

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté sciences et technologie
Département génie électrotechnique et automatique

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN SCIENCE

Filière : Automatique

Présentée par

Achbi Mohammed Said

Intitulée

**Surveillance et commande tolérante aux défauts
appliquées à une classe des systèmes dynamiques hybrides**

Soutenue le : 14/07/2022

Devant le Jury composé de :

Mr Boulouh Messaoud	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mlle Kechida Sihem	Professeure	Univ. de Guelma	Rapporteur
Mme Boukari Karima	MCA	Univ. de Annaba	Examineur
Mlle Menasria Yamina	MCA	Univ. de Annaba	Examineur
Mr Chakour Chouaib	MCA	Univ. de Ouargla	Examineur
Mr Sebbagh Abdennour	MCA	Univ. de Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

Dédicace

Je dédie cette thèse
à mes très chers parents
à ma chère épouse
à ma chère fille Afnane Rinad
à mon cher fils Mounder Sirateddine
à mes frères et sœurs
à toute ma famille
À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Remerciements

Cette thèse marque une étape importante dans ma vie. Pour cela, je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout Puissant qui m'a donné la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail. Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à mon Directeur de thèse **KECHIDA Sihem**, Professeure à l'université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, et directrice de Laboratoire d'Automatique et Informatique de Guelma, (LAIG), pour avoir dirigée ce travail avec beaucoup d'efforts et de patience, sa compréhension et ses encouragements constants.

Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail et cette thèse : Monsieur **BOULOUH Messaoud**, Professeur à l'université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Mesdames **MENASRIA Yamina** et **BOUKARI Karima**, Maitres de conférence A à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba Algérie et Messieurs **SEBBAGH Abdennour**, Maitre de conférence A à l'université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, et **CHAKOUR Chouaib**, Maitre de conférence A à l'Université Kasdi Merbeh d'Ouargla, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je suis aussi, très reconnaissant à tout le personnel que j'ai rencontré durant tous mon cursus, maîtres et enseignants, du primaire jusqu'au secondaire sans oublier ceux de l'université. Ainsi je voudrais remercier tous les membres des départements génie électrotechnique et automatique de l'université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie et département d'Electronique et des Télécommunications de l'Université Kasdi Merbeh d'Ouargla et les membres de Laboratoire d'Automatique et Informatique de Guelma, (LAIG).

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mes parents, mon épouse, mon fils et ma fille, mes frères et sœurs, ainsi qu'à toute ma famille, pour leurs soutiens et leurs encouragements, qu'ils soient certains de toutes mes reconnaissances.

ملخص

تعتمد مراقبة الأنظمة الفيزيائية على مراقبة الكميات الفيزيائية. في هذا السياق ، يجب أن تضمن مراقبة الأنظمة الديناميكية الهجينة التحكم الدائم في الديناميكيات من خلال مراقبة المسارات المستمرة والمنفصلة؛ مما ينتج عن ظهور أخطاء إما عن تطور الحالة المستمرة في نمط ما ، أو من التطور المنفصل ، أي تسلسل الحالات المنفصلة. ومع ذلك ، فإن وجود تذبذب (منتظم أو غير منتظم) في مثل هذه الأنظمة ، بسبب تقادم المكونات أو تغييرها في السلوك اعتمادًا على الظروف المحيطة ، يعيق إجراء المراقبة وغالبًا ما يؤدي إلى إجراءات خاطئة.

يهدف العمل المنجز في هذه الأطروحة إلى دراسة اكتشاف الأخطاء وتحديد موقعها لفئة معينة من الأنظمة الديناميكية الهجينة من خلال تطبيق تقنيات مراقبة جديدة و توليف قانون تحكم متسامح مع الخطأ.

الكلمات الدلالية:

الأنظمة الديناميكية الهجينة ، النمذجة ، تشخيص الأعطال ، كشف الأخطاء وتحديد موقعها ، التحكم في تحمل الأخطاء.

Résumé

La surveillance des systèmes physiques repose sur l'observation des grandeurs physiques. Dans ce contexte, la surveillance des SDH doit assurer le contrôle permanent des dynamiques à travers l'observation des trajectoires continues et discrètes ; l'occurrence d'une défaillance résulte alors soit de l'évolution de l'état continu dans un mode, soit de l'évolution discrète c'est-à-dire la séquence d'états discrets. Cependant, la présence des incertitudes (structurées ou non structurées) dans de tels systèmes, dues au vieillissement des composants ou à leur changement de comportement en fonction des conditions environnementales gênent la procédure de surveillance et conduisent souvent à des actions erronées.

Le but du travail présenté dans le cadre de cette thèse est d'étudier la détection et la localisation des défauts pour une classe particulière des systèmes dynamiques hybrides en appliquant de nouvelles stratégies de surveillance et également en synthétisant une loi de commande tolérante aux défauts.

Mots Clés :

Systemes dynamiques hybrides, Modélisation, Diagnostic des défauts, Détection et localisation des défauts, commande tolérante aux défauts.

Abstract

The monitoring of physical systems is based on the observation of physical quantities. In this context, the monitoring of SDHs must ensure permanent control of the dynamics through the observation of continuous and discrete trajectories; the occurrence of a failure then results either from the evolution of the continuous state in a mode, or from the discrete evolution, that is to say the sequence of discrete states. However, the presence of uncertainties (structured or unstructured) in such systems, due to the aging of the components or their change in behavior depending on the environmental conditions, hamper the monitoring procedure and often lead to erroneous actions.

The aim of the presented work in this thesis is to study fault detection and localization for a particular class of hybrid dynamic systems applying of new monitoring strategies and also synthesizing a fault tolerant control law.

Keywords:

Hybrid Dynamic Systems, Modeling, Fault diagnosis, Fault detection and localization, Fault tolerant control.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements.....	ii
ملخص	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Table des matières	vi
Abréviations	xii
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xiv
Liste des travaux.....	xvii
Publications internationales	xvii
Conférences internationales.....	xvii
Journées doctorales	xvii
Introduction Générale.....	1

Partie I

ETAT DE L'ART ET CONCEPTS FONDAMENTAUX

Chapitre 1

Les systèmes automatisés

1.1	Introduction	4
1.2	Système automatisé de production.....	4
1.3	Objectifs et structure d'un système automatisé.....	5
1.3.1	Objectifs de l'automatisation	5
1.3.2	Structure des systèmes automatisés.....	5
1.4	Niveaux d'automatisation	6
1.5	Différentes classes des systèmes automatisés	8

1.5.1	Systèmes continus	8
1.5.2	Systèmes à Evènements Discrets	9
1.5.3	Systèmes dynamiques hybrides.....	10
1.6	Mode de fonctionnement d'un système	12
1.6.1	Modes de fonctionnement normaux (nominaux)	12
1.6.2	Modes de fonctionnement anormaux	12
1.7	Problématique liée aux systèmes automatisés.....	13
1.7.1	Surveillance des systèmes automatisés	13
1.7.2	Les systèmes automatisés et la reconfiguration	14
1.7.3	Commande des systèmes automatisés.....	15
1.8	Conclusion.....	16

Chapitre 2

Les systèmes dynamiques hybrides : présentation et modélisation

2.1	Introduction	17
2.2	Notions et définitions	18
2.3	Structure d'un système dynamique hybride	19
2.3.1	La partie continue.....	20
2.3.2	La partie discrète	20
2.3.3	L'interface entre la partie continue et la partie discrète	20
2.4	Classes de systèmes dynamiques hybrides.....	21
2.4.1	Systèmes à commutations	21
2.4.2	Systèmes linéaires par morceaux	21
2.4.3	Systèmes impulsionsnels (Systèmes à sauts).....	22
2.5	Modélisation des SDH	22
2.5.1	Approches basées sur une extension des modèles continus.....	22
2.5.2	Approches basées sur une extension des modèles discrets	22
2.5.3	Approches mixtes.....	23
2.6	Outils de modélisation des Systèmes Dynamiques Hybrides	23
2.6.1	Automate hybride.....	23
2.6.1.1	Les sous-classes d'automates hybrides	25
2.6.2	Réseaux de Petri hybrides	27

2.6.3	Bond-graph hybrides	28
2.7	Conclusion.....	29

Chapitre 3

Concepts et principe de la surveillance industrielle

3.1	Introduction	30
3.2	Définitions et terminologies	30
3.3	De la surveillance à la supervision	32
3.3.1	Fonctions de la supervision	32
3.3.1.1	Surveillance.....	34
3.3.1.2	Diagnostic de défauts	35
3.3.1.3	Reconfiguration (la prise de décision)	36
3.3.2	Classification des défauts	36
3.3.3	Selon l'emplacement d'occurrence	37
3.3.4	Selon leurs caractéristiques temporelles	38
3.3.5	Selon leurs influences.....	38
3.4	Classification des méthodes de diagnostic	39
3.4.1	Méthodes de diagnostic à base de modèles	40
3.4.1.1	Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs	40
3.4.1.2	Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs	42
3.4.2	Méthodes de diagnostic sans modèles.....	49
3.4.2.1	Méthode de redondance matérielle	49
3.4.2.2	Méthode de seuillage.....	49
3.4.2.3	Méthodes statistiques	49
3.4.2.4	Méthodes d'analyse fréquentielle (Filtrage)	50
3.4.2.5	Capteurs spécifiques.....	50
3.4.2.6	Méthodes à base réseaux de neurones artificiels.....	50
3.4.2.7	Méthodes à base systèmes d'inférence flous.....	51
3.4.2.8	La reconnaissance des formes	52
3.4.2.9	Les systèmes experts	53
3.5	Conclusion.....	54

Chapitre 4

Concepts de la commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques

4.1	Introduction	55
4.2	Définition	55
4.3	Structure d'un système tolérant aux défauts	56
4.3.1	Module de surveillance	56
4.3.2	Superviseur.....	56
4.4	Commande tolérante aux défauts des systèmes continus.....	57
4.4.1	Approches passives	58
4.4.2	Approches actives	59
4.4.2.1	Loi de commande pré-calculée	61
4.4.2.2	Loi de commande synthétisée en ligne	61
4.4.3	Différentes méthodes FTC actives	64
4.4.3.1	Méthode du pseudo inverse.....	64
4.4.3.2	Méthode par placement de structure propre.....	65
4.4.3.3	Commande adaptative	66
4.4.3.4	Commande prédictive	66
4.4.3.5	Autres méthodes.....	66
4.5	Commande tolérante aux défauts des systèmes à événements discrets	67
4.6	Commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides	68
4.7	Conclusion.....	71

Partie II

APPLICATIONS ET RESULTATS

Chapitre 5

Méthodologies de diagnostic et de tolérance aux défauts des SDHs

5.1	Introduction	72
5.2	Développement d'un système de diagnostic à base de N-F appliqué aux SDHs.....	73
5.2.1	Diagnostic à base de modèle	73

5.2.1.1	Génération de résidus	73
5.2.1.2	Analyse et évaluation des résidus.....	74
5.2.2	Diagnostic à base de modèle Neuro-Flou	74
5.2.2.1	Modèles Neuro-Flou pour la génération des résidus.....	75
5.2.2.2	Modèle flou pour l'évaluation des résidus	77
5.2.3	Application 1	79
5.2.3.1	Présentation du système	79
5.2.3.2	Simulation de bon fonctionnement du système.....	82
5.2.3.3	Modélisation du système (génération des résidus) à base modèles Neuro-Flou.....	82
5.2.3.4	Simulation des scénarios des défauts	84
5.2.3.5	Analyse et évaluation des résidus à base un modèle flou	85
5.2.3.6	Résultats et discussions	86
5.3	Développement d'un diagnostiqueur basé sur les modèles N-Fl et l'Automate à états finis appliqué aux SDHs.....	87
5.3.1	Application 2	88
5.3.1.1	Présentation du système	88
5.3.1.2	Modélisation du système.....	89
5.3.1.3	Développement du diagnostiqueur.....	91
5.3.1.4	Résultats et discussions	94
5.4	Commande tolérante aux défauts des SDH.....	95
5.4.1	Application 3	97
5.4.1.1	Stratégie de diagnostic des défauts (défaut actionneur).....	97
5.4.1.2	Stratégie de commande tolérante aux défauts	99
5.4.1.3	Résultats et discussions	101
5.5	Conclusion.....	101

Chapitre 6

Contrôle et supervision d'un procédé de production d'eau potable

6.1	Introduction	103
6.2	Situation mondiale de l'eau potable	103
6.3	Technologies de dessalement	104
6.3.1	Définition du procédé osmose inverse	105

6.4	Description d'une installation osmose inverse.....	106
6.5	Automatismes dans une installation osmose inverse	108
6.6	Contrôle et supervision des procédés osmose inverse	109
6.6.1	Automate Programmable Industriel	109
6.6.1.1	Automate Schneider Premium TSX H57	110
6.6.1.2	Logiciel de programmation Unity Pro	110
6.7	Supervision dans un environnement SCADA	111
6.7.1	Définition de SCADA	111
6.7.2	Fonctionnalités d'un système SCADA	111
6.7.3	Logiciel de supervision SCADA : Schneider-Vijeo Citect.....	111
6.8	Supervision d'un procédé industriel : une station de déminéralisation.....	112
6.8.1	Présentation de la station de déminéralisation	112
6.8.2	Modélisation simplifié de la station de déminéralisation.....	113
6.8.3	Modes de fonctionnement normal du système	114
6.8.4	Développement d'un système de diagnostic des défauts	115
6.8.4.2	Diagnostic des défauts de la station de déminéralisation.....	116
6.8.4.3	Résultats d'application	118
6.9	Réalisation d'une nouvelle philosophie de supervision d'une installation ind	120
6.9.1	Philosophie de fonctionnement des dysfonctionnements.....	121
6.9.2	Implantation en temps réel des contrôleurs flous.....	121
6.9.2.1	La commande floue	122
6.9.2.2	Structure du contrôleur flou (FLC)	122
6.9.2.3	Recommandations d'implémentation des contrôleurs flous	123
6.9.2.4	Serveur OPC.....	123
6.9.3	Conception et implémentation	125
6.9.3.1	Equipements et méthodes.....	126
6.9.3.2	Description des logiciels	127
6.9.3.3	Traitement du système	128
6.9.3.4	Conception du contrôleur 1	130
6.9.3.5	Conception du contrôleur 2.....	131
6.9.3.6	Résultats et discussion.....	133
6.10	Conclusion.....	133
	Conclusion générale.....	132

