discrétiser de manière exacte un modèle d'état non linéaire. De plus, dans le cas où cette discrétisation est possible (cas linéaire en particulier), les méthodes d'estimation des dérivées associées à des procédures de filtrage fournissent d'aussi bons résultats.

### 3.4 Surveillance des contraintes inégalité

La surveillance d'un mode nécessite également la surveillance des contraintes inégalité, c'est-à-dire de l'invariant de celui ci. Les contraintes s'expriment sous la forme :

$$Y_i(x_i, u_i) \leq 0 \quad (3.19)$$

Une technique classique consiste à transformer ces contraintes inégalité en contraintes égalité et à tester le signe de la fonction  $Y_i(x_i, u_i)$ . Afin de rendre calculable la fonction, une procédure d'élimination des variables inconnues doit être utilisée en considérant cette fonction comme une contrainte algébrique ajoutée au modèle d'état. On obtient ainsi le système d'inégalités testables:

$$Y_i(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) \leq 0 \quad (3.20)$$

Le membre de gauche est calculable en ligne. Une défaillance sera détectée si l'évaluation de chaque terme de la fonction  $Y$  fournit un résultat positif

Dans le cas linéaire, la méthode de l'espace de parité peut être appliquée (Staroswiecki and Guerchouh, 99; 00). Rappelons brièvement cette approche. En linéaire, les contraintes inégalité s'expriment par

$$H_i x_i(t) + h_i \leq 0 \quad (3.21)$$

avec  $H_i$  une matrice constante et  $h_i$  un vecteur constant.

Considérons un vecteur d'écart  $\rho_i(t) \in \mathbb{R}^{s_i}$  tel que:

$$\rho_i = H_i x_i(t) + h_i \quad (3.22)$$

La surveillance des contraintes inégalité consiste à tester à chaque instant  $k$  le signe de  $\rho_i(k)$ . Si toutes les composantes de  $\rho_i(k)$  sont inférieures ou égales à zéro, les contraintes inégalité associées au mode  $i$  sont vérifiées. Si certaines composantes du vecteur  $\rho_i(k)$  sont strictement supérieures à zéro, alors les contraintes ne sont pas vérifiées. Pour tester  $\rho_i(k)$  il faut que ce soit une quantité calculable. Dans le cas où le mode  $i$  est observable, deux techniques sont envisageables :

- Soit à partir des contraintes égalité on exprime  $x_i$  en fonction de  $\bar{y}_i$  et  $\bar{u}_i$  puis on remplace dans l'expression de  $\rho_i(k)$
- soit on construit le système étendu

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_i(t) \\ \rho_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} OBS_i(A_i, C_i, \bar{s}_i) \\ H_i \end{bmatrix} x_i(t) + \begin{bmatrix} COM_i(A_i, B_i, C_i, D_i, \bar{s}_i) \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u}_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ h_i \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Puis on projette dans l'espace orthogonal à celui engendré par les colonnes de

$$\begin{bmatrix} OBS_i(A_i, C_i, \bar{s}_i) \\ H_i \end{bmatrix}$$

Ainsi, afin de calculer  $\rho_i(k)$  la projection dans l'espace permet d'obtenir la forme de calcul de  $\rho_i(k)$  en fonction de  $y_i$  et  $u_i$ . Les conditions d'existence de la matrice de projection  $W_i$  sont données dans (Guerchouh et Staroswiecki, 00).

### 3.5 Utilisation des résidus pour l'identification des modes

Les deux sections précédentes ont présenté deux outils qui pourront être utilisés pour détecter des défaillances affectant les contraintes égalité et les contraintes inégalité. En fait, les résidus structurés calculés dans le mode  $i$  peuvent ainsi être considérés comme des signatures de celui-ci. Des propriétés structurelles peuvent être ajoutées pour permettre de déterminer sans ambiguïté le mode en cours ainsi que le composant défaillant. Pour cela, la notion de discernabilité sera considérée afin de garantir que les modes soient identifiables.

Dans cette section, nous définissons cette notion de discernabilité entre les modes, et nous proposons les conditions nécessaires et suffisantes pour que deux modes soient discernables en fonctionnement normal. La notion de non discernabilité permet de caractériser d'autres propriétés structurelles du système comme par exemple l'observabilité et la similarité (EL Mezyani, 05).

Nous nous intéressons particulièrement à la propriété de similarité des modes afin de réduire le nombre de modes constituant les GPFN et les GPFD.

#### 3.5.1 Discernabilité entre modes

##### Définition

Deux modes  $i$  et  $j$  sont non discernables si et seulement si le couple de signaux réels  $(u_i(t), y_i(t))$  prélevés en ligne sur le système, peut provenir indifféremment du mode  $i$  ou du mode  $j$ . On dit aussi que le couple  $(u_i(t), y_i(t))$  est consistant avec les deux modèles d'états définissant les modes  $i$  et  $j$ .

Les résidus étant des indicateurs de consistance, ils permettent donc de caractériser la discernabilité.

Soit  $w_{ci}$  et  $w_{cj}$  deux formes de calcul de résidus obtenues à partir des équations d'état des modes respectifs  $i$  et  $j$ . Ces formes de calcul s'écrivent :

$$w_{ci}(\bar{y}_i^{\bar{s}_i}, \bar{u}_i^{\bar{s}_i}) \quad (3.24)$$

Et

$$w_{cj}(\bar{y}_j^{\bar{s}_j}, \bar{u}_j^{\bar{s}_j}) \quad (3.25)$$

**Théorème** Les deux modes i et j sont non discernables  $w_{ci}$  et  $w_{cj}$  si et seulement si,  $w_{ci}$  et  $w_{cj}$  sont identiquement nuls lorsque :

- les vecteurs  $\bar{y}_i^{\bar{s}_i}$  et  $\bar{u}_i^{\bar{s}_i}$  sont remplacés respectivement par l'expression de  $\bar{y}_i^{\bar{s}_i}$  donnée par (3.4) et  $\bar{u}_i^{\bar{s}_i}$  dans l'expression de  $w_{ci}$
- les vecteurs  $\bar{y}_j^{\bar{s}_j}$  et  $\bar{u}_j^{\bar{s}_j}$  sont remplacés respectivement par l'expression de  $\bar{y}_j^{\bar{s}_j}$  donnée par (3.4) et  $\bar{u}_j^{\bar{s}_j}$  dans l'expression de  $w_{cj}$

Lorsque les équations d'état sont linéaires, il été montré que deux modes sont non discernables en l'absence de perturbation et de défaillance si et seulement si la condition suivante est vérifiée :

$$\text{rang}[\text{OBS}_i] = \text{rang}[\text{OBS}_j] = \text{rang}[\text{OBS}_i \text{ OBS}_j \Delta_{ij}] \quad (3.26)$$

### 3.5.2 Identification des modes

L'identification de mode est effectuée en vérifiant la cohérence des signaux prélevés en ligne sur le système avec les modèles d'état continu définissant les modes du SDH. Ces signaux correspondent aux mesures  $y_r(t)$  et aux entrées  $u_r(t)$  du système. Le mode "i" est identifié comme le mode courant (ou mode actif), si les données réelles  $y_r(t)$  et  $u_r(t)$  sont consistantes sans ambiguïté avec le modèle du mode "i".

Sous l'hypothèse que les modes sont tous discernables, les résidus structurés permettent non seulement de détecter les défaillances mais également d'identifier le mode courant (défaillant ou non défaillant) (Tab.2). En effet, dans le cas de modes discernables, si les résidus du mode  $i$  sont égaux à zéro alors les résidus du  $j (\forall j \in M (j \neq i))$  sont différents de zéro. La signature des résidus calculés nous permet donc d'identifier le mode en cours. Cette identification menée en-ligne permet en conséquence de détecter les transitions d'un mode vers un autre.

Tab3.2 : Table des signatures théoriques pour l'identification du mode et la localisation de défauts dans ce mode

Résidus	mode $i$				...	mode $j$			
	$\phi_1$	$\phi_2$	...	$\phi_{k_i}$	...	$\phi_1$	$\phi_2$	...	$\phi_{k_j}$
$r_{i1}(\bar{\phi}_1, \phi_2, \dots, \phi_{k_i})$	<b>0</b>	1		1		1	1		1
$r_i : r_{i2}(\phi_1, \bar{\phi}_2, \dots, \phi_{k_i})$	1	<b>0</b>		1	$\vdots$	1	1		1
$\vdots$			$\ddots$		$\vdots$			$\vdots$	
$r_{ik_1}(\phi_1, \phi_2, \dots, \bar{\phi}_{k_i})$	0	1		<b>0</b>	1 ... 1	1	1		1
$\vdots$					$\ddots$				
$r_{j1}(\bar{\phi}_1, \phi_2, \dots, \phi_{k_j})$	1	1		1	1 1 1	<b>0</b>			
$r_j : r_{j2}(\phi_1, \bar{\phi}_2, \dots, \phi_{k_j})$	1	1		1	1 1 1	1	<b>0</b>		
$\vdots$			$\vdots$		$\vdots$			$\ddots$	
$r_{jk_2}(\phi_1, \phi_2, \dots, \bar{\phi}_{k_j})$	1	1		1	1 1 1	1	1		<b>0</b>

En fait, en présence de perturbations (et en absence de défaut) les résidus du mode courant ne sont pas parfaitement égaux à zéro. Deux types d'erreurs peuvent alors se présenter :

- continuer d'identifier le mode  $i$  alors que le système a évolué vers le mode  $j$ ,

- détecter un changement de mode (identifier le mode  $j$ ) alors que le système reste dans le mode  $i$  (pas d'évolution discrète)

### 3.5.3 Algorithme de surveillance

Quelque soit le système (continu ou hybride), le principe de la surveillance demeure le même, la seule distinction est de la manière à surveiller l'évolution continue et l'évolution discrète et qui peut être soit :

- \* Parallèle : la surveillance des deux évolutions s'effectue en parallèle mais de façon indépendante,
- \* Séquentielle : elle dépend de l'évolution continue et de l'évolution discrète en même temps.

C'est sur ce dernier point que la démarche proposée par (EL Mezyani,05) a été développée, elle regroupe les étapes suivantes:

- i. Identification du mode courant en exploitant les informations continues et les informations discrètes.
- ii. Surveillance du comportement continu dans le mode identifié: cohérence des contraintes égalité et des contraintes inégalité.
- iii. Surveillance du comportement discret : cohérence du mode  $i$  identifié et des événements (spontanés ou contrôlés) détectés grâce aux informations continues et discrètes, avec ceux du GPFN ou du GPFD.

Ainsi, dans l'optique d'assurer une bonne localisation des défauts, à l'aide de résidus générés, un algorithme de surveillance est mis en place selon le mode initial est connu préalablement ou non. Lorsque ce mode est inconnu, un calcul des résidus est effectué sur l'ensemble des modes de l'AH. Par contre, si le mode initial est connu, trois ensembles de résidu sont calculés suivant la dynamique discrète du système :

- \* Les résidus du mode  $i$
- \* Les résidus des modes successeurs  $j, j \in \text{GPFN}(i)$
- \* Les résidus des modes successeurs  $k, k \neq j$  et  $k \in \text{GPFD}(i)$

Suivant l'évolution du système, cet algorithme comporte deux cas de traitements possibles :

1. Le système reste dans le mode  $i$  initial c'est-à-dire pas d'évolution discrète. Dans ce cas, des tests de cohérence sont effectués entre les informations prélevées (discrètes et continues) et l'état discret du mode  $i$  et ses contraintes (égalité et inégalité). Une incohérence sera donc interprétée d'après les deux hypothèses suivantes :

- \* Soit une défaillance du capteur discret
- \* Soit une défaillance conduisant à un non transition autrement dit le système est maintenu avec la dynamique du mode bien que l'état discret a changé.

On peut envisager des tests supplémentaires pour réduire le nombre d'hypothèses de défaillances.

Le système quitte le mode  $i$ . Dans cette situation, les informations disponibles servent comme support dans l'identification du mode d'arrivée. Cette évolution doit alors être caractérisée et interprétées. Trois situations sont alors distinguées :

- \* Soit une évolution normale décrite par le GPNF c'est-à-dire le système bascule vers un successeur  $j \in \text{GPFN}(i)$  suite à un évènement normal.
- \* Soit une évolution anormale due à l'apparition d'une défaillance ou le système bascule vers un mode  $j \in \text{GPFN}(i)$  alors que l'évènement ne s'est pas encore produit.
- \* Soit une évolution anormale décrite par le GPDF. A savoir que le système quitte le mode  $i$  vers un mode  $k \in \text{GPDF}(i)$  qui résulte absolument d'une défaillance (kechida, 07).

### 3.6 Conclusion

Le principe général des algorithmes FDI basé sur un modèle est de comparer le comportement attendu du système, donné par un modèle, avec ses comportements réels, connus à travers les observations en ligne.

Dans les méthodes des FDI en utilisant les résidus comme un indicateur de comportement, ils sont égaux à zéro en mode normal et différent de zéro en mode défaillant.

Un ensemble structuré de résidu c'est à dire un ensemble de résidus qui ne sont pas sensibles aux sous-ensembles de même des défauts, peut être utilisé pour localiser les défauts. Ces résidus peuvent également être utilisés, pour déterminer le mode actuel lorsque les systèmes hybrides sont considérés. En tant que conséquence des défauts continus et discrets peuvent être détecté.

---

**Sommaire**

---

3.1	Modèle d'un système hybride et défaillance	53
3.2	Graphes de comportements normaux ou Graphes des prédicats	59
3.3	Surveillance des contraintes égalité dans un mode « i » donner	59
3.3.1	RRA et résidus dans un mode « i » donner	60
3.3.2	Cas linéaire : méthode de l'Espace de Parité	64
3.3.3	Calcul effectif des résidus	66
3.4	Surveillance des contraintes inégalité	67
3.5	Utilisation des résidus pour l'identification des modes	69
3.5.1	Discernabilité entre les modes	69
3.5.2	Identification des modes	70
3.5.3	Algorithme de Surveillance	72
3.6	Conclusion	74

# Chapitre 4

## *Application sur le système a deux réservoirs*

### Résumé :

*Ce dernier chapitre présente une illustration de la méthodologie de surveillance proposée dans le chapitre trois sur un système classiquement utilisé pour illustrer les problématiques de surveillance des SDH. Ce système hydraulique, constitué de deux réservoirs connectés entre eux.*

### Abstract:

*This final chapter provides an illustration of the proposed monitoring methodology in chapter three on a system traditionally used the challenges of monitoring the SDH. The hydraulic system consisting of two interconnected tanks*

---

Sommaire

---

4.1 Les graphes de prédiction	72
a) Cahier des charges	72
b) Les graphes des comportements normaux et défaillants	73
4.2 Surveillance des contraintes égalité et inégalité de chaque mode	74
4.2.1 Surveillance des contraintes égalité	74
a) Génération des RRA à partir des modèles d'états	76
b) Résidu du mode 1 structuré par rapport à $\Phi_{h2}$	77
c) Résidus structurés pour l'ensemble des modes	78
4.2.2 Surveillance des contraintes inégalités	80
4.3 Application de la méthodologie de surveillance	81
4.4 Scénarios de défauts	82
4.5 Conclusion	89

Dans ce chapitre, nous présentons l'application de la méthodologie de surveillance étudiée dans le chapitre précédent à un système hydraulique composé de deux réservoirs (voir figure 2.5). Le système peut être décrite par un automate hybride réduit, obtenu lorsque l'on tient compte des spécifications d'exploitation. Nous illustrons la méthodologie de surveillance proposée au chapitre trois, plusieurs scénarios de comportements défaillants sont décrits. Des résultats de simulations sont présentés.

#### 4.1 Graphes de prédiction

Dans cette partie, nous nous intéressons au graphe de prédiction du système physique en basant sur le modèle automate hybride (voir chapitre II , page 36-41)

##### a) Cahier des charges

Dans cette application, le cahier des charges considéré est :

- Surveillance des capteurs  $Q_p$  et  $h_2$ ,
- Surveillance des défaillances du procédé de types fuites et bouchages de conduites,
- Surveillance des vannes.

Le tableau (tab. 4.1) présente la liste de défaillances à considérer.

Les défaillances détectables  $\Phi^d(i)$  considérées dans le cahier des charges diffèrent d'un mode à l'autre. Les défaillances détectables pour chaque mode sont données dans le tableau 4.2 Les défaillances détectables n'ont pas toutes le même effet dans chaque mode.

Tab 4.1 Défaillances considérées

N	Symbole	Désignation
1	$\Phi_{Q_p}$	Défaillance du capteur $Q_p$ (biais)
2	$\Phi_{Q_{h2}}$	Défaillance du capteur $Q_{h2}$ (biais)
3	$\Phi_1$	Fuite dans le réservoir 1
4	$\Phi_2$	Fuite dans le réservoir 2
5	$\Phi_{C_3}$	Bouchage complet du conduit C3
6	$\Phi_{V_4}^{BF}$	La vanne V4 reste bloquée fermée lorsque l'événement e1 se produit.
7	$\Phi_{V_4}^{BO}$	La vanne V4 reste bloquée ouverte lorsque l'événement e2 se produit,
8	$\Phi_{V_4}^{FO}$	La vanne V4 change d'état alors qu'aucun événement (e1 ou e2) ne s'est produit

Tab 4.2 Ensemble des défauts détectables dans chaque mode i

Mode	Défauts détectables
Mode 1	$\Phi_{Q_p}, \Phi_{Q_{h2}}, \Phi_1, \Phi_2$
Mode 2	$\Phi_{Q_p}, \Phi_{Q_{h2}}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_{C_3}$
Mode 3	$\Phi_{Q_p}, \Phi_{Q_{h2}}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_{C_3}, \Phi_{V_4}^{BF}, \Phi_{V_4}^{FO}$
Mode 4	$\Phi_{Q_p}, \Phi_{Q_{h2}}, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_{C_3}, \Phi_{V_4}^{BF}, \Phi_{V_4}^{BO}, \Phi_{V_4}^{FO}$

D'après Tab 4.1 en peut classification suivant :

- Les quatre premières défaillances vont perturber les équations d'état et de mesure du mode courant.
- La cinquième défaillance empêchera la transition du mode 1 vers le mode 2 (ou du mode 4 vers le mode 3), les deux défaillances suivantes empêcheront les transitions des modes 1 et 2 vers respectivement les modes 4 et 3 (et inversement).
- La dernière défaillance va conduire à un changement de mode incorrect.

Ces huit défaillances permettent donc d'illustrer tous les types de défaillances (continues et discrètes) décrites dans la section précédente.

**b) Graphes des comportements normaux et défaillants**

Les GPFN sont conçus à partir du mode d'exploitation constitué des 4 modes de fonctionnement (modes 1 à 4). Ces modes ne sont pas similaires, donc les GPFN sont obtenus en considérant chaque mode  $i$  et tous ses successeurs normaux décrits dans le modèle donné figure 4.1

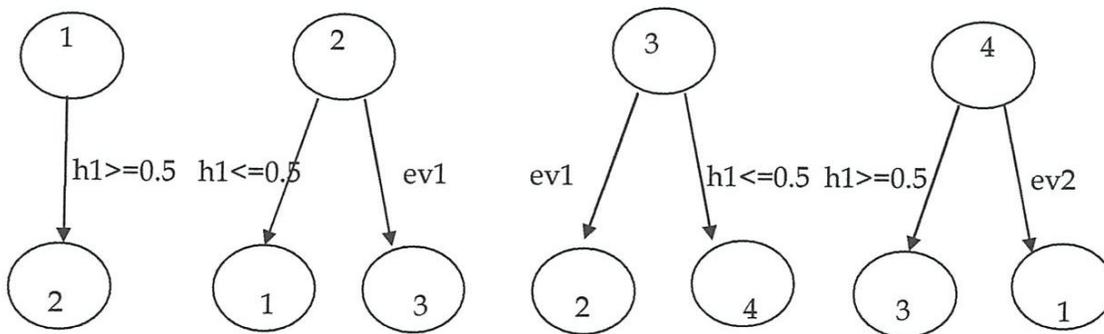


Figure 4.1 : GPFN de profondeur 1

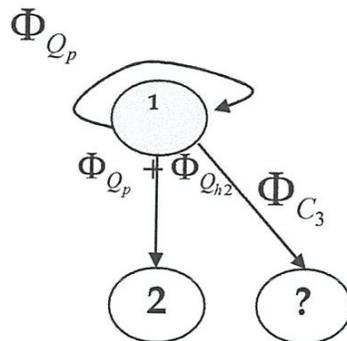


Figure 4.2 : GPFN de profondeur 1

**4.2 Surveillance des contraintes égalité et inégalité de chaque mode**

**4.2.1 Surveillance des contraintes égalité**

Les défaillances influençant l'évolution continue dans chaque mode peuvent provenir d'un capteur ou d'une modification des paramètres d'un élément (actionneur ou processus). Le cahier des charges fixé impose la surveillance de tous

les capteurs continus, et la surveillance des défaillances physiques de type fuite des réservoirs  $R_1$  ou  $R_2$ . Les défaillances influençant les contraintes égalités sont par l'ensemble  $\{\Phi_{Qp}, \Phi_{h_2}, \Phi_1, \Phi_2\}$ .