Abréviations

ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i> Système d'inférence Neuro-Floue adaptative
API	Automate programmable industriel
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i> : unité centrale de traitement
FDI	<i>Fault Detection and Isolation</i> Détection et isolation des défauts
FIS	<i>Fuzzy Inference System</i> Système d'Inférence Floue
FLC	<i>Fuzzy Logic controller</i> Contrôleur flou
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> Norme numérique pour la téléphonie mobile
HMI (IHM)	<i>Human Machine Interface</i> Interface homme-machine
IA	Intelligence Artificielle
OPC	<i>Open Platform Communications</i> Protocole de contrôle de processus ouvert
pH	Potentiel hydrogène
RdP	Réseau de Petri
redOx	<i>Reduction–oxidation</i> Oxydoréduction
R.O.	<i>Reverse Osmosis</i> Osmose inverse
RTU	Unité terminale à distance
SAP	Système Automatisé de Production
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> Système de contrôle et d'acquisition de données
SDH	Système dynamique hybride
SED	Systèmes à événements discrets

Liste des tableaux

Tableau 5.1 : Les défauts simulés.	85
Tableau 5.2 : Fonctions d'appartenance des résidus.	85
Tableau 5.3 : Les défauts simulés.	93
Tableau 6.1 : Automatismes dans une installation osmose inverse.	108
Tableau 6.2 : Listes des équipements défaillants.	118
Tableau 6.3 : Situation globale actuelle du système.	126

Liste des figures

Figure 1.1 : Structure d'un système automatisé de production.....	6
Figure 1.2 : La pyramide d'automatisation industrielle.....	7
Figure 1.3 : Chronogramme de l'évolution de l'état d'une vanne.....	10
Figure 1.4: Exemple de réservoir d'eau.....	10
Figure 1.5 : Modèle à événements discrets correspondant au système de réservoir.....	11
Figure 1.6 : Comportement d'une variable dans un SDH.....	11
Figure 1.7 : Modes de fonctionnement d'un système automatisé de production.....	13
Figure 1.8 : Modes de fonctionnement d'un système automatisé de production.....	15
Figure 2.1 : Couplage continu-discret d'un système hybride.....	18
Figure 2.2 : Interaction entre la partie continue et la partie discrète d'un SDH.....	19
Figure 2.3 : Automate hybride.....	25
Figure 2.4 : Exemple d'un automate hybride linéaire.....	26
Figure 2.5 : Exemple d'automate hybride rectangulaire.....	26
Figure 2.6 : Modèle de réseau de Petri hybride d'un système de fabrication par lots.....	27
Figure 2.7 : Modèle bond graph causal et bloc diagramme.....	28
Figure 3.1 : Les principales étapes de la supervision.....	33
Figure 3.2 : Différents types de défauts d'un système physique.....	38
Figure 3.3 : Classification des méthodes de diagnostic.....	39
Figure 3.4 : Architecture générale du diagnostic de défauts à base de modèle quantitatif.....	41
Figure 4.1: Structure générale d'un système tolérant aux défauts.....	57
Figure 4.2: Classification des approches de la commande tolérante aux défauts.....	57
Figure 4.3 : Décomposition hiérarchique d'un système passif tolérant aux défauts.....	58
Figure 4.4 : Décomposition hiérarchique d'un système actif tolérant aux défauts.....	60
Figure 4.5 : Structure d'une FTC active à base de régulateurs pré-calculée.....	61
Figure 4.6: Accommodation du défaut.....	62
Figure 4.7 : Reconfiguration du système.....	63
Figure 5.1 : Principe des méthodes de diagnostic avec modèle.....	74
Figure 5.2 : Génération des résidus Neuro-Flou.....	75
Figure 5.3 : Structure de modèle Neuro-Flou adaptatif ANFIS.....	77
Figure 5.4 : Diagnostiqueur basé sur les modèles Neuro-Flou.....	78
Figure 5.5 : Le système hydraulique à deux bacs.....	79

Figure 5.6 : Automate hybride.	81
Figure 5.7 : (a) L'évolution des niveaux $h1$ et $h2$, (b) L'évolution des modes.....	82
Figure 5.8 : (a) Réseau ANFIS 1 (Sortie $h1$), (b) Réseau ANFIS 2 (Sortie $h2$).....	83
Figure 5.9 : (a) La sortie $h1$ réelle et estimée, (b) La sortie $h2$ réelle et estimée.....	83
Figure 5.10 : (a) Comportement de résidu r_1 , (b) Comportement de résidu r_2	83
Figure 5.11 : (a) La sortie $h1$ réelle et estimée, (b) La sortie $h2$ réelle et estimée.....	85
Figure 5.12 : (a) Fuzzification des résidus, (b) Inférence (Règles floues).	86
Figure 5.13 : (a) Les résidus, (b) Les décisions.	86
Figure 5.14 : Principe de la méthodologie basée sur les modèles N-F et l'automate à états finis.....	88
Figure 5.15 : Système à trois cuves.....	88
Figure 5.16 : La décomposition physique du système.	90
Figure 5.17 : Automate du système à trois cuves.....	91
Figure 5.18 : (a) Evolution des modes réels et estimés, (b) Résidus (cas sans défauts).	92
Figure 5.19 : Comportement de la dynamique continue du système en présence des défauts.	93
Figure 5.20 : (a) Les résidus, (b) Les décisions.	94
Figure 5.21 : Séquence des modes, en absence des défauts (-), en présence des défauts (- -)	94
Figure 5.22 : Schéma général de diagnostic et d'accommodation de défauts.	96
Figure 5.23 : Schéma général d'une commande tolérante aux défauts utilisant.....	97
Figure 5.24 : (a) Evolution du débit de la pompe avec défaut, (b) L'évolution réelle et estimée du niveau $h1$	98
Figure 5.25 : (a) L'évolution réelle et estimé du niveau $h2$, (b) L'évolution des résidus et des décisions associées.	98
Figure 5.26 : (a) Evolution de débit référence, (b) Evolution de débit des pompes, avec accommodation du défaut.	99
Figure 5.27 : (a) Evolution des résidus et (b) les décisions, avec accommodation du défaut..	99
Figure 5.28 : Evolution des niveaux $h1$ réel et estimé dans le cas sans et avec reconfiguration, (b) Estimation du défaut $h1$	100
Figure 5.29 : Evolution des niveaux $h2$ réel et estimé dans le cas sans et avec reconfiguration, (b) Estimation du défaut $h2$	100
Figure 5.30 : Evolution des modes dans le cas sans et avec reconfiguration.....	101
Figure 6.1 : Estimation de la situation mondiale de l'eau. (Projection pour 2025).	104
Figure 6.2 : Le processus de l'Osiose Inverse.....	106

Figure 6.3 : Schéma général d'une installation osmose inverse.	106
Figure 6.4 : Membrane osmose inverse.	107
Figure 6.5 : L'automate <i>Schneider</i> et le logiciel <i>Unity Pro</i>	110
Figure 6.6 : Schéma synoptique simplifié de la station de déminéralisation de Touggourt. .	113
Figure 6.7 : Schéma synoptique simplifié de la station osmose inverse	114
Figure 6.8 : Automate à états finis créée par <i>Stateflow</i>	116
Figure 6.9 : Evaluation des résidus à base d'un Automate à états finis.	118
Figure 6.10 : (a) Les résidus, (b) Les décisions.	119
Figure 6. 11 : Structure de base d'un système flou.	123
Figure 6.12 : Architecture de serveur <i>OPC</i>	125
Figure 6.13 : Schéma fonctionnel de la structure matérielle du système.	127
Figure 6.14 : Blocs Serveur <i>OPC</i> de <i>MATLAB</i>	128
Figure 6.15 : <i>API</i> , <i>SCADA</i> , <i>MATLAB</i> et serveur <i>OPC</i>	128
Figure 6.16 : Schéma fonctionnel pour le traitement des données.....	129
Figure 6.17 : Éditeur <i>FIS</i> pour le contrôleur de vanne de réservoir avec deux entrées.	130
Figure 6.18 : Fonctions d'appartenance (a). Variable d'entrée "Niveau" (b). Variable d'entrée "Taux" (c). Variable de sortie "Vanne".....	131
Figure 6.19 : Éditeur <i>FIS</i> pour le régulateur de vitesse des pompes avec deux entrées.	131
Figure 6.20 : Fonctions d'appartenance (a). Variable d'entrée "Niveau" (b). Variable d'entrée "Erreur" (c). Variable de sortie "Niveau" (d). Variable de sortie "Vitesse de pompe"..	132

Liste des travaux

Publications internationales

1. **Achbi, M. S.**, Kechida, S., Mhamdi, L., Dhouibi, H. (2021). A Neural-fuzzy approach for fault diagnosis of hybrid dynamical systems: Demonstration on three-tank system. *Acta Mechanica et Automatica*, 15(1), 1-8. <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0001>
2. **Achbi, M. S.**, Mhamdi, L., Kechida, S., Dhouibi, H. (2020). Methodology to knowledge discovery for fault diagnosis of hybrid dynamical systems: demonstration on two tanks system. *Diagnostyka*, 21(4), 115-123. <https://doi.org/10.29354/diag/130617>
3. Mhamdi, L., **Achbi, M. S.**, Dhouibi, H., Kechida, S. (2020). Diagnosis of hybrid systems through bond graph, observers and timed automata. *Diagnostyka*, 21(3), 113-125. <https://doi.org/10.29354/diag/126444>
4. **Achbi, M. S.**, Kechida, S. (2020). Methodology for monitoring and diagnosing faults of hybrid dynamic systems: a case study on a desalination plant. *Diagnostyka*, 21(1), 27-33. <https://doi.org/10.29354/diag/116076>

Conférences internationales

1. **Achbi, M. S.**, Mhamdi, L., Kechida, S., Dhouibi, H. (2020). Fault diagnosis and Fault tolerant control of Hybrid Dynamic Systems. 2nd International Conference on Electronics and Electrical Engineering IC3E. Bouira.
2. **Achbi, M. S.**, & Kechida, S. (2017). Fault diagnosis of a reverse osmosis water desalination plant through a hybrid approach. In International conference on Electronics and new technologies. ICENT. M'sila.
3. **Achbi, M. S.**, & Kechida, S. (2017). Fault tolerant control of Reverse Osmosis Desalination Plant with the application of SCADA system. In 2nd international conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics. ICAAID. Djelfa.
4. **Achbi, M. S.**, & Kechida, S. (2017). Hybrid dynamic systems fault diagnosis approach based on hybrid automata and ANFIS. In 2nd international conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics. ICAAID. Djelfa.
5. **Achbi, M. S.**, & Kechida, S. (2015). Modélisation et Diagnostic des Systèmes Dynamiques Hybrides par ANFIS. In 1st international conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics. ICAAID. Djelfa.

Journées doctorales

1. **Achbi, M. S.**, & Kechida, S. (2015). Modélisation et Diagnostic des procédés de production d'eau potable. 2ème journée Doctorale JD'15. Université de 08 Mai 1945 Guelma.
2. **Achbi, M. S.**, & Kechida, S. (2014). Diagnostic des systèmes dynamiques hybrides : Applications à un système à trois réservoirs. 1ère journée Doctorale JD'14. Université de 08 Mai 1945 Guelma.

Introduction Générale

Avec le développement de la technologie, les systèmes automatisés modernes deviennent de plus en plus complexes et sophistiqués. Cela peut les conduire à des états dysfonctionnels qui ne leur permettent pas d'effectuer correctement leurs tâches. Cette complexité implique aussi des besoins croissants en termes de fiabilité, de disponibilité et de fiabilité. Afin de garantir leur bon fonctionnement, un facteur important caractérise les systèmes automatisés, il s'agit de leurs dynamiques. En effet, il est nécessaire de prendre en compte les aspects continus et événementiels de dynamique des systèmes automatisés.

En général, les dynamiques des systèmes automatisés impliquant explicitement et simultanément des phénomènes ou des modèles de type dynamique continu et événementiel sont appelés Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH). Ces systèmes sont classiquement constitués de processus continus interagissant avec des processus discrets. Les conséquences de l'apparition de défauts peuvent être graves et entraîner des pertes humaines, des émissions nocives pour l'environnement, des coûts de réparation élevés ou des pertes économiques causées par des arrêts imprévus dans les lignes de production. Par conséquent, la détection précoce et la localisation des défauts sont la clé pour maintenir les performances du système, assurer la sécurité et augmenter la durée de vie du système.

Afin de pouvoir éviter ce genre de situation et d'améliorer les performances de ces installations, l'élaboration d'un module de diagnostic est désormais nécessaire. Le diagnostic des défauts est essentiel pour garantir le fonctionnement correct des systèmes automatisés. De nombreux systèmes actuels combinent des processus physiques et informatiques et sont mieux modélisés comme des systèmes hybrides, où le comportement dynamique combine une évolution continue entrecoupée de changements de configuration discrets. Par conséquent, les approches de diagnostic basées sur des modèles doivent prendre en compte à la fois la dynamique continue et discrète du système ainsi que les interactions entre elles afin de réaliser le diagnostic de défaut.