Pour chaque mode, les résidus calculés peuvent être structurés pour qu'ils soient robustes à un sous-ensemble de  $\Phi_{CE}(i)$  et sensibles aux autres. Dans ce qui suit, nous allons donner les formes de calcul des résidus structurés calculés pour chaque mode  $i$  afin d'identifier le mode en cours, de détecter et localiser les défaillances affectant les contraintes égalité.

Les RRA associées au mode  $i$  ( $i = 1 ; \dots ; 4$ ) sont déduites des relations données par les équations d'état de chacun des modes et des relations supplémentaires associées aux débits. Elles sont obtenues en substituant les variables inconnues ( $h_1, Q_2, Q_3$ , et  $Q_4$ ) par les mesures données par ( $Q_p, Q_1$ , et  $h_2$ ). Les équations d'état dans un mode donné ainsi que les relations décrites par les expressions de débit, permettent d'avoir des redondances entre les variables du système.

Les débits sont donnés par

$$\begin{aligned} Q_1 &= A\sqrt{2g}\sqrt{h_1} \\ Q_2 &= A\sqrt{2g}\text{sign}(h_1 - h_2)\sqrt{|h_1 - h_2|} \\ Q_3 &= A\sqrt{2g}\sqrt{|h_1 - h_2|} \\ Q_4 &= A\sqrt{2g}\sqrt{h_2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

A partir de l'expression de débit  $Q_1$ , on peut calculer le niveau  $h_1$  :

$$h_1 = \frac{Q_1^2}{2gA^2} \quad (4.2)$$

Ce qui donne les expressions suivantes :

$$S \frac{dh_1}{dt} = \frac{SQ_1}{2gA^2} \frac{dQ_1}{dt} \quad (4.3)$$

$$Q_2^2 = 2gA^2 |h_1 - h_2|$$

Soit

$$Q_2^2 = \text{sign}(Q_1^2 - 2gA^2h_2)(Q_1^2 - 2gA^2h_2) \quad (4.4)$$

Soit

$$Q_3^2 = 2gA^2 |h_1 - h|$$

$$Q_3^2 = \text{sign}(Q_1^2 - 2gA^2h)(Q_1^2 - 2gA^2h) \quad (4.5)$$

**a) Génération des RRA à partir des modèles d'états**

En réécrivant les équations d'état associées aux modes 1;2;3 et 4 sous une forme polynomiale, et en substituant les variables inconnues  $Q_1, \frac{dh_1}{dt}, Q_2$  et  $Q_3$  par leurs expressions obtenues dans les équations (4.2, 4.3, 4.4, 4.5), on obtient pour chaque mode deux RRA qui sont les formes de calcul des résidus correspondant aux différents modes s'en déduisent immédiatement.

Nous détaillons à titre d'illustration les résidus obtenus pour le mode 1. Les résidus des autres modes sont donnés en annexe A.

Les RRA pour le mode 1 sont déduites des équations d'état :

$$S \frac{dh_1}{dt} = Q_p - Q_1 - Q_2 \quad (4.6)$$

$$S \frac{dh_2}{dt} = Q_2 \quad (4.7)$$

En substituant les variables inconnues, dans les équations (4.6) et (4.7), par leurs expressions données par les équations (4.2, 4.3, 4.4, 4.5), on obtient les RRA sous formes polynomiales :

Le premier résidu obtenu à partir de la première équation d'état 4.6 est alors

$$r_{11} = (SgA^2 Q_1 \frac{dQ_1}{dt} - Q_p - Q_1)^2 - s(Q_1^2 - 2gA^2 h_2) \quad (4.8)$$

Ce résidu n'utilisant pas la dynamique (4.7) est robuste à la fuite  $\Phi_2$ .

$$r_{12} = S^2 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 - sQ_1^2 + 2sgA^2 h_2 \quad (4.9)$$

$$\text{avec } s = \text{sign}(Q_1^2 - 2gA^2 h_2) = \text{sign}(h_1 - h_2)$$

Ce résidu n'utilisant pas la dynamique (4.6) est robuste à la fuite et  $\Phi_1$  à  $\Phi_{Q_p}$ .

**b) Résidu du mode 1 structuré par rapport à  $\Phi_{h_2}$**

Si nous considérons l'équation d'état donnée en (4.7) et l'expression de débit de Q2 donnée en (4.6), nous pouvons obtenir des expressions de  $h_2$  et  $\frac{dh_2}{dt}$  en fonction des données des capteurs  $Q_1$  et  $Q_p$

$$h_2 = \frac{-s \left( \frac{-SQ_1}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} + Q_p - Q_1 \right)^2 + Q_1^2}{2gA^2} \quad (4.10)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \left[ \frac{s \left( \frac{S}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} + \frac{SQ_1}{gA^2} \frac{d}{dQ_1} \frac{dQ_1}{dt} + 1 \right) \left( -\frac{SQ_1}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} + Q_p - Q_1 \right) + Q_1}{gA^2} \right] \frac{dQ_1}{dt} \quad (4.11)$$

En remplaçant les expressions de  $Q_2$  et  $\frac{dh_2}{dt}$ , calculées à partir des mesures  $Q_p$  et  $Q_1$ , dans la seconde équation d'état (4.7), on obtient une relation faisant intervenir uniquement les mesures des capteurs  $Q_1$  et  $Q_p$ . Le résidu  $r_{13}$  s'en déduit

$$r_{13} = \frac{S^2}{4g^2A^4} \left[ s \left( \frac{SQ_1 \frac{dQ_1}{dt}}{gA^2} + Q_p - Q_1 \right) \left( -\frac{S \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2}{gA^2} - \frac{SQ_1 \frac{d^2Q_1}{dt^2}}{gA^2} - \frac{dQ_1}{dt} \right) + 2Q_1 \frac{dQ_1}{dt} \right]^2 - sQ_1^2 - \left[ -\frac{SQ_1 \frac{dQ_1}{dt}}{gA^2} + Q_p - Q_1 \right] \quad (4.12)$$

Le résidu  $r_{13}$  ainsi calculé est sensible aux défaillances  $\Phi_{Q_p}$  et aux fuites  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$ .

Il est par contre robuste à la défaillance  $\Phi_{h_2}$  du capteur de niveau  $h_2$ .

Le tableau (4.3) représente les signatures de défauts qui influencent l'évolution continue du mode 1

Tab 4.3 : Signatures de défaillances influençant le mode 1

Résidu	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_{Q_p}$	$\Phi_{h_2}$
r11	1	0	1	1
r12	0	1	0	1
r13	1	1	1	0

### c) Résidus structurés du système de deux réservoirs en exploitation

Deux formes de calcul du résidu  $r_{i1}$  et  $r_{i2}$  peuvent être obtenues à partir des équations d'état du système. Les résidus  $r_{i1}$  obtenus à partir des relations considérant l'évolution du niveau  $h_1$  dans le premier réservoir sont robustes aux défaillances de type "fuite du réservoir 2". Les résidus  $r_{i2}$  sont obtenus à partir de la deuxième équation d'état, donc, ils sont donc robustes à la défaillance de type "fuite dans le réservoir 1". En combinant les résidus  $r_{i1}$  et  $r_{i2}$ , on peut obtenir un nouveau résidu  $r_{i3}$  structuré par rapport à la défaillance  $\Phi_{h_2}$  du capteur de niveau  $h_2$ .

Les modes du GPFN correspondent aux 4 modes  $i$  ( $i=1, 2, 3$  et  $4$ ) d'exploitation. Trois résidus sont donc considérés pour chacun de ces modes

La démarche est identique pour les autres modes. Ainsi, 12 résidus au total sont considérés pour les 4 modes. (Voir dans Annexe 2)

**Remarque 4.1** Les signatures des défaillances  $\Phi_1$  et  $\Phi_{Q_p}$  sont identiques. Ces défaillances ne sont donc pas localisables entre elles.

Le tableau 4.4 des signatures théoriques de défauts associées aux modes  $i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) regroupe les signatures de défauts pour tous les modes  $i$ .

Tab 4.4 : Tableau des signatures théoriques des défaillances dans les 4 modes

	model				mode2				mode3				mode4			
	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_{Q_p}$	$\phi_{h_2}$												
$r_1 : r_{11}$	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
$r_{12}$	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$r_{13}$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$r_{21}$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
$r_2 : r_{22}$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$r_{23}$	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$r_{31}$	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
$r_3 : r_{33}$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
$r_{32}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
$r_4 : r_{41}$	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
$r_{42}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
$r_{43}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

#### 4.2.2 Surveillance des contraintes inégalité

Pour chaque mode du mode d'exploitation, les contraintes inégalité peuvent être testées en ligne. En effet,  $h_2$  est mesuré donc peut être testé par rapport à la valeur du seuil (0.5). De plus on a

$$h_1 = \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} \quad (4.13)$$

Pour chaque mode, plusieurs vecteurs d'écart  $\rho_{ij}(t)$  peuvent être considérés

Dans le mode 1 on a  $h_1^{\min} \leq h_1 \leq h_s$  et  $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$  d'où le vecteur d'écart s'écrit :

Tab4.5 : les vecteurs d'écarts des quatre modes

Mode 1	Mode2	Mode 3	Mode 4
$\rho_{12} = \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} - h_1^{\min}$	$\rho_{21}(t) = 0.5 - \frac{Q_1^2}{2gA_1^2}$	$\rho_{31}(t) = 0.5 - \frac{Q_1^2}{2gA_1^2}$	$\rho_{41}(t) = 0.5 - \frac{Q_1^2}{2gA_1^2}$
$\rho_{13} = h_2^{\min} - h_2$	$\rho_{22}(t) = \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} - h_1^{\min}$	$\rho_{32}(t) = \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} - h_1^{\min}$	$\rho_{42}(t) = \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} - h_1^{\min}$
$\rho_{14} = h_2 - h_2^{\max}$	$\rho_{23}(t) = h_2^{\min} - h_2$	$\rho_{33}(t) = h_2^{\min} - h_2$	$\rho_{43}(t) = h_2^{\min} - h_2$

La surveillance des contraintes inégalité consiste à tester à chaque instant le signe des  $\rho_{ij}(t)$ . Si  $\rho_{ij} \leq 0$  la contrainte est vérifiée. Les contraintes liées à  $h_2$  résultent de la commande de la pompe. Pour la surveillance de ces contraintes n'a donc pas d'intérêt que si le système de commande et la pompe sont ainsi surveillés. Nous avons limité notre surveillance au système des 2 cuves, les contraintes  $\rho_{i3}$  et  $\rho_{i4}$  ne seront donc pas considérées dans la suite.

### 4.3 Application de la méthodologie de surveillance

Considérons l'évolution du système sur l'intervalle de temps compris entre 0 et 500s. Les simulations sont réalisées à l'aide de Matlab/Simulink. Le pas de calcul est de 0:1s. Le figure 4.3 représentent l'évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs  $R_1$  et  $R_2$ . L'évolution discrète peut être décrite par la séquence des modes  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$  figure 4.2

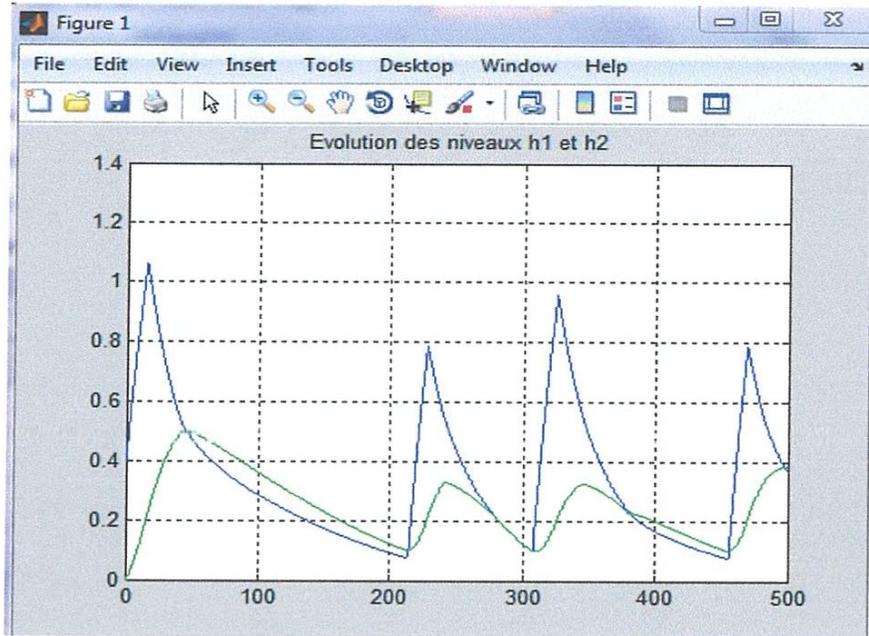


Figure 4.3: Évolution des niveaux d'eau dans les réservoirs  $R_1$  et  $R_2$

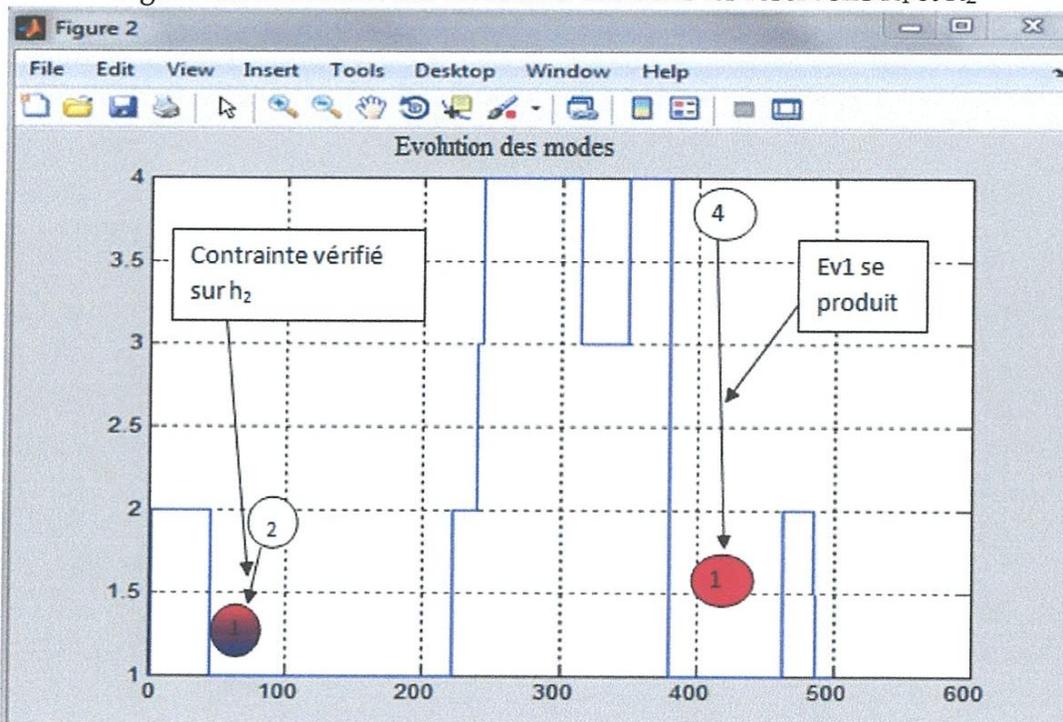


Figure 4.4 : Séquence des modes avec GPFN

Le tableau 4.6 donne les intervalles de temps sur lesquels les modes sont définis

Tab 4.6 Mode réel

Intervalle de temps	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{31}$	$r_{32}$	$r_{33}$	$r_{41}$	$r_{42}$	$r_{43}$	mode réel
[0 0.01s]	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
]0.01 44s]	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
]44 211s]	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
]211 239s]	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
]239 243s]	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	3
]243 314s]	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	4
]314 348s]	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	3
]348 380s]	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	4
]380 462s]	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
]462 484s]	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2
]484 500s]	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

#### 4.4 Scénarios de défauts

Pour illustrer la méthodologie de surveillance, nous considérons dans ce qui suit deux scénarios de défauts. Pour chacun des cas, la méthodologie présentée au chapitre trois est appliquée.

Pour chaque scénario, le système démarre initialement du mode 1. Cet état initial est supposé connu.

Tous les résidus (14 résidus au total) ne sont pas calculés à chaque instant. Initialement, nous calculons uniquement les résidus du mode 1. Lorsque le changement de mode se produit (le système évolue spontanément vers le mode 2) et qu'il est détecté par les résidus, l'ensemble des résidus calculés change. Ces résidus correspondent au mode courant, c'est à dire à ceux du mode 2. Cette démarche est répétée à chaque changement de mode. Ainsi, le nombre de résidus à calculer à chaque instant est limité à 4 s'il n'y a pas d'évolution discrète. Ce nombre augmentera suivant le nombre de successeurs des GPFN et GPFD.

Nous présentons pour chaque scénario des zooms sur une fenêtre temporelle des résidus effectivement calculés suivant la situation.

#### 4.4.1 Scénario 1: capteur $h_2$ défaillant.

Une défaillance du capteur  $h_2$  est simulée sur l'intervalle de temps

$t \in [100s \ 200s]$ , selon la figure 4.5 ci après présentée

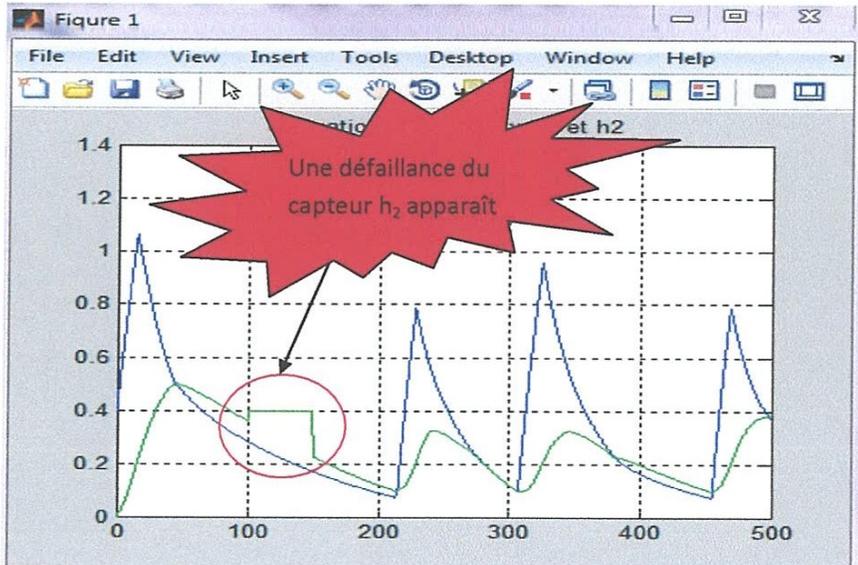


Figure 4.5 : évolution de niveaux  $h_1$  et  $h_2$  en présence de défaillance  $\Phi_{h_2}$

Seuls les résidus qui sont robustes à la défaillance  $\Phi_{h_2}$  sont égaux à zéro sur cet intervalle de temps.