Le problème de la commande tolérante aux défauts des systèmes automatisés complexes a reçu aussi une attention considérable par le monde scientifique. Récemment, de nombreuses approches de commande tolérante aux défauts ont été proposées dans la littérature pour améliorer la fiabilité et de garantir la stabilité du système dans toutes les situations. Ces méthodes formelles sont nécessaires pour la conception, l'analyse et la mise en œuvre fiables et correctes des diagnostiqueurs de systèmes dynamiques hybrides. Par définition, un système

tolérant aux défauts est capable de changer les caractéristiques de l'architecture de contrôle pour s'adapter aux variations du processus contrôlé, tout en maintenant autant que possible la stabilité et les performances du système d'origine (Moor et Schmidt, 2017). L'utilisation des systèmes de contrôle reconfigurable est une solution prometteuse qui améliore les performances et la productivité des systèmes et prend en charge la réactivité exigée dans les systèmes de contrôle.

Autrement, le développement de nouvelles technologies a introduit une complexité supplémentaire au niveau des systèmes réels par le fait qu'ils combinent à la fois des éléments matériels et des éléments logiciels et le maintien de leur performance et de leur productivité est un défi important.

Les travaux présentés dans cette thèse entrent dans le cadre de recherche d'une méthodologie de diagnostic de défauts des systèmes dynamiques hybrides et la synthèse d'une commande tolérante aux défauts. Le défi principal est de proposer une méthodologie de diagnostic des défauts et la conception d'une commande reconfigurable et tolérante aux défauts, implantable dans les automates programmables industriels et utilisable dans le domaine industriel, et de fournir également aux opérateurs, dans sa tâche de supervision en ligne, des informations et des solutions permettant de créer un module d'aide à la décision.

Cette thèse s'étale globalement sur deux parties encadrées par une introduction générale et une conclusion générale.

- La partie théorique est scindée en quatre chapitres. Le premier chapitre effectue un tour d'horizon sur le contexte générale associé aux systèmes automatisés de production. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des systèmes dynamiques hybrides, les différentes classes de ces systèmes, leurs structures et quelques modèles représentatifs. Ces systèmes provenant d'une combinaison entre les systèmes continus et les systèmes à événements discrets. Dans le troisième chapitre, nous exposerons les principales approches liées à notre problématique de diagnostic des défauts. Le quatrième chapitre présentera les principales commandes tolérantes aux défauts pour amener et justifier les choix et les orientations de cette thèse. Nous avons donné une idée détaillée sur les différents axes de recherche ainsi que les travaux effectués dans ce domaine. Il permet notamment de classer diverses méthodes en deux grandes catégories : les lois de commandes tolérantes aux défauts passives d'une part, et actives d'autre part.

- La partie pratique est présentée par les deux chapitres cinq et six qui se focalise sur l'élaboration d'un système réel de diagnostic des défauts et un autre de supervision en temps réel d'une station de déminéralisation d'eau. Dans le cinquième chapitre, nous exposons des applications de diagnostic et de la commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides. Dans le dernier chapitre, nous proposons aussi des applications sur le diagnostic et la supervision appliqués à une station de déminéralisation.

Enfin, la thèse se termine par une conclusion générale résumant l'ensemble du travail réalisé et précisant des directions de recherches futures.

Partie I

ETAT DE L'ART ET CONCEPTS FONDAMENTAUX

CHAPITRE I

LES SYSTEMES AUTOMATISÉS

1. Les systèmes automatisés

1.1 Introduction

Les systèmes automatisés de production ont permis, au cours des dernières décennies, d'augmenter la production, d'améliorer la qualité des produits, de réduire les coûts et d'économiser des matières premières et de l'énergie. Ceci, à son tour, ne peut être réalisé qu'en assurant la fiabilité et la supervision parfaite des systèmes tout au long du processus de production. En effet, avec la réduction des interventions humaines et l'automatisation de certaines fonctions, les systèmes automatisés de production (SAP) sont devenus plus complexes et donc le risque de dysfonctionnements a augmenté.

La complexité des systèmes automatisés de production a conduit à la nécessité de rechercher d'une part, des méthodes de surveillance pour découvrir et identifier d'éventuels dysfonctionnements, et d'autre part, des méthodes de commande pour assurer le bon fonctionnement. En conséquence, la surveillance, la supervision et la commande des systèmes automatisés de production sont devenus des sujets d'actualité dans la recherche scientifique et industrielle en raison de la complexité et l'augmentation des coûts des interventions de maintenance.

Dans ce chapitre nous introduisons les systèmes automatisés de production à travers la présentation de quelques notions de base : la définition, la structure et les objectifs des systèmes automatisés de production. Ensuite, nous présentons les différentes classes, ainsi les différents modes de fonctionnement des systèmes automatisés. Enfin, nous exposons l'Automates Programmables Industriels qui est le principal composant d'automatisme destiné à la commande des systèmes automatisés.

1.2 Système automatisé de production

Un système peut être défini comme toute structure dont la fonction globale est d'apporter une valeur ajoutée à un ensemble de matières d'œuvre, dans un contexte particulier. En revanche, on peut définir un système automatisé comme un système réalisant des actions sans présence d'une intervention humaine. La seule tâche effectuée est représentée par la programmation et le réglage du système.

Un système automatisé de production est considéré comme un système d'activités utilisant des ressources (informations, humaines, matérielles et matières) pour la transformation des éléments d'entrée en éléments de sortie où le résultat attendu représente un produit.

Un système automatisé de production représente une classe très importante des systèmes industriels qui sont souvent classés comme des systèmes complexes. Cette complexité est liée d'une part, de grand nombre d'interactions et d'interconnexions entre leurs différents composants, et d'autre part à leur fonctionnement.

1.3 Objectifs et structure d'un système automatisé

1.3.1 Objectifs de l'automatisation

La production industrielle est de plus en plus automatisée. Cette augmentation du degré d'automatisation se réfère à l'automatisation de processus auparavant manuels tels que les assemblages ou les contrôles, mais aussi à l'automatisation supplémentaire de processus déjà partiellement automatisés.

L'objectif de l'automatisation est de rendre le fonctionnement des systèmes automatique et d'éviter l'intervention humaine. Elle permet aussi de :

- Augmenter la productivité du système,
- Améliorer la flexibilité de production,
- Améliorer la qualité du produit,
- Diminuer le coût des produits, par la réduction des frais,
- Réaliser des opérations dangereuses et impossibles à contrôler manuellement.

1.3.2 Structure des systèmes automatisés

D'un point de vue de l'automaticien, un système automatisé de production (qu'il soit électrique, mécanique, chimique,...) est considéré avant tout comme un système de communication chargé d'établir des relations bien définies entre un ensemble de grandeurs appelées grandeurs d'entrée, et un autre ensemble de grandeurs de sortie.

Un système automatisé de production se décompose généralement en trois parties principales comme le montre la figure 1.1 : la partie commande, la partie opérative et l'interface (Derbel, 2009), (Ben Rabah, 2018).

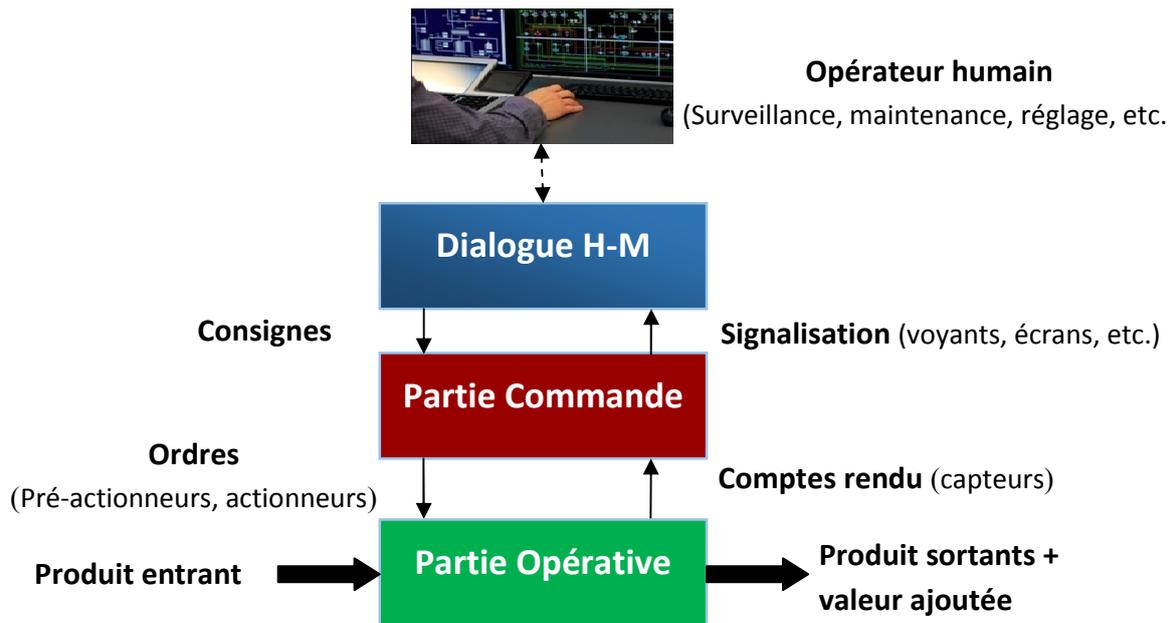


Figure 1.1 : Structure d'un système automatisé de production.

- a) Partie commande (PC) :** Cette partie sert à envoyer les ordres vers la partie opérative et permet de communiquer avec l'opérateur. Donc, elle rassemble tout les moyens matériels, logiciels, même les informations permettant de gérer le système. Les deux composantes principales de cette partie concernent la surveillance et la supervision.
- b) Partie opérative (PO) :** La partie opérative est composé de trois ensembles : les capteurs, les actionneurs et l'unité de production. À l'aide des actionneurs, cette partie permet d'exécuter les ordres envoyés par la partie commande et lui communique les informations collectées (compte rendus) à partir de capteurs.
- c) L'interface :** L'interface permet l'échange d'information entre les deux partie du système de production: la partie commande et la partie opérative. Ces échanges sont mis en évidence par les ordres (actions) et les comptes rendus (capteurs).

1.4 Niveaux d'automatisation

Les systèmes d'automatisation industriels sont très complexes, car ils se composent de différents périphériques. Ils se caractérisent par une confluence de fonctionnement de plusieurs équipements dans une même période (Debibi, 2016), (Fabre, 2009).

Les niveaux d'automatisation dépendent de l'objectif à atteindre. La pyramide du *CIM* (*Computer Integrated Manufacturing*) est une représentation conceptuelle qui comporte cinq niveaux auxquels correspondent des niveaux de décision. Plus on s'élève dans cette pyramide, plus le niveau de décision est important, plus la visibilité est globale et plus les horizons et cycles opérationnels s'allongent. La pyramide d'automatisation industrielle est organisée de manière hiérarchique comme présentée dans la figure 1.2.



Figure 1.2 : La pyramide d'automatisation industrielle.

a) Niveau 0 : Ce premier niveau regroupe l'ensemble des composants terminaux dédiés à l'exécution et au traitement des différentes tâches, tels que les capteurs, les variateurs de vitesses, les départ moteurs, les actionneurs,...). Ce niveau est composé de dispositifs ou d'équipements qui reçoivent un type de signal physique et le transforment en un autre type de signal. Ce niveau est le rang le plus bas dans la structure des niveaux d'automatisation.

b) Niveau 1 : Ce niveau regroupe l'ensemble des composants dédiés à la commande du procédé d'automatisation tel que les automates programmables industriels, à partir de lesquelles les actionneurs sont censés exécuter une tâche précédemment souhaitée de manière indépendante et automatique. Ce niveau sert aussi de communiquer entre la salle de supervision du procédé et l'unité de production en envoyant périodiquement l'état du procédé.

c) Niveau 2 : Ce niveau correspond au niveau de supervision et de commande, niveau auquel sont menées les actions suivantes : acquisition des données ainsi que leur analyse, traitement des alarmes et suivi des commandes préalablement programmées. Il rassemble tous les composants dédiés à la supervision du procédé d'automatisation (*SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition*). Ces systèmes sont souvent embarqués sur des serveurs

capables de récupérer et d'envoyer des informations au procédé industriel et sont en interaction avec des opérateurs humains.

d) Niveau 3 : Ce niveau correspond au niveau de planification, comme son nom l'indique, il correspond à un niveau où l'ordonnancement de la production est planifié, les matériaux nécessaires à la réalisation d'un produit sont nécessaires, ainsi que les différentes analyses financières, etc. La gestion de la distribution se situe à ce niveau, c'est-à-dire qu'à ce niveau les ordres que le niveau 2 doit exécuter sont programmés.

e) Niveau 4 : C'est un niveau de gestion d'entreprise qui se consacre uniquement et exclusivement à la partie administrative de l'industrie, parmi les activités les plus pertinentes qui se déroulent à ce niveau, nous pouvons citer : la planification stratégique, l'ingénierie des procédés, la gestion technologique, la recherche et le développement.

1.5 Différentes classes des systèmes automatisés

Selon le comportement de leurs fonctions, les systèmes automatisés de production peuvent être classés en trois grandes familles : les systèmes continus, les systèmes à événements discrets et les systèmes qui peuvent présenter les deux types de comportements, continu et à événements discrets, et qu'on appelle systèmes dynamiques hybrides (SDH).

1.5.1 Systèmes continus

Le système continu (à temps continu) peut être défini comme un système multivariable dont l'état instantané est représenté par un vecteur d'état réel de dimension finie (Rakotoson et al., 1992).

La dynamique des systèmes continus est caractérisée par des variables représentant leur évolution dans le temps, qui est continu, prenant des variables réelles. On peut citer comme exemple, un débit, une vitesse, un niveau, sont quelques exemples de ces variables. Ces variables évoluent d'une façon continue dans le temps.

Les équations différentielles, les représentations d'état sont les outils mathématiques les plus utilisés pour modéliser les systèmes continus. L'équation suivante représente une forme d'équation d'états :

$$f(\dot{x}, x, u, t) = 0 \quad (1.1)$$

Où t : Temps, $x(t)$: Vecteur d'état, $\dot{x}(t)$: Dérivée temporelle du vecteur d'état.

1.5.2 Systèmes à Événements Discrets

Un Système à Événements Discrets (SED) est un système à espace d'état discret dont les transitions entre les états sont associées à l'occurrence d'événements discrets asynchrones (Cassandras et Lafortune, 1999).

Les systèmes à événements discrets sont des systèmes dynamiques non linéaires à états discrets et à évolution événementielle. On parle d'un système à événements discrets lorsque le système peut être défini par un ensemble d'état distincts, et que l'état change de valeurs de manière discrète dans le temps. Autrement dit, le passage entre un état et un autre se fait à des instants discrets dans le temps, associés à des événements, tels que l'apparition d'un défaut ou l'ouverture d'une vanne.

Contrairement aux systèmes continus obéissant essentiellement aux lois de la physique, et décrits par des équations différentielles ou aux dérivées partielles, les systèmes à événements discrets recouvrent des systèmes dynamiques, mais dont la dynamique échappe complètement à ce genre de description. Ils ont un espace d'états décrit par un ensemble discret comme par exemple l'ensemble des naturels ou un sous-ensemble de ce dernier. Les changements d'état de ces systèmes, appelés événement sont observés à des instants discrets du temps.

Pour cela on dit que les systèmes à événements discrets sont contrôlés par les événements (et non par le temps) : au lieu de s'occuper du déroulement continu du fonctionnement, on ne se préoccupe que des « débuts » et des « fins » de ces événements discrets et de leur enchaînement dynamique, temporel ou logique. Il s'agit de systèmes, dont le fonctionnement peut être représenté sous forme d'apparitions asynchrones d'événements discrets. Ces occurrences peuvent être surveillées ou non-surveillées.

Les systèmes à événements discrets peuvent apparaître dans plusieurs domaines : la communication, le transport, le domaine de l'informatique, la production industrielle (Cassandras et Lafortune, 2008).

Considérons par exemple une vanne pouvant prendre quatre états distincts : fermée, en ouverture, ouverte et en fermeture. La figure 1.3 représente le chronogramme de l'évolution possible de ce système à événements discrets (une vanne).

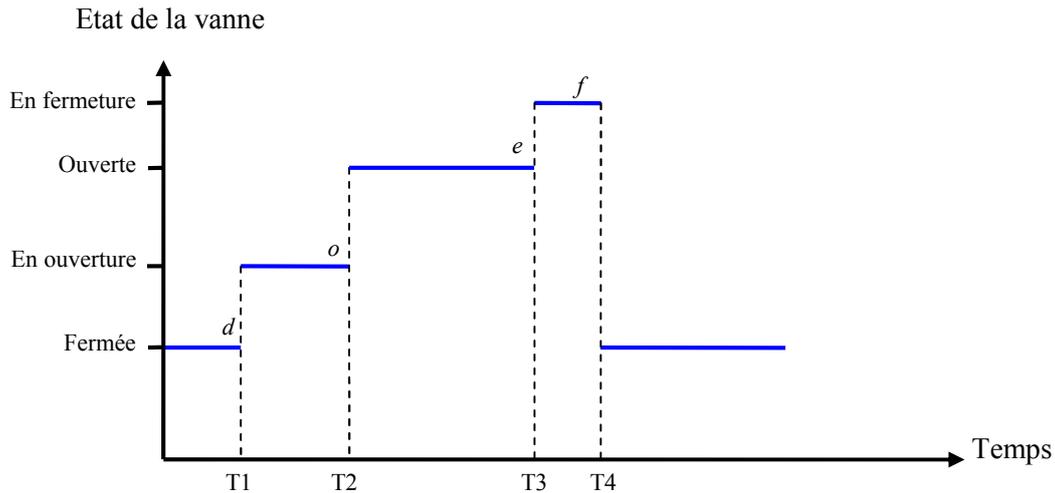


Figure 1.3 : Chronogramme de l'évolution de l'état d'une vanne.

1.5.3 Systèmes dynamiques hybrides

Précédemment, la modélisation des systèmes automatisés de production est représentée soit par des modèles à dynamique continue, soit par des modèles à événements discrets. Au contraire, dans les applications modernes, l'interaction entre les processus physiques et les systèmes numériques s'est considérablement accrue (Batis, 2013).

Prenons l'exemple d'un réservoir qui peut être rempli ou vidé.

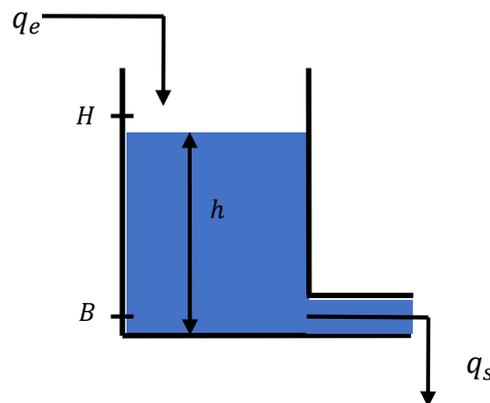


Figure 1.4: Exemple de réservoir d'eau.

Deux modélisations peuvent être représentées pour ce système :

- A l'aide d'un modèle continu, on peut modéliser la dynamique du niveau d'eau dans le réservoir par l'équation suivante :

$$\dot{h}(t) = \frac{1}{S} [q_e(t) - u(t) \cdot \alpha \cdot h(t)] \quad (1.2)$$

Où : $q_e(t)$ est le débit d'entrée, $h(t)$ la hauteur d'eau, $u(t)$ l'état de la vanne qui prend la valeur 0 (fermée) et 1 (ouverte), S la section du bac et α un paramètre.

- A l'aide d'un modèle à événements discrets, on peut modéliser les deux états du système, le remplissage et le vidange du réservoir, qui peut être décrit par un automate (Figure 1.5).

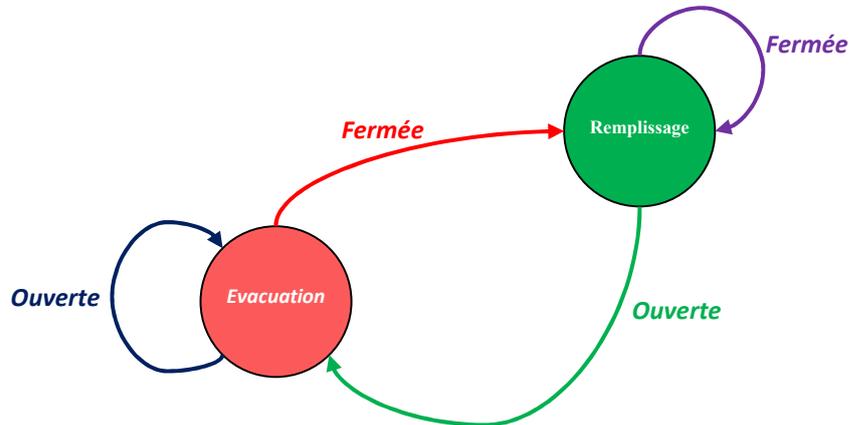


Figure 1.5 : Modèle à événements discrets correspondant au système de réservoir.

Dans certain cas, il est difficile de classer un système dans l'une des deux catégories citées auparavant. Donc, la prise en compte d'une autre classe de systèmes qui considère à la fois les deux variables d'état continues et discrètes est nécessaire. Ce type de système est appelé Système Dynamique Hybride (SDH).

Les Systèmes Dynamiques Hybrides sont des systèmes qui intègrent à la fois une dynamique continue et une dynamique discrète (Antsaklis et Koutsoukos, 2003). Ils évoluent dans le temps et combinent des variables continues et des variables discrètes (Janan, 2001).

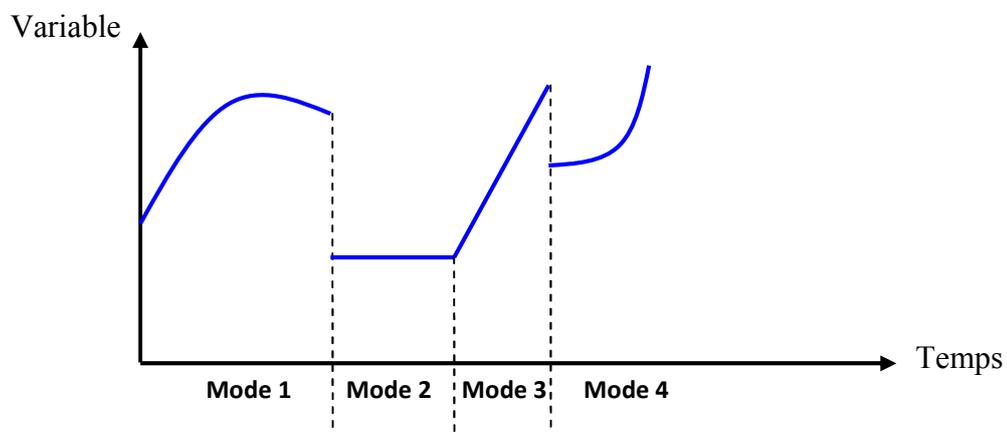


Figure 1.6 : Comportement d'une variable dans un SDH.

Les SDHs sont des systèmes qui peuvent être vus comme un ensemble de modes ou d'états discrets, où chaque état est décrit par un ensemble de contraintes reliant des variables continues. Un SDH est donc considéré comme étant continu au niveau de chaque état discret. Le passage d'un état à un autre, fait transiter le système vers un nouveau mode de fonctionnement, où d'autres contraintes relatives au nouvel état doivent être satisfaites. Ce changement d'état ou de mode est dû à l'occurrence de certains événements (Ghomri, 2012).

1.6 Mode de fonctionnement d'un système

Dans la littérature, une classification de plusieurs modes de fonctionnement a été représentée suivant le mode sous lequel le système évolue. Un système automatisé de production peut évoluer selon deux modes principaux de fonctionnement : un mode normal et un mode anormal (Rayhane, 2004). On peut considérer des modes de fonctionnement de différents types parmi lesquels :

1.6.1 Modes de fonctionnement normaux (nominaux)

Cette classe regroupe tous les modes de fonctionnement pouvant amener le système, y compris le mode nominal, d'exécuter parfaitement sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.

1.6.2 Modes de fonctionnement anormaux

Les systèmes de cette classe ne peuvent pas exécuter partiellement ou même totalement leurs tâches. Les modes de fonctionnement de cette classe peuvent être décomposés en :

- **Modes défaillants** : Ces modes correspondent à de mauvais fonctionnement du système. Les systèmes passent dans ce mode suite à l'apparition d'une ou plusieurs défaillances. En effet, un équipement ou un système peut avoir qu'un seul mode de bon fonctionnement, par contre, il peut avoir plusieurs modes de défaillance.
- **Modes dégradés** : Un mode dégradé correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindres. En d'autres termes, il y a une dégradation dans l'équipement ou le système, mais pas de défaillance.
- **Modes critiques** : Un système caractérisé par un mode de fonctionnement critique, lorsqu'un système fonctionne d'une manière très particulière et souvent indésirable.
- **Modes interdits** : Ce sont des modes dans lesquelles le système ne devrait pas du tout fonctionner pour des raisons de sécurité.

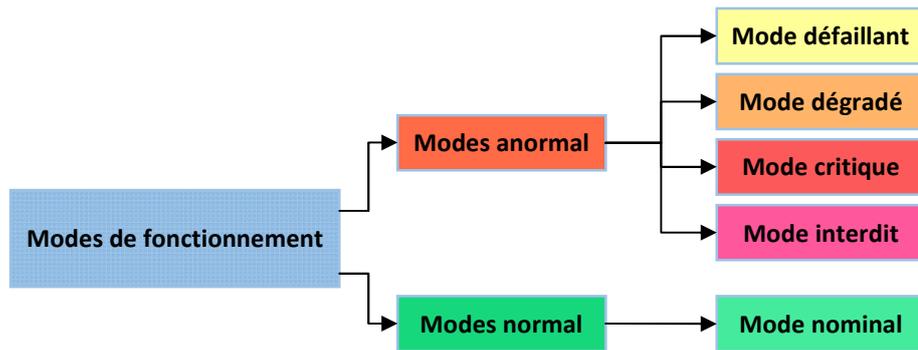


Figure 1.7 : Modes de fonctionnement d'un système automatisé de production.

1.7 Problématique liée aux systèmes automatisés

1.7.1 Surveillance des systèmes automatisés

En pratique, il s'avère qu'il est très difficile d'intégrer toutes les connaissances humaines dans une partie commande. Ce qui implique de laisser certaines tâches confiées à l'intervenant humain. En plus de ces raisons techniques, il existe des considérations économiques, des considérations financières et des considérations sociales pour l'automatisation douce. Donc, certaines tâches restent manuelles et l'automatisation reste souvent partielle. L'automatisation doit prendre en compte la spécificité de l'action humaine, cela signifie notamment d'assurer le dialogue entre le système automatisé et les intervenants et d'assurer aussi la sécurité de ces derniers dans l'exécution de leurs tâches manuelles. Au fur et à mesure que la complexité augmente et que l'automatisation permet d'atteindre les performances requises, les systèmes automatisés deviennent plus vulnérables aux dysfonctionnements qui peuvent conduire à des dégâts ou à des systèmes de comportement indésirables.

Ces dernières années, une large communauté de chercheurs s'est mobilisée pour améliorer la surveillance et le diagnostic, en raison de la complexité croissante des systèmes industriels automatisés et des contraintes de compétitivité en termes de coût de production, de disponibilité et de sécurité des installations. L'amélioration de la fiabilité des systèmes automatisés repose principalement sur des algorithmes de détection et de localisation des défauts, qui consistent essentiellement à comparer le comportement réel du système avec des comportements de référence décrivant le fonctionnement normal, ou décrivant différents types de défauts, tout en réduisant les fausses alarmes, les non détections, ainsi que le retard dans l'occurrence de la détection des défauts.