Sur l'intervalle de temps  $[44s \ 100s[$  les résidus du mode 1 sont tous égaux à zéro, le mode 1 est donc identifié comme le mode courant. A l'instant  $t = 100s$  les résidus  $r_{11}$  et  $r_{12}$  deviennent différents de zéro (voir figures 4.6 ; 4.7).

Par contre le résidu  $r_{13}$  reste égal à zéro (voir figure 4.8).

Cette signature correspond à la défaillance du capteur  $h_2$  dans le mode 1 (voir table 4.3).

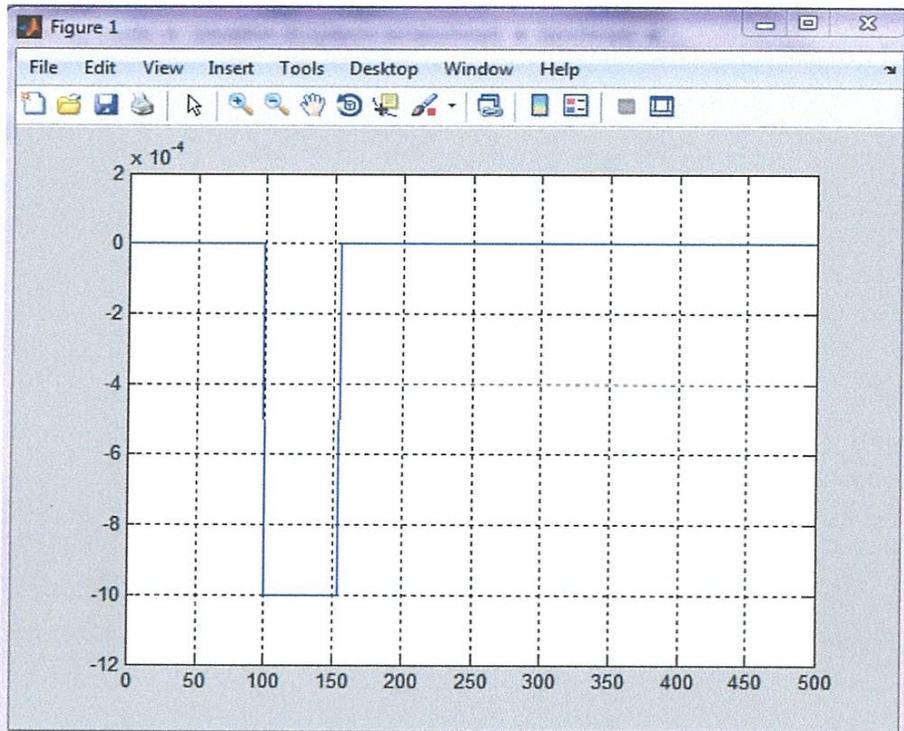


Figure 4.6 : Évolution des résidus  $r_{11}$  en présence de défaillance  $h_2$

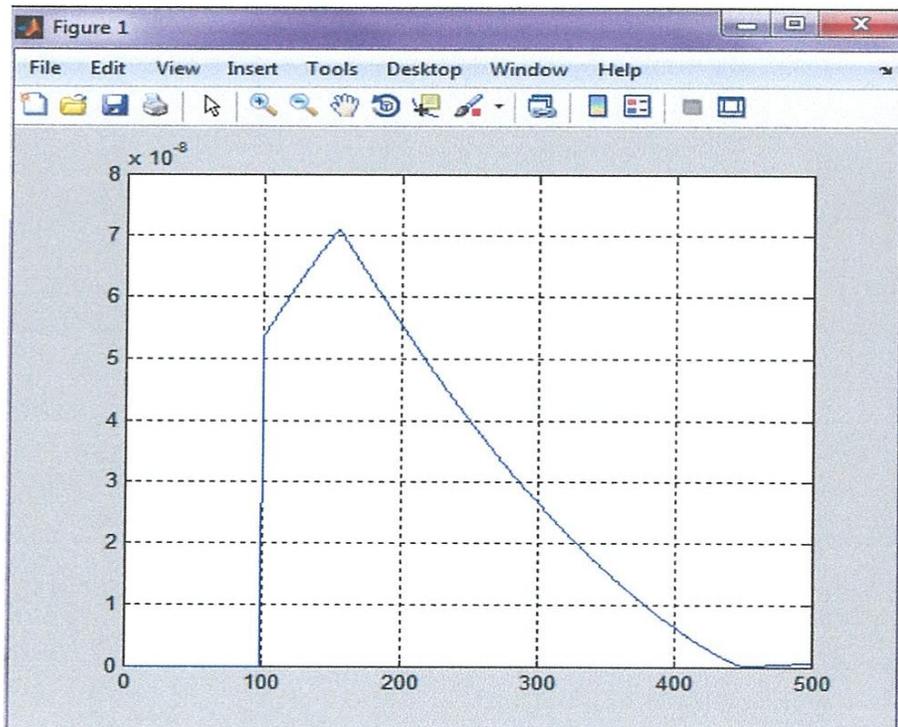


Figure 4.7 : Évolution des résidus  $r_{12}$  en présence de défaillance  $h_2$

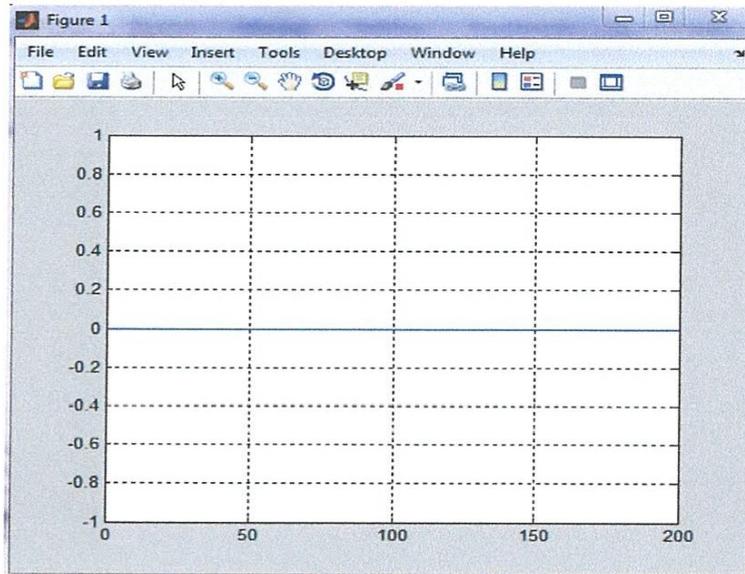


Figure 4.8 : Évolution des résidus  $r_{13}$  en présence de défaillance  $h_2$

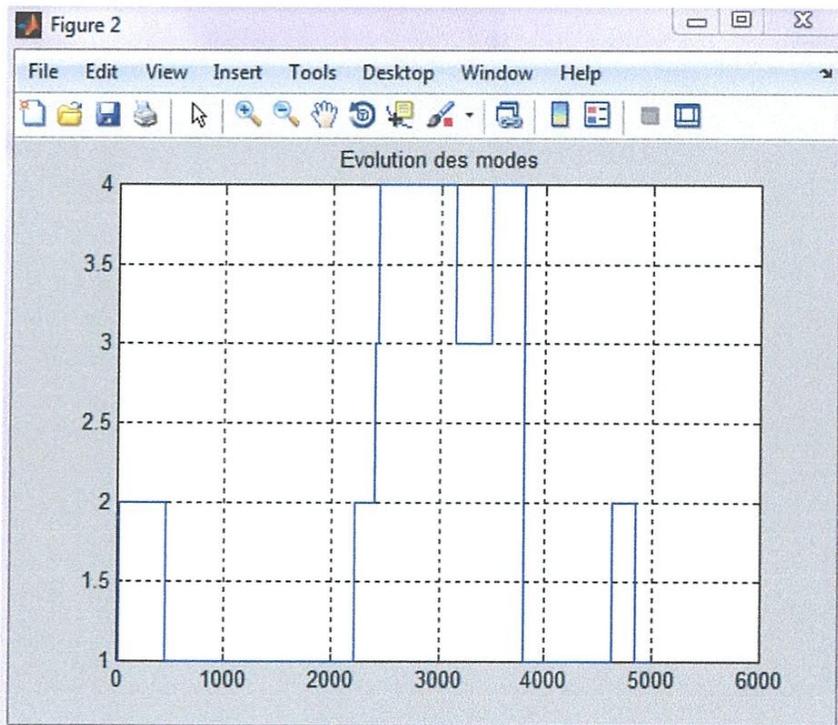


Figure 4.9 : l'évolution des modes en présence du défaut capteur  $h_2$

Selon la figure 4.9, la défaillance du capteur  $h_2$  n'influe en aucune manière sur l'évolution des modes discrets.

Nous vérifions qu'aucun événement spontané (non contrôlé) ne s'est produit à l'instant  $t = 100s$ , et que les contraintes inégalité du mode 1 sont toujours vérifiées ( $\rho_{11}(t)$  est négatif).

La vérification des contraintes inégalités montre que  $\rho_{11}(t) = -0.3502$

Le résultat de l'ensemble des tests de cohérence nous amène à conclure qu'il s'agit de la défaillance  $\Phi_{h_2}$ .

#### 4.4.2 Scénario 2 : conduite C3 bouchée

Nous considérons dans ce scénario une défaillance qui n'a pas le même effet dans tous modes. Il s'agit du bouchage de la conduite C3 ( $\Phi_{C_3}$ ). Cette défaillance est considérée sur les intervalles de temps [150s 230s] et [300 s 350s] alors que le système se trouve pour le premier cas dans le mode 1 et pour le second cas dans le mode 3.

D'après la figure 4 .10, la défaillance de C3 sur l'intervalle [150s 230 ] n'affecte pas l'évolution continu.