1.7.2 Les systèmes automatisés et la reconfiguration

La gestion des défauts joue un rôle très important dans les systèmes industriels d'aujourd'hui car l'interaction entre de nombreux composants automatisés crée un problème complexe qui peut être difficile à résoudre. De plus, une défaillance d'un composant peut entraîner un dysfonctionnement de l'ensemble du système. Donc, il ne s'agit plus seulement de découvrir les défauts et de déterminer leur emplacement et leur instant d'apparition, mais aussi de s'assurer que des solutions sont trouvées et fournies aux opérateurs qui peuvent aider à gérer le système.

Cependant, la mise en œuvre de méthodes formelles pour assurer le bon fonctionnement des systèmes lorsque des erreurs se produisent est nécessaire afin nous rend relativement plus stable, quelle que soit l'habileté et la rapidité avec laquelle les tâches de diagnostic et la maintenance peuvent être effectués. En d'autres termes, il est nécessaire de développer des méthodes de commande tolérantes aux défauts ou reconfigurables. Cette problématique fait d'ailleurs l'objet de plusieurs travaux de recherche ces dernières années. Ces approches visent à assurer la poursuite et la continuité des tâches pour lesquelles le système automatisé est conçu, tout en garantissant le bon fonctionnement.

Par définition, un système est tolérant aux défauts s'il reste fonctionnel après l'apparition d'un défaut. L'utilisation de systèmes de commande reconfigurables (tolérants aux défauts) est une solution prometteuse qui améliore les performances et la productivité du système et prend en charge l'interaction requise dans les systèmes de contrôle. La caractéristique principale d'un système de commande reconfigurable est l'aptitude de changer les caractéristiques de l'architecture de commande nominale pour s'adapter aux variations du processus contrôlé, tout en maintenant autant que possible la stabilité et les performances d'origine du système (Tahiri, 2020).

Dans n'importe quel système de diagnostic et en tenant compte des différents types de défaillance, un mode de défaillance est déterminé pour chaque fonction du système. Il est alors possible de confirmer la présence ou l'absence d'une solution technique, afin d'améliorer les options architecturales, et de remplacer tout composant défectueux, permettant également, dans la mesure du possible, de tolérer à certaines défaillances en autorisant un mode de fonctionnement dégradé conditionné.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux fonctionnements normal, défaillant et dégradé du système comme le montre la figure 1.8. Après avoir déterminé le défaut et basculé le système à un mode de fonctionnement défaillant, un mécanisme de reconfiguration peut être déclenché avant la réparation de l'élément défectueux. Ensuite, le système passe en mode de fonctionnement dégradé équivalent à un fonctionnement normal. Cette parité sera garantie par des informations temporisées pour pallier les éléments défectueux.

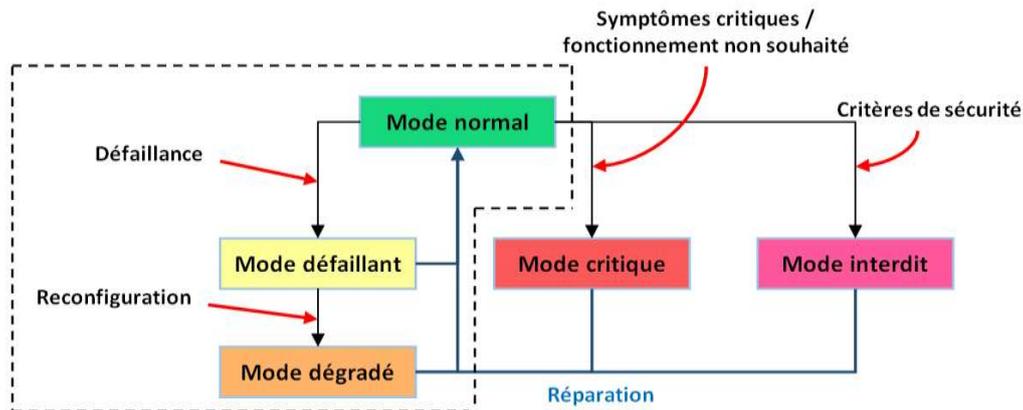


Figure 1.8 : Modes de fonctionnement d'un système automatisé de production.

1.7.3 Commande des systèmes automatisés

Le rôle d'un système automatisé de production est de transformer, sous certaines conditions un élément initial en élément final, afin que sa valeur, par rapport à certains critères, soit augmentée (Bonneval, 1993). L'utilisation de ces systèmes dans le milieu industriel doit répondre à des objectifs imposés et peut être sujette à des dysfonctionnements. La compétitivité à l'échelle mondiale nécessite que les systèmes automatisés de production soient de plus en plus efficaces en termes de conception et d'exploitation. Pour cela, les cadences de production doivent être augmentées, les temps de maintenance réduits et les systèmes flexibles pour s'adapter rapidement à la production de nouveaux produits. La productivité est liée entre autres à la qualité de la commande. Si celle-ci n'est pas sûre et robuste, elle peut entraîner des aléas de fonctionnement aux conséquences fâcheuses pour la sécurité des hommes et des équipements.

Un système automatisé de production doit réaliser une ou plusieurs fonctions dans un environnement précis et il est nécessaire de prendre en compte un ensemble de contraintes visant à assurer l'intégrité des biens et des personnes.

Ces contraintes, généralement décrites en termes de sécurité et d'écologie, sont imposées et définies par des normes (Azua et al., 2005). Celles-ci peuvent être très nombreuses, elles sont fortement dépendantes du procédé de fabrication utilisé et des matières d'œuvre utilisées (alimentaires, corrosives, explosives, ...).

- **Le rôle d'un automate programmable dans les systèmes automatisés industriels**

Quel que soit le type de système automatisé de production, il est souvent contrôlé par un automate programmable industriel (API). Un automate programmable industriel représente l'outil de base de l'automatisation des systèmes de production. Il permet de piloter un système de production conformément à un programme placé dans sa mémoire. Il est largement utilisée dans l'industrie grâce à leurs performances de sécurité et à leurs différents langages de programmation. Son rôle consiste donc à fournir des ordres à la partie opérative en vue d'exécuter un travail précis comme par exemple la sortie ou la rentrée d'une tige de vérin. Les automates programmables industriels sont apparus à la fin des années 1960, à la demande de l'industrie automobile américaine, ce qui nécessitait une plus grande adaptabilité de leur système de commande. Les coûts électroniques offrent une alternative utile aux technologies utilisées. La technologie utilisée auparavant était des systèmes câblés basés sur des relais électromécaniques et des systèmes pneumatiques et hydrauliques. Avec l'avènement des microprocesseurs et des systèmes programmables, les limitations résultant de l'utilisation de systèmes câblés sont devenues injustifiées (M'halla, 2010).

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte général associé aux systèmes automatisés. Tout d'abord, nous avons donné une définition d'un système automatisé et sa structure, suivie d'une présentation des différentes classes. Comme nous l'avons vu, la plupart des systèmes automatisés se comportent rarement de manière purement discrète ou purement continue, mais plutôt un mixte des deux. Ces systèmes dynamiques à double composante comportementale (dynamique continue et événementielle) sont appelés: Systèmes Dynamiques Hybrides (SDH).

Dans le chapitre suivant, nous focalisons l'étude sur ce type de systèmes en présentant un état de l'art des systèmes dynamiques hybrides et les outils de modélisation présentés dans la littérature.

CHAPITRE II

LES SYSTEMES DYNAMIQUES HYBRIDES :
PRESENTATION ET MODELISATION

2. Les systèmes dynamiques hybrides : présentation et modélisation

2.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, en raison du développement technologique associé à l'automatisation et à l'informatique, les systèmes industriels sont devenus très complexes et de plus en plus sophistiqués. Parallèlement, les industries ont beaucoup évolué grâce aux moyens de haute technologies appliqués dans les domaines de la gestion, de la surveillance et de la supervision. Contrairement, l'absence croissante d'intervention humaine directe et l'introduction de l'informatique industrielle dans l'industrie ont imposé de nouvelles méthodologies dans le développement et la conception des systèmes complexes.

Du point de vue de l'automaticien, les systèmes technologiques actuels sont composés de nombreux composants en interactions. Ils ont également des comportements dynamiques différents selon les conditions d'utilisation. Ces systèmes représentent des modèles dynamiques non linéaires qui sont souvent complexes à gérer et ils présentent une évolution à la fois continue et événementielle. Avec de telles structures, la dynamique de ces dernières nécessite de plus en plus des outils qui prennent en compte toutes les dynamiques, que les approches classiques ne peuvent suivre. Malheureusement, la séparation entre les deux dynamiques des systèmes continus et des systèmes à événement discret engendre de nouvelles problématiques de modélisation, d'analyse et de commande. En raison de la complexité de ces systèmes, souvent poussé l'automaticien à développer des nouvelles méthodes prenant en compte les aspects continus, à événements discrets, et de leurs interactions.

L'association d'un comportement continu avec un comportement discret nous conduit à de nouveaux concepts et de nouvelles approches en fusionnant les deux théories des approches dans une nouvelle classe de systèmes appelée "Système Dynamique Hybride". Pour la modélisation de systèmes dynamiques hybrides, il existe de nombreuses approches ; ce que toutes ces méthodes ont en commun, c'est que le développement continu est affecté par des événements discrets.

Le présent chapitre a pour objectif de présenter un état de l'art sur les systèmes dynamiques hybrides. Après une brève introduction sur les notions et définitions, les classes de phénomènes hybrides seront présentées. Ensuite, nous passons brièvement à un aperçu des outils de modélisation présentés dans la littérature.

2.2 Notions et définitions

Un système est défini comme un ensemble fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de manière à former une entité unique exerçant une activité clairement définie. Les méthodes de l'automatique sont articulées dans un passé récent à des méthodes fondées aux deux types de systèmes : les systèmes continus et les systèmes à événements discrets. Les méthodes mathématiques, telles que les équations différentielles, sont utilisées pour décrire l'état du système continu, tandis que les systèmes à événements discrets sont des systèmes dynamiques représentés par l'algèbre de Boole combinée à des formalismes états – transitions ayant une représentation graphique telle que les réseaux de Petri, et les automates à états finis, etc.

Les systèmes réels sont généralement des systèmes complexes et la majorité de ces systèmes sont un couplage de dynamiques continues et discrètes. De plus, l'interaction entre les deux aspects a rendu la modélisation plus difficile. Pour cela, la recherche de modèles capables de prendre en compte à la fois la dynamique continue et discrète ainsi que l'interaction entre ces deux dernières est devenue une nécessité. La figure suivante montre la structure mixte d'un système hybride.

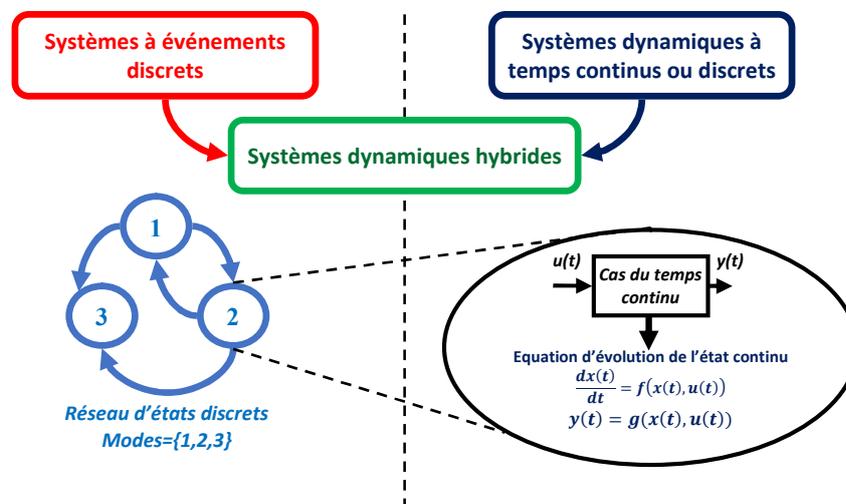


Figure 2.1 : Couplage continu-discret d'un système hybride.

Depuis les années quatre-vingt-dix, la communauté scientifique s'est intéressée à ces systèmes dits : "systèmes dynamiques hybrides" (Alur et al., 1995; Branicky, 1995; Gueguen et Lefebvre, 2001). Dans la littérature, nous avons rencontré plusieurs définitions des systèmes dynamiques hybrides, parmi lesquels :

Définition 2.1 :

Les SDH sont des systèmes dans lesquels les dynamiques discrètes et continues interagissent et où leur interaction détermine le comportement qualitatif et quantitatif de ces systèmes.

Définition 2.2 :

Les SDH sont des systèmes dynamiques faisant intervenir explicitement et simultanément des phénomènes ou des modèles de type dynamique continu et événementiel. Ces systèmes sont classiquement constitués de processus continus interagissant avec ou supervisé par des processus discrets. Ils résultent également de l'organisation hiérarchique des systèmes de contrôle/commande complexes.

2.3 Structure d'un système dynamique hybride

Généralement, un système dynamique hybride est une fusion entre deux comportements qui interagissent entre eux : un comportement continu et un autre événementiel. Ces deux derniers sont gérés avec une interface qui ordonne cette interconnexion (Antsaklis et al., 1993). Ce phénomène d'interaction entre ces deux comportements différents est appelé phénomène hybride. La structure générale d'un système dynamique hybride est représentée dans la figure 2.2. Chaque partie du SDH dispose des entrées (discrète σ , continue u) et des sorties (discrète Ψ , continue y), dont q et x représentent l'état discret et l'état continu respectivement.

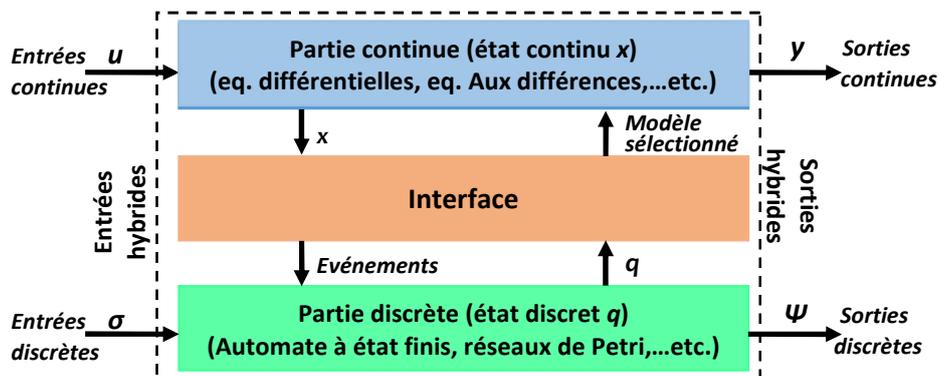


Figure 2.2 : Interaction entre la partie continue et la partie discrète d'un SDH.

2.3.1 La partie continue

La partie continue est déterminée par un ensemble de modèles mathématiques continues qui décrivent la dynamique d'un système réel telles que la vitesse, la température d'un objet ou le niveau d'un réservoir, par exemple. La représentation de l'évolution de la partie continue est caractérisée par un espace de temps continu et peut être représentée de différentes manières. Les modèles les plus utilisés sont : ceux à base d'équations différentielles ou aux différences, les fonctions de transfert (De Larminat, 1993), les équations algébro-différentielles et les bond-graph (Vergé et Jaume, 2003), (Bouamama et al., 2006), (De Larminat, 1993),...etc.

2.3.2 La partie discrète

L'état discret d'un système dynamique hybride est représenté par un système à événement discret dont l'évolution est un ensemble discret fini. Les transitions entre les états discrets sont effectuées instantanément grâce à l'occurrence des événements discrets internes ou externes tels que les instructions traitées par un processeur ou interrupteur ouvert ou fermé. Ces événements sont de deux types : événements contrôlés et événements autonomes.

Dans la littérature, les Réseaux de Petri (RdP) (David et Alla, 1994) et les automates à états finis (Ramadge et Wonham, 1987) sont les modèles les plus représentatifs des SEDs.

2.3.3 L'interface entre la partie continue et la partie discrète

L'interface exprime l'interaction entre la partie continue et la partie discrète du système dynamique hybride et vice-versa. L'état discret q joue un rôle essentiel pour la dynamique continue de la partie continue du SDH (Antsaklis et al., 1993). Par ailleurs, les signaux provenant de la partie continue permettent d'assurer et déterminer les événements autorisant les transitions de l'état discret d'une situation à une autre par l'intermédiaire des lois de l'interface. Ce phénomène d'interaction entre les dynamiques de ces deux parties discrète et continue est appelée phénomène Hybride. Le phénomène hybride peut apparaître habituellement par des commutations entre les modèles de la partie continue ou par des discontinuités apparaissant sur le vecteur d'état. Dans le cas d'interaction autonome, le phénomène hybride est généralement déclenché lorsque les variables continues atteignent des seuils ou des conditions de commutation spécifiques. Contrairement, si le système à événements discrets est affecté par une commande discrète extérieure on parle de l'interaction contrôlée.

2.4 Classes de systèmes dynamiques hybrides

Les systèmes dynamiques hybrides ont attiré l'attention des chercheurs ces dernières décennies. Ainsi, de nombreuses classes ont été apparues dans la littérature parmi lesquels on trouve : les systèmes à commutations (Bourdais et al., 2007), les SDH impulsifs (Haddad et al., 2006) et les SDH stochastiques (Boukas, 2007).

Pour plus de détails le lecteur pourra se référer à les ouvrages (Janan, 2001), (Lygeros et al., 2003) et la thèse (Belkhiat, 2011a). Dans ce qui suit, nous citons brièvement les différentes classes de SDH.

2.4.1 Systèmes à commutations

Les systèmes à commutations représentent une classe spéciale des SDHs largement rencontrées dans la littérature. Ces systèmes sont composés d'un ensemble de variables continues des sous-systèmes et une loi logique qui gère la commutation entre eux. D'un point de vue mathématique, les sous-systèmes sont représentés par des équations différentielles.

Un exemple de ces systèmes à commutation est le thermostat, où l'objectif est de maintenir une température prédéfinie. Les systèmes à commutation sont les plus utilisés par les automaticiens en raison de leurs avantages de modéliser une large gamme de systèmes physiques. La dynamique continue d'un système à commutation est donnée par la formule :

$$\dot{x} = f_{q(t)}(t, x(t), u(t)) \quad (2.1)$$

Où $x(t) \in R^n$ représente l'état du système, $u(t) \in R^m$ la commande, $q(t)$ est l'indice du mode de fonctionnement actif à l'instant t et $f_i(.,.,.), \forall i \in I$ sont des champs de vecteurs décrivant les différents régimes de fonctionnement du système.

Dans la littérature, nous trouvons plusieurs types de systèmes dynamiques hybrides appartenant à cette catégorie. parmi lesquels nous citons les systèmes à commutations dépendant de l'état, les systèmes à commutations dépendant du temps et les systèmes à commutations mixtes (Hamdi, 2010) et (Lunze et Lamnabhi-Lagarrigue, 2009).

2.4.2 Systèmes linéaires par morceaux

Les systèmes linéaires par morceaux sont utilisés dans plusieurs problèmes d'ingénierie, comme une procédure de modélisation de systèmes non linéaires. En électronique, par exemple, les modèles de composants sont généralement linéaires par morceaux. On peut

considérer cette classe un cas particulier de systèmes hybrides, où les dynamiques continues sont linéaires et l'état discret est régi par des transitions du type invariant (Johansson, 2003), (Juloski, 2004).

2.4.3 Systèmes impulsionnels (Systèmes à sauts)

Un système dynamique impulsionnel ou à saut est un système dynamique hybride décrit l'évolution d'une variable continue autonome où l'état discret régi par des entrées externes non contrôlables. Les systèmes dynamiques impulsionnels possèdent un seul mode $Q = \{q_i\}$ et une transition unique $\Gamma = (q_0, q_0)$ de type transition de commutation. Via une fonction reset $R(\Gamma, x)$, la transition permet de réinitialiser la dynamique continue du système.

2.5 Modélisation des SDH

En raison de la propagation rapide des SDH au cours de ces dernières années, l'obtention d'un modèle formel combinant à la fois des aspects continus et discrets est devenue une nécessité. Par ailleurs, l'interaction entre la dynamique continue et discrète représente une difficulté pour trouver une représentation commune. Alors, Il apparaît clairement que ces systèmes ne peuvent se contenter d'une présentation homogène avec une dynamique totalement continue ou totalement événementielle. En général, les approches de modélisation des systèmes dynamiques hybrides peuvent être résumées en trois classes principales: les approches issues de l'automatique continue, les approches issues des systèmes à événements discrets (SED) et les approches mixtes (Janan, 2001).

2.5.1 Approches basées sur une extension des modèles continus

Dans ces approches, le comportement des procédés est considéré comme un système continu comportant des discontinuités, ce qui signifie en introduisant des variables entières dans la dynamique continue. La modélisation par bond-graph peut être catégorisée dans ces approches (Buisson et Cormerais, 1998).

2.5.2 Approches basées sur une extension des modèles discrets

Les approches basées sur une extension des modèles discrets sont des approches représentent les phénomènes continus via un ensemble fini des états discrets. Un exemple type de cette extension, les réseaux de Petri hybride. Ces derniers sont développés en ajoutant des places et des transitions qui permettent la modélisation de phénomènes continus.

L'inconvénient majeur de ces deux approches de modélisation est l'inefficacité de représenter à la fois les deux aspects continus et discrets.

2.5.3 Approches mixtes

Les approches dites mixtes reposent sur la collaboration de deux approches discrètes dans le même formalisme de modélisation, l'un pour l'aspect événementiel, et l'autre pour l'aspect continu. Différents modèles mixtes ont été définis dans la littérature, tels que les réseaux de Petri mixte (Vibert et al., 1997), les réseaux de Petri prédicats-transitions différentiels (Champagnat, 1998) et les réseaux de Petri différentiels (Hamdi et al., 2009). Le modèle mixte est celui des automates hybrides (Lygeros et al., 2003).

2.6 Outils de modélisation des Systèmes Dynamiques Hybrides

Dans ce qui suit, nous présentons quelques outils de modélisation des systèmes dynamiques hybrides qui appartient à la classe des approches mixtes rencontrées dans la littérature.

2.6.1 Automate hybride

Les auteurs dans (Alur et al., 1993) définissent l'automate hybride comme une extension d'un automate à état fini. Les automates hybrides représentent des systèmes qui intègrent deux composantes :

- Une composante continue est représentée par un système d'équations algébriques ou différentielles.
- Une composante discrète représentée par un automate à états finis.

Un automate hybride évolue avec un pas continu, où les variables d'état et le temps évoluent de façon continue, et de pas discrets où plusieurs transitions discrètes et instantanées peuvent être franchies.

De façon générale, un automate hybride comme un automate à états fini pilotant un ensemble d'équations différentielles modélisant la dynamique continue du système. L'état de l'automate change instantanément pour deux raisons, un changement dû à l'occurrence d'un événement discret ou un autre si les variables d'états confirment les conditions logiques qui leurs sont associées.

Définition 2.3 :

Un automate hybride est un sextuple $AH = (Q, X, E, \delta, F, Inv)$ tels que :

- $Q = \{q_1, q_2, \dots\}$ est un ensemble fini de sommets ;
- $X \in \mathfrak{R}^n$ est un vecteur d'état comportant n variables réelles ;
- E est un ensemble fini d'événements ;
- δ est un ensemble fini de transitions, chaque transition est un quintuple $T = (q, a, g, init, q')$ tel que :
 - $q \in Q$ est le sommet source ;
 - $a \in E$ est un événement associé à la transition T ;
 - g est la garde de la transition T , c'est un prédicat sur X ; la transition T ne peut être franchie que si sa garde g est vérifiée;
 - $init$ est la fonction de réinitialisation qui affecte une expression aux variables continues quand la transition T est franchie;
 - $q' \in Q$ est le sommet but;
- F est une fonction qui associe à chaque sommet q une fonction continue f_q qui représente l'évolution dynamique du vecteur d'état dans le sommet ;
- Inv est une fonction qui associe à chaque sommet q , un prédicat $Inv(q)$, qui doit être vérifié par les valeurs des variables continues lors du séjour de l'automate dans le sommet q .

L'avantage de cette représentation avec l'automate hybride est sa simplicité. Décrivant sans ambiguïté les évolutions possibles d'un SDH, elle sera à la base de l'analyse en vue d'établir des propriétés formelles. À chaque instant, un seul état discret est actif, donc il n'y a qu'un seul jeu d'équations (un seul modèle continu). Le caractère hybride se marque par le fait qu'un événement discret peut entraîner le changement d'état, donc la commutation du jeu d'équations. L'atteinte d'une valeur seuil sur une variable continue peut aussi entraîner un changement d'état discret.

Exemple 2.1 :

Soit l'automate illustré par la figure 2.3. Ce dernier modélise un système dynamique hybride. Cette modélisation représente l'évolution continue par des équations différentielles qui sont associées aux sommets du graphe et l'évolution événementielle est représentée par les arcs étiquetés du graphe. Les sommets « Arrêt » et « Marche » représentent les états discrets du système où l'évolution continue a lieu. Les prédicats $x \in [1, 9]$ et $x \in [10, 50]$

sur les arcs traduisent les conditions, dites aussi gardes, pour l'occurrence respective des événements Stopper et Démarrer. Les prédicats $x \leq 9$ et $x \leq 50$ dans les sommets représentent les invariants de l'automate, c'est-à-dire des conditions imposées aux variables continues du système pour rester dans un sommet discret (ici les états Arrêt ou Marche).

L'initialisation du système est représentée par l'arc d'entrée dans le sommet « Arrêt ». L'étiquette de cet arc $x := [1, 6]$ et $y := 0$ représente l'état initial des variables continues et correspond à une affectation des variables, c'est à partir de cette région que la dynamique du système hybride démarre. Les variables x et y évoluent dans le sommet « Arrêt », respectivement le sommet « Marche », conformément aux équations différentielles, appelées conditions de flux ou les dynamiques (Karoui, 2011).

Nous pouvons conclure qu'un automate hybride évolue par une alternance de pas continus, où les variables continues et le temps évoluent de façon continue, et de pas discrets, où plusieurs transitions discrètes et instantanées peuvent être franchies.

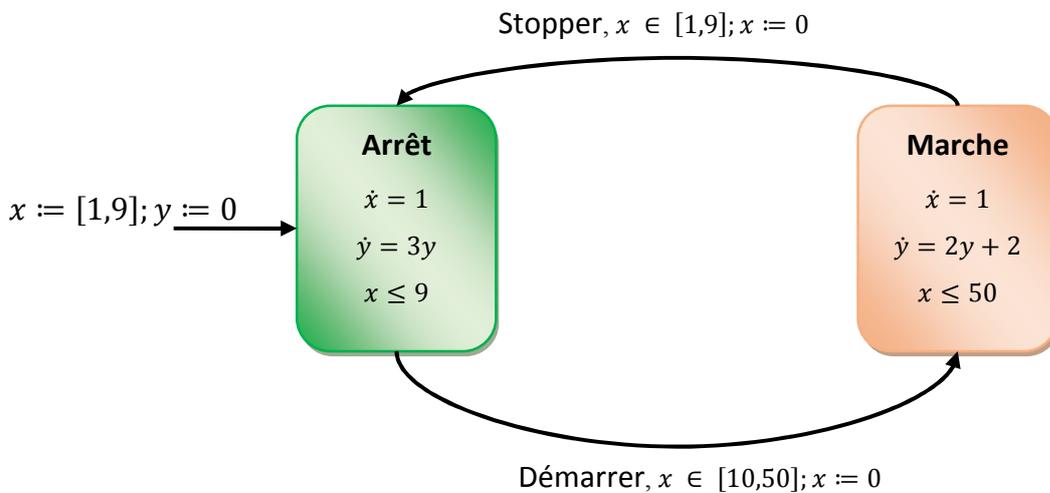


Figure 2.3 : Automate hybride.