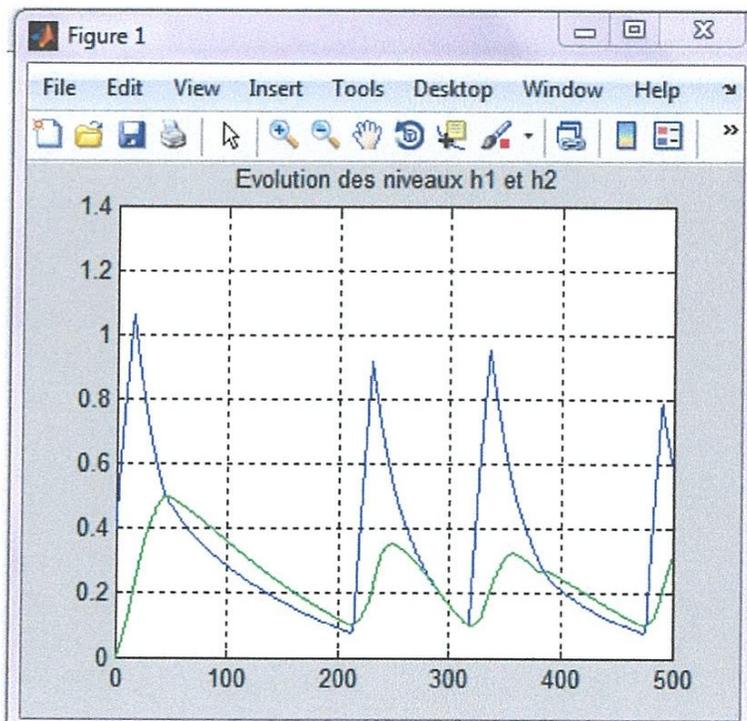


Figure 4.10 : l'évolution des niveaux  $h_1$  et  $h_2$  en présence du défaut  $\Phi_{C_3}$

Dans ce cas tous les résidus de mode un sont égaux à zéro.

En revanche, cette défaillance influe sur la dynamique discrète (figure 4.11).

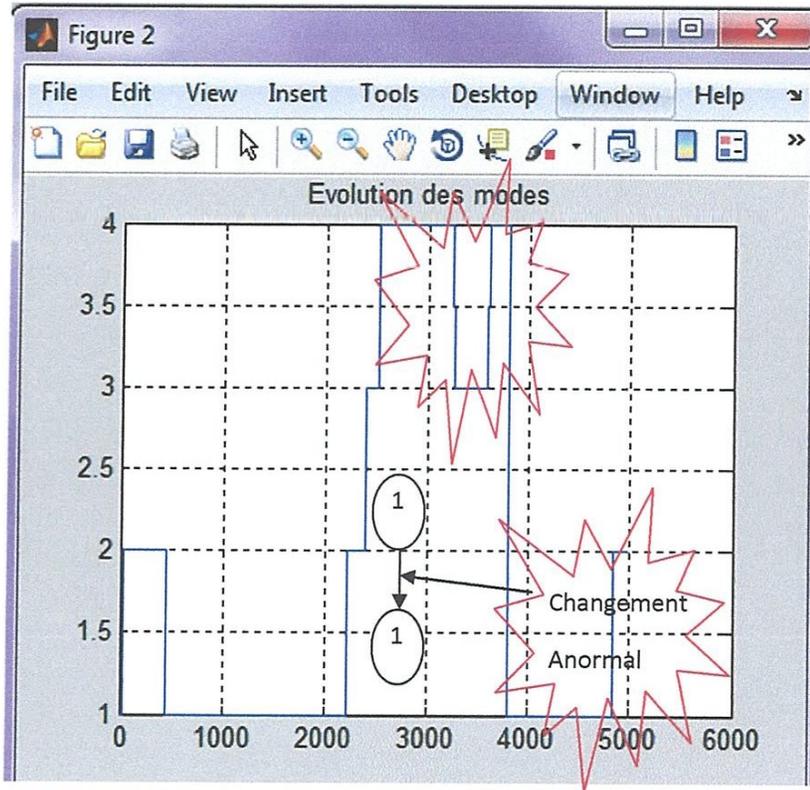


Figure 4.11 : Evolution des modes lors de l'apparition d'une défaillance de  $C_3$

Les résidus structurés du mode 1 calculés sur l'intervalle [44s 230s] restent tous égaux à zéro.

Le mode identifié sur cet intervalle de temps est donc le mode 1. Le capteur discret nous indique, à  $t=211s$  que  $h_1 > h$ , ce qui n'est pas cohérent avec l'état  $q_1$ . De plus, toutes les contraintes inégalité du mode 1 ne sont plus validées à partir de  $t=211s$  (quand le système commute normalement vers le mode 2). En effet,  $\rho_{11}(t)$  devient positif.

Si pour l'intervalle [310s 350s], la même défaillance se produit alors le comportement des deux dynamiques sont illustrées par les figure 4.12, 4.13.

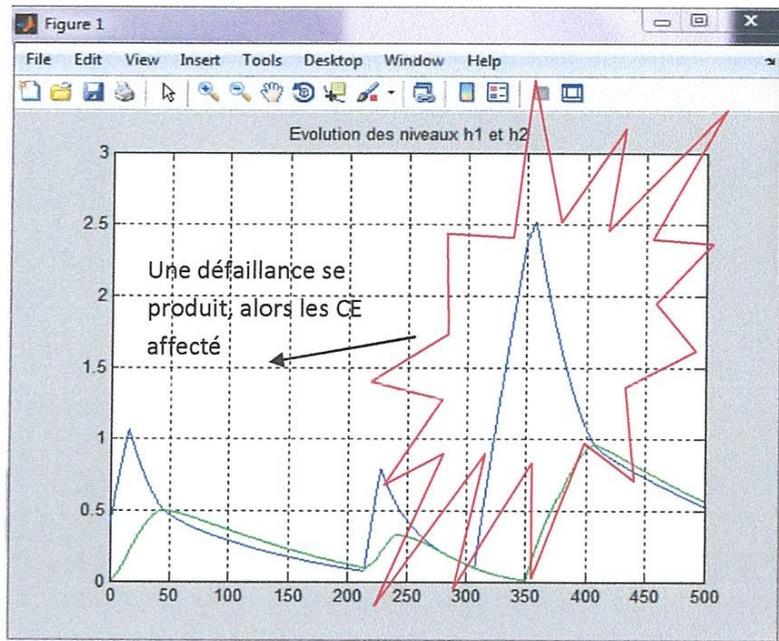


Figure 12 : Evolution des h<sub>1</sub> et h<sub>2</sub> en présence du défaut  $\Phi_{C_3}$

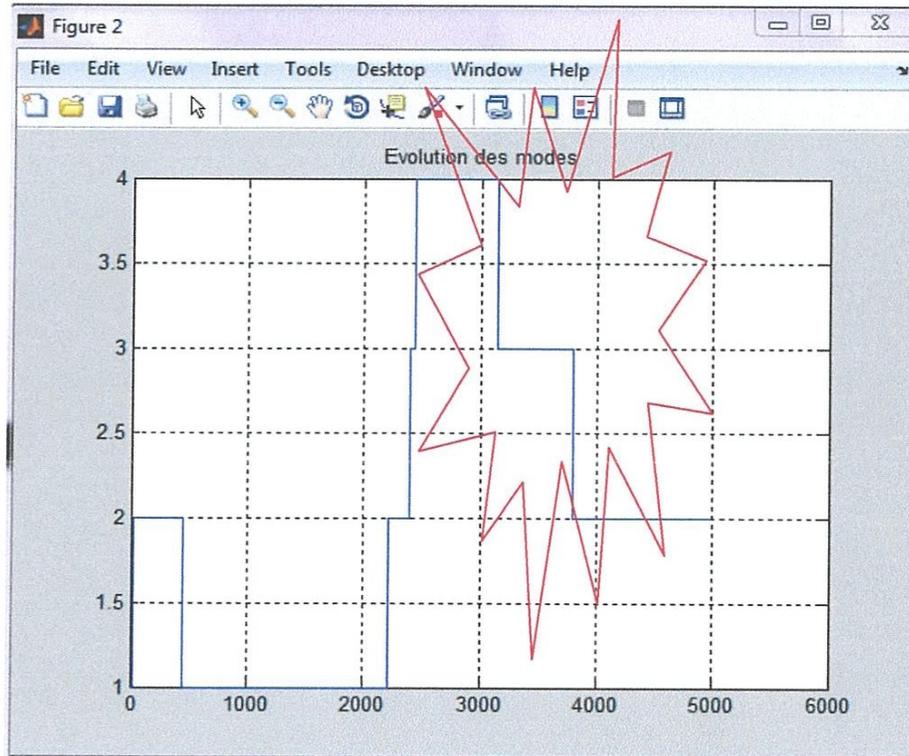


Figure 4.13 : Evolution des modes en présence du défaut  $\Phi_{C_3}$

A l'aide GPDF(3), on peut déduire la présence de la défaillance (bouchage de la conduite C3)

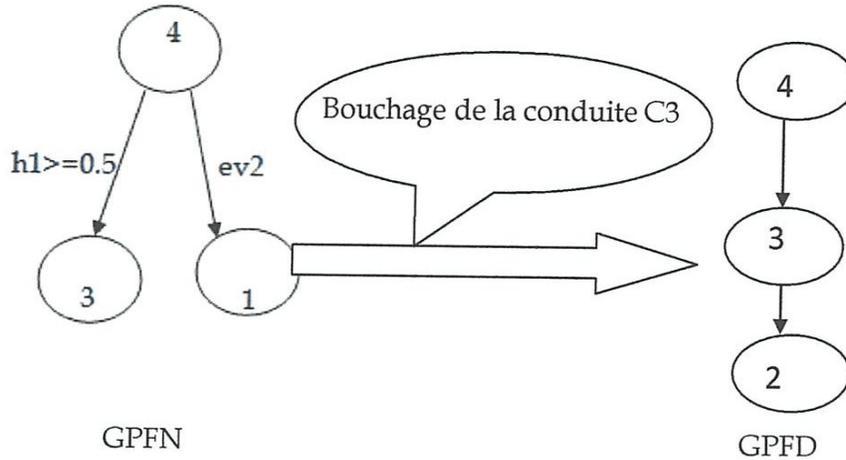


Figure 4.14 : GPFN et GPDF en présence du défaut  $\Phi_{C_3}$

Le GPDF permet de faciliter la localisation de la défaillance.

#### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la démarche de surveillance à base de RRA pour un système à deux réservoirs. Dans un premier temps, nous avons représenté les GPFN et les GPDF associés au mode d'exploitation considéré.

Dans un second temps, nous avons déterminé les formes de calcul des résidus d'élimination pour les modes concernés et calculé les vecteurs d'écart associés à chaque mode.

Enfin nous avons appliqué les algorithmes de surveillance sur ce système en considérant différents scénarios types de défaillances qui se produisent séparément. Cette approche nous a permis de détecter et de localiser les défaillances. Les résultats sont obtenus pour un système fonctionnant en absence de bruit et de perturbations.

*Conclusion général  
et perspectives*

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

Dans ce mémoire nous avons illustré une méthodologie de surveillance à base de modèle (détection et localisation de défaillances) des Systèmes Dynamiques Hybrides en utilisant conjointement des outils relatifs à la surveillance des systèmes continus (ou échantillonnés) et d'autres outils spécifiques aux systèmes à événements discrets.

Quelle que soit la nature du système (continu, discret, hybride), le principe général de la surveillance consiste à comparer le comportement en-ligne du système avec une référence. Dans notre cas, la référence est exprimée sous forme d'un graphe issu du modèle automate hybride du système et construit en tenant compte des contraintes d'exploitation du système. Ces graphes, appelés GPFN (Graphes de Prédiction de Fonctionnement Normal), sont spécifiques à chaque mode de fonctionnement et représentent toutes les trajectoires hybrides (état continu et état discret) du système non défaillant.

Une analyse peut être réalisée hors-ligne afin d'établir le lien entre les défauts considérés par le cahier des charges et leurs influences sur les trois entités à surveiller que sont les contraintes égalité, les contraintes inégalité et les transitions. Ceci permet de construire des signatures de défaillances par rapport aux composants du modèle. Les comportements défaillants peuvent être représentés par des Graphes de Prédiction de Fonctionnement Défaillant (GPDF). Ceux-ci seront utilisés pour caractériser en-ligne les défaillances c'est-à-dire établir un diagnostic plus précis. La procédure de surveillance se ramène finalement à un test de cohérence entre le mode identifié en-ligne et l'évolution prédite par les GPFN (pour la détection) et/ou les GPDF (pour la caractérisation de la défaillance).

La surveillance des SDH est une tâche complexe puisqu'il s'agit de vérifier la cohérence de contraintes égalité, inégalité et de l'évolution discrète à partir des informations continues et discrètes prélevées en-ligne sur le système. La mise en place de cette couche de surveillance nécessite de suivre une méthodologie (automatisable si possible) permettant d'aboutir aux diagnostics les plus précis possibles.

L'approche de surveillance que nous avons détaillé dans notre modeste travail nous a ramener à résoudre quelques tâches de la surveillance des SDH, mais en même temps nous avons rencontré des problèmes auxquels ils nous imposants des perspectives de recherche très approfondi sur le thème de recherche, présenté comme suit :

- complexité (non maîtrisée) de la procédure d'élimination, les signaux doivent être dérivables, calcul des dérivées : des outils parfois complexes doivent être utilisés,
- Afin d'identifier sans ambiguïté le mode courant, la propriété de discernabilité des modes doit être vérifiée.
- Dans le cas non linéaire, La surveillance des contraintes inégalité est un problème difficile qui nécessite de développer des méthodes d'élimination de variables

# *Annexe*

## Annexe

### Résidus structurés du système de deux réservoirs en exploitation

Deux formes de calcul des résidus ri1 et ri2 peuvent être obtenues à partir des équations d'état du système. Les résidus ri1 obtenus à partir des relations considérant l'évolution du niveau h1 dans le premier réservoir sont robustes aux défaillances de type "fuite du réservoir 2". Les résidus ri2 sont obtenus à partir de la deuxième équation d'état, donc, ils sont donc robustes à la défaillance de type "fuite dans le réservoir 1". En combinant les résidus ri1 et ri2, on peut obtenir un nouveau résidu ri3 structuré par rapport à la défaillance  $\Phi_{h_2}$  du capteur de niveau h2.

Les modes du GPFN correspondent aux 4 modes i (i=1, 2, 3 et 4) d'exploitation. Trois résidus sont donc considérés pour chacun de ces modes.

#### Résidu associé aux modes du GPF

##### Résidus du Mode 2 :

Les équations d'état dans le mode 2 sont :

$$S \frac{dh_1}{dt} = Q_p - Q_1 - Q_2 - Q_3; \quad (1)$$

$$S \frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_3 \quad (2)$$

La forme de calcul du résidu r21 robuste à la fuite  $\Phi_2$  est obtenue à partir de l'équation (1).

$$r_{21} = \mathcal{P}_{21}h_2Q_1^4 + \mathcal{P}_{22}h_2Q_1^3 + \mathcal{P}_{23}h_2Q_1^2 + \mathcal{P}_{24}h_2Q_1 + \mathcal{P}_{25} \quad (3)$$

Avec

$$\mathcal{P}_{21} = \frac{S^4}{g^4A^8} \left(\frac{dQ_1}{dt}\right)^4 + \frac{4S^3}{g^3A^6} \left(\frac{dQ_1}{dt}\right)^3 + \frac{2S^2}{g^2A^4} (2-s) \left(\frac{dQ_1}{dt}\right)^2 - \frac{4Ss}{gA^2} \left(\frac{dQ_1}{dt}\right) + (1-4s)$$

$$\mathcal{P}_{22} = \frac{-4S^3}{g^3A^6} Q_p \left(\frac{dQ_1}{dt}\right)^3 - \frac{12S^2}{g^2A^4} Q_p \left(\frac{dQ_1}{dt}\right)^2 + \frac{4S}{gA^2} (s-2) Q_p \left(\frac{dQ_1}{dt}\right) + 4sQ_p$$

$$\mathcal{P}_{23} = \frac{S}{2gA^2} \left(\frac{12S}{gA^2} Q_p^2 + 8Ssh_2 + 8Sh\right) \left(\frac{dQ_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{12S}{gA^2} Q_p^2 + 8Ssh_2 + 8Sh\right) \left(\frac{dQ_1}{dt}\right) + 4gA^2(2s-1)h_2 + (4-2s)Q_p^2 + 4sgA^2h$$

$$\mathcal{P}_{24} = -\left(\frac{4S}{gA^2} Q_p^3 + 8SsQ_ph_2 + 8SQ_ph\right) \left(\frac{dQ_1}{dt}\right) - 4Q_p^3 - 8sgA^2Q_ph_2 - 8gA^2hQ_p$$

$$\mathcal{P}_{25} = 4s^2g^2A^4h_2^3 + (4Q_p^2sgA^2 - 8sg^2A^4h)h_2^2 + (Q_p^4 + 4g^2A^4h^2 + 4Q_p^2gA^2h)h_2$$

La forme de calcul du résidu r22 robuste à la fuite  $\Phi_1$  et à  $\Phi_{Q_p}$  est obtenue à partir de l'équation (2)

$$r_{22} = \left(4gA^2(s-1)(h+h_2) + 2S(s+1)\frac{dh_2}{dt}\right) Q_1^2 + S^2\left(\frac{dh_2}{dt}\right)^2 + (4SgA^2h(h_2+h))\frac{dh_2}{dt} + 4g^2A^4h_2^2 - 8g^2A^4hh_2 + 4g^2A^4h^2 \quad (4)$$

La forme de calcul du résidu r23 est donnée par :

$$r_{23} = \mathcal{P}'_{21} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^3 + \mathcal{P}'_{22} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^2 + \mathcal{P}'_{23} \frac{dQ_1}{dt} Q_1 + \mathcal{P}'_{24} \frac{dQ_1}{dt} \quad (5)$$

Avec

$$\mathcal{P}'_{21} = \frac{-sS^2}{g^2A^4} \frac{dQ_1^2}{dt^2}$$

$$\mathcal{P}'_{22} = -1 + \frac{sS}{g^3A^6} \left( -gA^2S - S^2 \frac{dQ_1}{dt} \right) \frac{dQ_1^2}{dt^2} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + \frac{sS}{g^3A^6} \left( -2g^2A^4 - 2SgA^2 \frac{dQ_1}{dt} \right) \frac{dQ_1}{dt}$$

$$\mathcal{P}'_{23} = \frac{sS}{g^3A^6} \left[ -S^2 \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^3 \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + Q_p g A^2 S \frac{dQ_1^2}{dt^2} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} - 2SgA^2 \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right. \\ \left. + Q_p g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} - 2g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + sg^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + 2g^2 A^4 S h \frac{d^2 Q_1}{dt^2} \right]$$

$$\mathcal{P}'_{24} = \frac{S}{g^3A^6} \left[ sQ_p g A^2 S \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + 2sg^3 A^4 h \frac{dQ_1}{dt} + sQ_p g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right. \\ \left. Q_1^2 + 2g^2 A^4 S h \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \right] + 2gA^2h - \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \left( \frac{S}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} Q_1 - Q_p + Q_1 + \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right)$$

Résidus du mode 3 :

Les équations d'état dans le mode 3 s'écrivent :

$$s \frac{dh_1}{dt} = Q_p - Q_1 - Q_2 - Q_3 \quad (6)$$

$$s \frac{dh_2}{dt} = Q_2 + Q_3 - Q_4 \quad (7)$$

La forme de calcul du résidu r31 robuste à la fuite A2 est obtenue à partir de l'équation (6), soit :

$$r_{31} = r_{21} \quad (8)$$

La forme de calcul du résidu r32 robuste à la fuite  $\Phi_1$  et à  $\Phi_{Q_p}$  est obtenue à partir de l'équation (7)

$$r_{32} = \mathcal{P}_{31} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^4 + \mathcal{P}_{32} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^3 + \mathcal{P}_{33} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^2 + \mathcal{P}_{34} \frac{dQ_1}{dt} Q_1 + \mathcal{P}_{35} \frac{dQ_1}{dt} \quad (9)$$