2.6.1.1 Les sous-classes d'automates hybrides

Plusieurs sous-classes du modèle automate hybride ont été développées dans la littérature. Ces sous classes ont été étudiées afin de simplifier les dynamiques du modèle initial. Parmi les modèles proposés, nous citons : les automates hybrides linéaires et les automates hybrides rectangulaires.

a) Les automates hybrides linéaires

D'une façon générale, un automate hybride est dit linéaire si les conditions de flux, les gardes et les invariants sont définis par des expressions linéaires sur l'ensemble des variables. Dans ce cas, les conditions de flux sont du type « $\dot{x} =$ » et les invariants et gardes sont du type « $x \sim c$ » où x est une variable, $c \in \mathbb{Z}$ et $\sim \in \{<, \leq, =, \geq, >\}$ (Alur et al., 1993). La figure suivante représente un exemple d'un automate hybride linéaire.

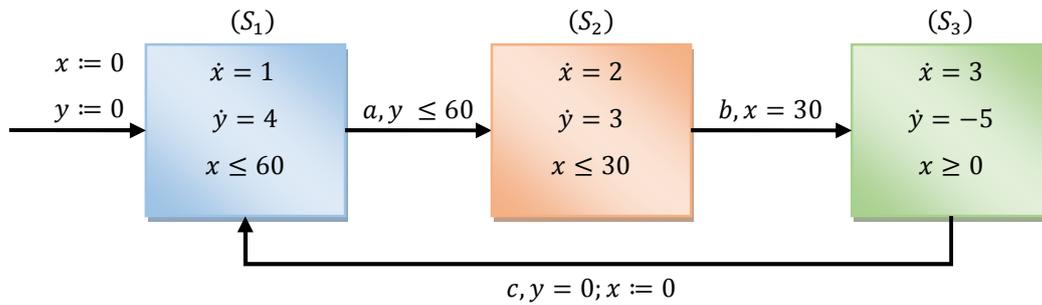


Figure 2.4 : Exemple d'un automate hybride linéaire.

b) Les automates hybrides rectangulaires

Les automates hybrides rectangulaires (Kopke, 1996), (Henzinger et al., 1998) représentent une plus grande classe que les automates hybrides linéaires. L'automate hybride rectangulaire se différencie de l'automate hybride linéaire dans le fait que dans chaque mode de contrôle d'un automate rectangulaire, la dérivée première de chaque variable est donnée dans un intervalle de valeurs possibles et cet intervalle change avec les commutations de contrôle.

En résumé, dans un automate hybride rectangulaire, la condition de flux dans ce modèle est définie sous la forme de prédicats rectangulaires de la forme $\dot{x} \in [a, b]$, pour chaque variable x du modèle. De même, les invariants, les gardes, la condition initiale sont décrits par des prédicats rectangulaires (Figure 2.5).

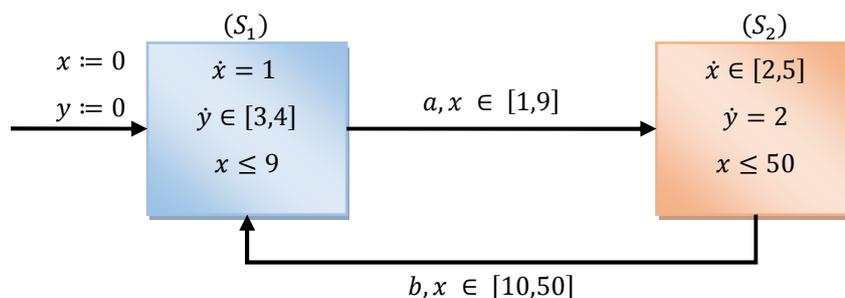


Figure 2.5 : Exemple d'automate hybride rectangulaire.

c) Les automates hybrides rectangulaires initialisés

Un automate hybride rectangulaire initialisé (Henzinger et al., 1998) représente une sous classe très intéressante des automates hybrides rectangulaires. Dans ce modèle, chaque variable qui change de condition de flux, suite au franchissement d'une transition entre deux sommets, doit être réinitialisée.

2.6.2 Réseaux de Petri hybrides

Les réseaux de Petri sont largement utilisés pour modéliser, analyser et synthétiser des systèmes d'événements discrets. Une extension de ces réseaux, a été introduite dans (Le Bail et al, 1991) appelée réseaux de Petri hybrides. Les réseaux de Petri hybrides permettent de modéliser les systèmes dynamiques hybrides en combinant des places et des transitions discrètes (D-places et D-transitions) et autres continues (C-places et C-transitions).

Exemple 2.2 :

Un réseau de Petri hybride pour l'exemple d'un système de fabrication produisant des pièces par lots de cinq, est illustré à la figure 2.6. Après avoir terminé la production de deux lots de cinq pièces, un nouveau cycle de production est entamé.

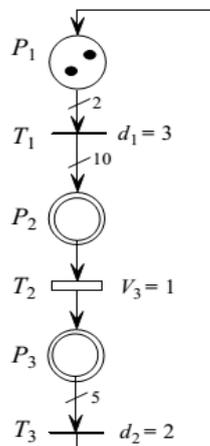


Figure 2.6 : Modèle de réseau de Petri hybride d'un système de fabrication par lots.

Le marquage de la place P_1 (D-place) est associé au nombre de lots à l'entrée du système de fabrication. Les deux valeurs d_1 et d_2 représentent les temps de chargement et de déchargement des pièces (D-transitions), respectivement. La transition T_3 modélise une machine dont la vitesse de production est V_3 (C-transition). Les places P_2 et P_3 représentent les stocks d'entrée et de sortie de la machine, respectivement (C-places). Le franchissement continu de la transition T_3 correspond à une production continue à la vitesse V_3 quand la place

P_2 n'est pas vide. Lorsque P_2 est marqué, le franchissement d'une quantité $V_3 dt$ de T_3 correspond au retrait de $V_3 dt$ marqué à P_2 et à l'ajout de la même quantité à P_3 .

De façon générale, l'inconvénient majeur d'utiliser des modèles de réseaux de Petri hybride en modélisation est que ces derniers ne représentent pas l'influence vice-versa des deux parties du SDH en même temps, soit l'influence de la partie discrète sur la partie continue soit celle-ci la continue sur la partie discrète.

2.6.3 Bond-graph hybrides

Le Bond-graph est un outil de description graphique d'un système dynamique physique basé sur l'analogie et l'échange de puissance énergétique capable de modéliser avec un seul langage les systèmes, indépendamment de leur nature physique.

L'outil bond graph est utilisé premièrement pour modéliser des systèmes physiques. Cet outil de modélisation basée sur deux grands principes : la représentation graphique des échanges de puissance au sein d'un système et l'analogie entre les variables de différents domaines physiques.

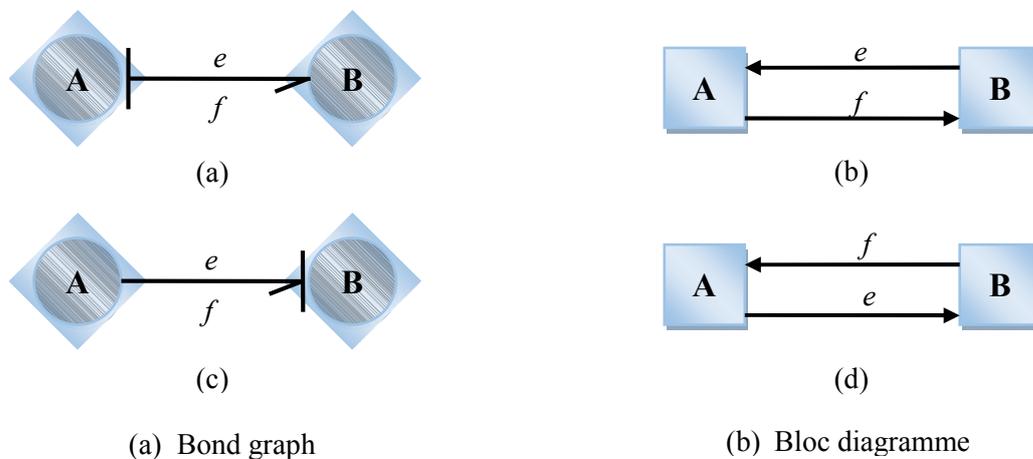


Figure 2.7 : Modèle bond graph causal et bloc diagramme.

Le Bond-graph hybride (Roychoudhury et al., 2011), est une description graphique d'un système dynamique physique avec discontinuités. Similaire à un bond-graph régulier, il s'agit d'une technique basée sur l'énergie. L'échange de puissance entre deux éléments d'un système est représenté comme indique la figure 2.7 par une demi-flèche appelée lien ou bond qui porte deux variables dites variables de puissance, appelées effort et flux et dont le produit représente la puissance instantanée transportée par ce lien. Le sens de la demi-flèche montre le sens de la puissance échangée.

2.7 Conclusion

Un système dynamique hybride est un système qui combine deux parties : une partie continue et une autre discrète. Ce type de système a reçu beaucoup d'attention ces dernières années, c'est pourquoi les chercheurs ont proposé plusieurs formalismes pour créer un modèle homogène permettant de modéliser l'interaction entre les deux parties discrètes et continues.

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans un premier temps la structure générale d'un système dynamique hybride. Nous avons aussi passé en revue les différentes classes de ces systèmes considérées dans la littérature. Suivi des principales approches de modélisation des systèmes dynamiques hybrides. Parmi ces approches, nous trouvons l'approche de modélisation mixte est celle qui considère qu'une structure commune englobe à la fois des comportements continus et événementiels. La technique de modélisation reposant sur une approche mixte est plus générale dont l'avantage principal est sa généralité, car elle ne fait pas d'hypothèse sur le type de systèmes à modéliser.

Pour compléter notre étude, nous avons inclus les différents outils de modélisation de l'approche mixte. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur l'approche de modélisation par un automate hybride qui fera l'objet de modélisation des systèmes dynamiques hybrides.

CHAPITRE III

CONCEPTS ET PRINCIPE
DE LA SURVEILLANCE INDUSTRIELLE

3. Concepts et principe de la surveillance industrielle

3.1 Introduction

La surveillance des systèmes dynamiques reçoit beaucoup d'attention et est devenue un sujet d'actualité dans la recherche scientifique et industrielle en raison de la complexité et des coûts croissants des interventions de maintenance. Le principe de base de surveillance des systèmes est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière. Dans d'autre terme, la surveillance est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux selon le principe de comparaison d'informations caractéristiques de l'état courant du système à celles établies en l'absence de défauts.

Afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des systèmes, la recherche de méthodes de diagnostic, pour détecter et localiser les défauts potentiels, est une nécessité urgente en raison de la grande complexité de ces systèmes industriels. Dans ce contexte, nous proposons une synthèse de l'état de l'art sur le diagnostic des systèmes automatisés.

L'objectif de ce chapitre est de voir globalement le domaine de la surveillance et du diagnostic des défauts. Dans un premier temps, nous présenterons les concepts de base liés à la surveillance et au diagnostic à travers la revue de quelques terminologies. Ensuite, nous présentons un état de l'art qui représente une classification non exhaustive des méthodes rencontrées dans la littérature. Ces méthodes de diagnostic peuvent être classées en deux grandes familles : les approches à base de modèles et les approches sans modèles.

3.2 Définitions et terminologies

Dans un premier temps, il est intéressant de rappeler les principales définitions et terminologies conformes aux normes internationales utilisées dans la suite de cette thèse. Elles reposent notamment sur les travaux effectués dans les références suivantes : (Milne, 1987), (Villemeur, 1988), (Combacau, 1991), (Toguyeni, 1992), (Isermann et Balle, 1997), (Isermann et Ballé, 2000), (Zemouri, 2003) et (Philippot, 2006).

- **Défaut** : Le terme défaut est défini comme une anomalie comportementale au sein d'un système physique situé au niveau d'un composant. En général, toute déviation non permise d'au moins une propriété caractéristique ou d'un paramètre du système par rapport au comportement nominal est considérée comme un défaut.
- **Défaillance** : Une défaillance est une anomalie, une altération ou une interruption de la capacité du système à assurer une fonction requise, dans des conditions opérationnelles spécifiques.
- **Panne** : C'est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. La conséquence d'une défaillance, c'est l'interruption permanente d'une capacité du système pour effectuer une fonction requise dans des conditions de fonctionnement spécifiées et pouvant provoquer son arrêt complet. Une panne résulte toujours d'une défaillance, qui oblige l'exploitant de faire une procédure d'arrêt d'équipement.
- **Dégradation** : Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement. La dégradation peut aboutir à une défaillance, quand les performances du système sont en dessous d'un seuil d'arrêt défini par les spécifications fonctionnelles.
- **Perturbation** : On peut définir une perturbation comme une entrée inconnue du système et qui n'est pas une commande, c'est une entrée non contrôlée.
- **Modèle** : Un modèle d'un système physique est une description de sa structure et une représentation comportementale ou fonctionnelle de chacun de ses composants. Le modèle contient toute l'information relative à un système physique, il est utilisable ensuite par la procédure de la surveillance.
- **Résidu** : Un résidu est souvent appelé indicateur de défaut ou variable d'écart, parce qu'il est basé sur l'écart entre les mesures et leurs estimations. Autrement dit, le résidu est une grandeur caractérisant l'écart produit par la comparaison entre le comportement réel et le comportement nominal du système.
- **Détection** : C'est l'opération qui permet de caractériser le fonctionnement du système de normal ou d'anormal, c'est-à-dire, la détermination de la présence de défauts. La fonction de détection détermine la présence ou non du défaut ainsi que l'instant de leurs occurrences. La qualité de la détection est établie en comptabilisant les taux de fausses alarmes et de non-détection.

- **Localisation** : C'est la détermination des éléments défaillants. Cette opération vient systématiquement après l'opération de détection de défaut.
- **Identification** : C'est la détermination des caractéristiques des défauts qui se produisent en précisant le type, l'emplacement et l'instant de défaut.
- **Décision** : La démarche de décision mène à définir des limites qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une fausse alarme ou une non-détection. Si le défaut est tolérable, le processus continue son fonctionnement. Si le défaut est conditionnellement tolérable, alors le processus continuera à fonctionner, mais en mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée.