Avec

$$\mathcal{P}_{31} = \frac{6S^2}{g^2A^4} \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 + \frac{4S}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} + 1 + \frac{4S^3}{g^3A^6} \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^3 + S^4 \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^4$$

$$\mathcal{P}_{32} = \left( \frac{-12S}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} - \frac{12S^2}{g^2A^4} \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 - \frac{4S^3}{g^3A^6} \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^3 - 4 \right) Q_p$$

$$\mathcal{P}_{33} = \left( \frac{-2S^4}{g^2A^4} \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 + \frac{6S^2Q_p^2}{g^2A^4} - \frac{4S^2}{gA^2} h_2 \right) \frac{dh_2}{dt} \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 + \left( \frac{-4S^3}{gA^2} \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 + \frac{12SQ_p^2}{gA^2} - 8Sh_2 \right) \frac{dh_2}{dt} \frac{dQ_1}{dt} \\ + \left( -2S^2 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 - 4A^2gh_2 + 6Q_p^2 \right) \frac{dh_2}{dt}$$

$$\mathcal{P}_{34} = \left( \frac{-4SQ_p^3}{gA^2} + \frac{4S^3Q_p}{gA^2} \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 + 8SQ_p h_2 \right) \frac{dh_2}{dt} \frac{dQ_1}{dt} + \left( -4Q_p^3 + 4Q_p S^2 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 + 8Q_p A^2 gh_2 \right) \frac{dh_2}{dt}$$

$$\mathcal{P}_{35} = S^4 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^4 + \left( -4S^2 A^2 gh_2 - 2Q_p^2 S^2 \right) \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 + 4A^4 g^2 h_2^2 - 4Q_p^2 A^2 gh_2 + Q_p^4$$

La forme de calcul du résidu r33 robuste au défaut du capteur h2 est obtenue par

$$r_{33} = \mathcal{P}'_{31} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^3 + \mathcal{P}'_{32} \frac{dQ_1}{dt} Q_1^2 + \mathcal{P}'_{33} \frac{dQ_1}{dt} Q_1 + \mathcal{P}'_{34} \frac{dQ_1}{dt} \quad (10)$$

Avec

$$\begin{aligned} \mathcal{P}'_{31} &= \frac{-sS^2}{g^2A^4} \frac{dQ_1^2}{dt^2} \\ \mathcal{P}'_{32} &= -1 + \frac{sS}{g^3A^6} \left( -gA^2S - S^2 \frac{dQ_1}{dt} \right) \frac{dQ_1^2}{dt^2} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + \frac{sS}{g^3A^6} \left( -2g^2A^4 - 2SgA^2 \frac{dQ_1}{dt} \right) \frac{dQ_1}{dt} \\ \mathcal{P}'_{33} &= \frac{sS}{g^3A^6} \left[ -S^2 \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^3 \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + Q_p g A^2 S \frac{dQ_1^2}{dt^2} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right. \\ &\quad \left. - 2SgA^2 \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + Q_p g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} - 2g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right. \\ &\quad \left. + sg^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} + 2g^2 A^4 S h \frac{d^2 Q_1}{dt^2} \right] \\ \mathcal{P}'_{34} &= \frac{sS}{g^3A^6} \left[ Q_p g A^2 S \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \sqrt{Q_1(t)^2 - 2gA^2h} + 2y^3 A^6 h \frac{dQ_1}{dt} + Q_p g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right. \\ &\quad \left. + 2g^2 A^4 S h \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \right] - Q_1^2 + 2gA^2h - \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \left( \frac{SQ_1}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} - Q_p + Q_1 + \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right) \\ &\quad + \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \sqrt{-s \left( \frac{SQ_1}{gA^2} \frac{dQ_1}{dt} - Q_p + Q_1 + \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} \right)^2 + Q_1^2} \end{aligned}$$

Résidus du mode 4 :

$$s \frac{dh_1}{dt} = Q_p - Q_1 - Q_2 \quad (11)$$

$$s \frac{dh_2}{dt} = Q_2 - Q_4 \quad (12)$$

La forme de calcul du résidu r41 robuste à la fuite  $\dot{A}2$  est obtenue à partir de l'équation (11),

soit :

$$r_{41} = r_{11} \quad (13)$$

La forme de calcul du résidu r42 robuste à la fuite  $\Phi_1$  et à  $\Phi_{Q_p}$  est obtenue à partir de l'équation (12)

$$\begin{aligned} r_{42} &= 8A^4 g^2 (1+s) \frac{dh_2}{dt} h_2^2 + (4sS^2 A^2 g \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 - 4S^2 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 A^2 g - 4Q_1^2 A^2 g - 4sQ_1^2 A^2 g) \frac{dh_2}{dt} h_2 \\ &\quad + (S^4 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^4 - 2sS^2 \left( \frac{dh_2}{dt} \right)^2 Q_1^2 + Q_1^4) \frac{dh_2}{dt} \end{aligned}$$

La forme de calcul du résidu r43 robuste au défaut du capteur h2 est donnée par : (14)

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{41} &= \frac{S}{g^3A^6} (-sS^2 \frac{dQ_1}{dt} - sgA^2S) \\ \mathcal{P}_{42} &= \frac{S}{g^3A^6} \left( -sS^2 \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^3 - 2sgA^2S \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 + sQ_p g A^2 S \frac{d^2 Q_1}{dt^2} - sg^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} + g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} \right) \\ \mathcal{P}_{43} &= \frac{S}{g^3A^6} \left( sQ_p g^2 A^4 \frac{dQ_1}{dt} + sQ_p g A^2 S \left( \frac{dQ_1}{dt} \right)^2 \right) - Q_1 - \sqrt{Q_1^2 - 2gA^2h} - \frac{S}{gA^2} Q_1 \frac{dQ_1}{dt} + Q_p \\ &\quad + \sqrt{-s \left( \frac{S}{gA^2} Q_1 \frac{dQ_1}{dt} - Q_p + Q_1 \right)^2 + Q_1^2} \end{aligned}$$

# *Bibliographie*

## Bibliographie

1. (Aimed, 2007) Aïmed MOKHTARI, Diagnostic des systèmes hybrides : développement d'une méthode associant la détection par classification et la simulation dynamique, Université de Toulouse, 2007.
2. (Alla ,92) Alla h. Et all, Les systèmes de production par lot : une approche discret/continu utilisant les réseaux de Petri hybrides, ADPM'92, Paris (janv. 1992).
3. (Boudoud ,2000) Boudaoud .N , Masson M, diagnosis of transient states : a pattern recognition approach,APII-JESA vol .34 ,2000
4. (Chow et Willsky, 84) Chow E.Y., Willsky A.S Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. IEEE trans. Automatic Control, vol. 29, n°7, pp. 603-614, 1984.
5. (Cocquempot, 07) Vincent Cocquempot, Diagnostic des Systèmes Dynamiques Hybrides Chapitre 7, 35 pages, Traité IC2, série Systèmes Automatisés "Supervision des procédés complexes", Hermes, Février 2007.
6. (Denoeux, 1997) Denoeux T, analysis of evidence- theoretic rules for pattern classification .pattern recognition .vol 30 no. 7,pp 1095-1107,1997.
7. (Domlan, 06) Elom Ayih Domlan Diagnostic des systèmes à changement de régime de fonctionnement, Thèse de Doctorat, spécialité automatique et traitement du signal, Institut National polytechnique de Lorraine, France, 2006.
8. (El Meziani, 05) Touria El Meziani Méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides. Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologie de Lille, France, 2005.
9. (Gertler, 91) J.Gertler Analytical redundancy methods in fault detection and - Survey and synthesis Proceeding of the IFAC Symposium on Fault Detection and safety for technical process, pages 9-22, 1991.

10. (Hamdi ,10) Hamdi Fatiha, Contribution à la Synthèse d'Observateurs Pour les Systèmes Hybrides, Thèse de Doctorat Science en électronique Option Contrôle industriel, Betna, 2010
11. (Isermann, 84) Rolf. Isermann Process Fault detection on modelling and estimation methods- survey Automatica, Vol 20, pp 387-404, 1984
12. (kalman,69) kalman (r.e.), falb (f.l.) et arbib (m.), Théories des systèmes mathématiques. Mac Graw-Hill (1969).
13. (Kechida, 07) Silem Kechida , " Synthèse des générateurs de résidus robustes pour la détection des défauts " thèse doctorat université Badji Mokhtar , Annaba, soutenus en 2007
14. (Kleer et al., 92) J. De Kleer, A. Mackworth, R. Reiter Characterizing,1992.
15. (Loiez,97)Loiez, E , Contribution au diagnostic de systèmes analogique, Thèse de doctorat de l'Université des sciences et technologies de Lille. 1997
16. (Magni, et a1994). Magni, J.F. and P. Mouyon, (On Residual Generation by Observer and Parity Space 1994).
17. (Maquin .D,97) José Ragot, Frédéric Kratz, Didier Maquin ,Centre de Recherche en Automatique de Nancy - UA CNRS 8212, Avenue de la Forêt de Haye 54 516 Vandoeuvre les Nancy, France ;1997.
18. (Measuring, Modeling and Evaluating Computer Systems, p 75-93.
19. (Patton et Chen, 91) Patton R.J and Chen JA review of parity space approaches to fault diagnosis. Proceedings of IFAC/IMACS Symposium Safeprocess'91, Baden-Baden, Germany, Vol.1, pp. 238-255, 1991.
20. (Raudys ,01) S,Statistical and Neural Clasifiers: An integrated to design.springer-verlag.london,2001.
21. (Staroswiecki et all Vincentm,04) Cocquemont Touria El Mezyani and Marcel Staroswiecki LAGIS : Labo. d'Automatique, de génie informatique et signal,Polytech'Lille : Ecole polytechnique de Lille Université des Sciences et Technologies de Lille,59655 Villeneuve d'Ascq Cedex France
22. (Viswanadham and Srichander, 87) Viswanadham, N. and Srichander, R Fault detection using unknown input observers. Control Theory and Advanced Technology, Vol 3, N°2, pp 91-101, 1987.