3.3 De la surveillance à la supervision

Chaque système commandé doit être équipé d'un système de surveillance afin d'alerter l'opérateur lors de l'occurrence de défauts. Les informations du diagnostic établi seront ensuite remontées pour que le superviseur puisse prendre la décision de maintenir le bon fonctionnement ou bien l'arrêt du système commandé. Par définition, la supervision représente la surveillance d'un système physique et la prise de décision appropriée en vue de maintenir son fonctionnement face à des défaillances. Donc, c'est une macro-fonction regroupant des tâches de commande et de surveillance.

Le rôle principal de la supervision est de contrôler l'effet de la commande sur le processus. Il s'agit de vérifier le fonctionnement normal du procédé. Sinon, il agit au moins pour éviter les dommages sur l'installation, limiter les arrêts intempestifs et, dans le meilleur des cas, garantir la continuité de la production. La supervision doit piloter l'exécution de la séquence d'opération et assurer la gestion et la commande en temps réel des ressources nécessaires à cette exécution, et ceci quel que soit le fonctionnement du système normal ou en présence d'une défaillance :

- en fonctionnement normal elle doit surveiller et contrôler le déroulement des opérations.
- en dysfonctionnement, la supervision doit prendre les décisions nécessaires pour assurer un retour vers le comportement normal (Combacau et al., 2000b).

3.3.1 Fonctions de la supervision

Bien que le mot supervision soit largement utilisé par la communauté de l'automatisation, il peut encore être difficile de trouver une définition sur laquelle tout le

monde peut s'entendre. Pour bien superviser le processus, il est essentiel d'identifier toutes les étapes qu'il pourrait inclure. Dans ce contexte, la littérature a proposé plusieurs propositions. À titre d'exemple, (Breuker et Van de Velde, 1994) ont fourni une large perspective en suggérant que les étapes de supervision se succèdent dans une chaîne de planification, de prédiction, de surveillance, de diagnostic et d'attribution de tâches pour le contrôle et la manipulation des dispositifs. Néanmoins, il existe quelques endroits infaisables en ligne (Mnassri, 2012).

De plus, une représentation plus distincte en proposant une supervision dite globale composée de huit étapes fondamentales qui sont : le diagnostic, la surveillance, le pronostic, la planification, l'évaluation d'état, la validation des données, l'interface HMI et le mode de fonctionnement. Cette représentation est présentée dans (Acosta et al., 2001).

La figure 3.1 présente un diagramme récapitulatif qui retrace les étapes clés de la supervision du processus. Malgré la variété des propositions, la supervision prend souvent en compte trois phases principales :

- la surveillance,
- le diagnostic,
- la reconfiguration (la prise de décision).

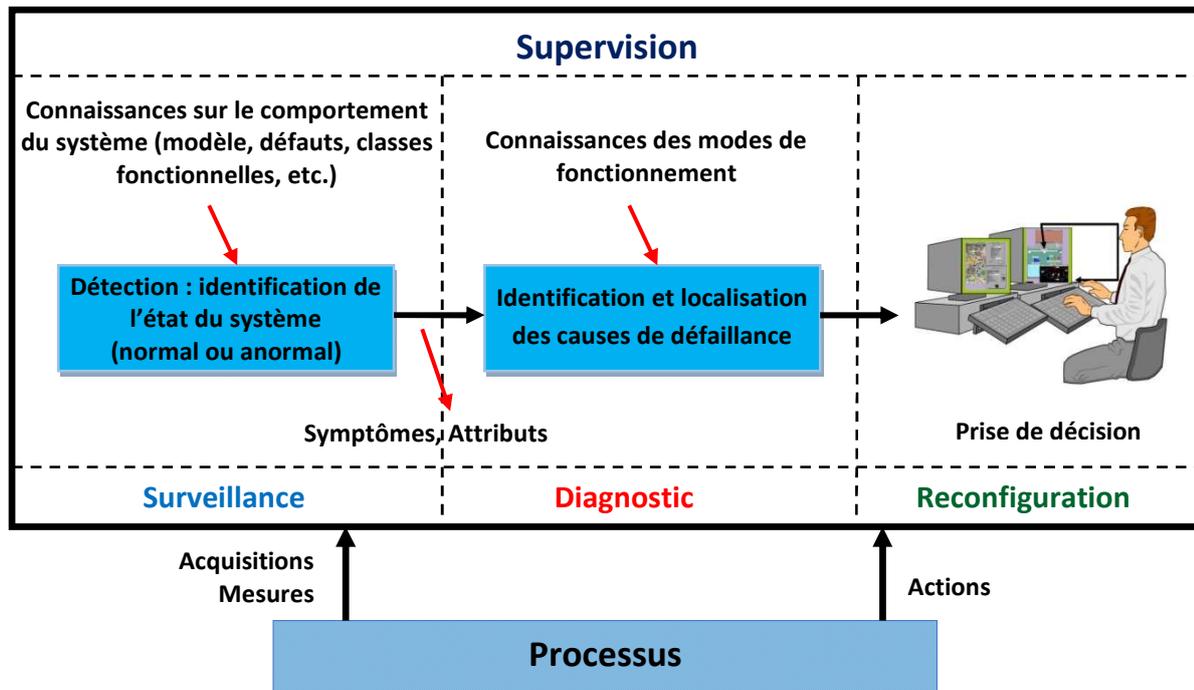


Figure 3.1 : Les principales étapes de la supervision.

Ces étapes peuvent être réalisées par des algorithmes (machines) ainsi que par un ou plusieurs opérateurs. La phase de surveillance traite les données collectées en ligne afin d'obtenir l'état de fonctionnement du processus. En cas d'anomalies, le diagnostic consiste à estimer leurs causes afin que des actions correctives (reconfiguration) puissent être prises.

3.3.1.1 Surveillance

A partir des informations délivrées par les capteurs, un système de surveillance des processus industriels consiste à générer des alarmes dont l'objectif est d'attirer l'attention du superviseur sur l'apparition d'un ou plusieurs événements susceptibles d'affecter le bon fonctionnement du système. Par définition, la surveillance est une tâche continue en temps réel déterminant les conditions possibles d'un système physique, tout en reconnaissant et en indiquant des anomalies du comportement. Un système de surveillance peut détecter les défaillances en observant l'évolution du système, puis les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et enfin identifier les causes premières. On peut distinguer deux fonctions principales en surveillance qui sont : la détection et le diagnostic.

Le principe de base de surveillance des systèmes est de détecter les comportements qui diffèrent du fonctionnement normal. Une approche traditionnelle de la surveillance des défauts dans le contexte d'application plus large est basée sur des méthodes de redondance matérielle ou physique qui utilisent plusieurs capteurs, actionneurs, composants pour mesurer et contrôler une variable particulière.

De manière générale, les méthodes de surveillance peuvent être classées en deux classes : méthodes reposent sur un modèle décrivant le comportement du système à surveiller et méthodes qui ne prennent en compte que les données issues du processus permettent de définir son mode de fonctionnement. Face à la complexité des grands systèmes, en particulier, la surveillance doit être robuste vis-à-vis des incertitudes et des erreurs qui entachent les modèles et les données. Le rôle de la surveillance est de surveiller les changements de comportement du système et de collecter des informations pertinentes pour la prise de décision en cas de présence d'une défaillance.

Basé sur l'analyse en temps réel des données collectées en ligne, la surveillance nécessite donc une prise de décision rapide et implique donc que le facteur temps doit être pris en compte. La fonction de surveillance conserve en permanence un historique des traitements effectués ainsi que les événements observés par la supervision. En plus de

l'acquisition de données, la deuxième fonction qui est la détection consiste essentiellement à révéler la présence d'un défaut. Ceci implique qu'une telle fonction permet de déterminer la normalité ou l'anormalité du fonctionnement de processus. En outre, elle peut être également révélatrice du moment de l'apparition de l'événement défectueux (Isermann et Balle, 1997).

3.3.1.2 Diagnostic de défauts

Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision dont l'objectif est de localiser les composants ou les organes défectueux d'un procédé et éventuellement de déterminer les causes. Donc, c'est un système d'aide à la décision. Dans cette étape, un modèle de dysfonctionnement est utilisé selon la même logique pour préciser la défaillance présente, c'est la localisation des défaillances. Cette étape est déclenchée quand la comparaison ne correspond pas à un état de fonctionnement normal caractérisé par un état de référence et que la démarche de décision a montré que c'est une alarme vraie. Lorsque le défaut est localisé, alors il faut identifier les causes exactes de cette anomalie. Alors on fait intervenir des signatures répertoriées par les experts et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements.

De façon générale, les défauts dans les processus automatisés causent des réactions indésirables et même l'arrêt du système commandé et les conséquences pourraient causer des dégâts aux parties techniques du système, au personnel ou à l'environnement. Pour cela, il faut diagnostiquer le système c'est-à-dire, trouver les composants défectueux. Le mot diagnostic possède de nombreuses significations dans la littérature. En effet, étymologiquement, ce mot vient du grecque et signifie (Dia : par, Gnosis : connaissance).

Une autre définition considère le diagnostic comme un problème de reconnaissance de formes. L'ensemble des états est homologue à un ensemble de classes et le vecteur forme est le vecteur composé par les paramètres observés du système. Cette définition s'applique à de nombreuses applications de diagnostic dans lesquelles le diagnostic est réalisé par des méthodes de reconnaissance de formes (Dubuisson, 2001). Nous nous intéressons à la définition technique, c'est-à-dire le diagnostic industriel. Suivant la norme AFNOR, le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test (AFNOR, 2010). Cette dernière définition résume deux tâches principales : observer les symptômes de la défaillance et identifier la cause à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations (Zwingelstein, 1995).

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière. Dans d'autres termes, le diagnostic est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux selon le principe de comparaison d'informations caractéristiques de l'état courant du système à celles établies en l'absence de défauts (Achbi, 2012).

3.3.1.3 Reconfiguration (la prise de décision)

Les systèmes d'aide à la décision, d'une part, devraient aider les opérateurs à prendre rapidement des décisions face à des situations anormales, telles que la décision de démarrer ou d'arrêter un système ou des sous-systèmes ou de reconfigurer le système, ou changer les objectifs initiaux du système. D'autre part, ces systèmes devraient aider l'opérateur à prendre des décisions concernant les politiques de maintenance pour divers équipements.

Les opérateurs qualifiés connaissent généralement la décision appropriée à prendre après l'apparition d'un défaut. Le but du système de supervision intelligent est d'aider les opérateurs, dans des situations critiques, à analyser un processus que l'automatisation a rendu de plus en plus complexe, mais le but n'est pas de le dispenser de tâches décisionnelles.

Dans quelques cas, même l'opérateur le plus expérimenté et le plus qualifié commet des erreurs en prenant de mauvaises décisions, cette situation est due à la fatigue de l'opérateur, au nombre écrasant d'alarmes se produisant en même temps et l'opérateur est incapable de gérer ou simplement par une mauvaise interprétation de sa part.

Donc, le système d'aide aux opérateurs pour la supervision devrait fournir des outils utiles d'aide à la décision. Autrement dit, des outils qui servent de support dans le processus naturel de résolution de problèmes à l'opérateur. À cet égard, l'opérateur humain traite l'information à travers une série d'activités cognitives (Garcia-Beltran, 2004).

3.3.2 Classification des défauts

Un défaut peut être défini comme un écart, indésirable, à partir d'au moins une caractéristique ou propriété d'un paramètre du système. Un défaut peut apparaître à différents endroits du système et son apparition peut entraîner des dysfonctionnements ou une perte totale du système. Plusieurs classes de défauts sont décrites dans la littérature, chacune étant basée sur un critère donné.

3.3.3 Selon l'emplacement d'occurrence

Selon l'emplacement d'occurrence, trois types de défauts peuvent être distingués dans la littérature (Methnani, 2012) et (Jain et al., 2018).

a) Les défauts actionneurs : L'actionneur est un élément de la partie opérative d'un système capable de produire un phénomène physique à partir de l'énergie qu'il reçoit. En conséquence, un défaut actionneur est une défaillance peut causer une perte totale ou partielle de l'actionneur et détériore le signal d'entrée du système. Une partie du système devient non commandable et de nouveaux actionneurs doivent être utilisés.

b) Les défauts capteurs : Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable souvent électrique. Il est essentiellement une interface de sortie d'un système avec l'environnement extérieur et permet de communiquer les informations concernant l'état et le comportement interne du processus. Un défaut capteur peut aussi être partiel ou total. Ainsi, un défaut capteur caractérise une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer. Un capteur totalement défectueux donne une information qui ne correspond pas du tout à la vraie valeur de la variable à mesurer, alors qu'un défaut capteur partiel produit un signal avec plus au moins d'adéquation avec la valeur vraie de la variable à mesurer. Ceci peut se traduire par une réduction de la valeur affichée par rapport à la valeur vraie, ou de la présence d'un biais ou de bruit accru empêchant une bonne lecture. Pour les systèmes en boucle fermée, les mesures issues de ces capteurs sont utilisées pour la génération du signal de commande.

Par conséquent, la présence d'un défaut capteur donne un signal de commande inexacte et inefficace. Une des solutions pour augmenter la tolérance aux défauts capteurs est de dupliquer les capteurs (redondance matérielle). Cette approche entraîne un coût important en instrumentation mais s'avère extrêmement fiable et simple à implanter.

c) Les défauts système : Ces défauts sont des défauts qui affectent les composants du système lui-même. De même, tous les défauts n'appartenant pas à la catégorie des défauts actionneurs ou défauts capteurs peuvent être considérés comme des défauts système. Ce type de défaut provoque un changement dans la dynamique du système suivant un changement de ces paramètres. En raison de la diversité des situations de défaillance, ce type de défaut est le plus difficile à diagnostiquer.

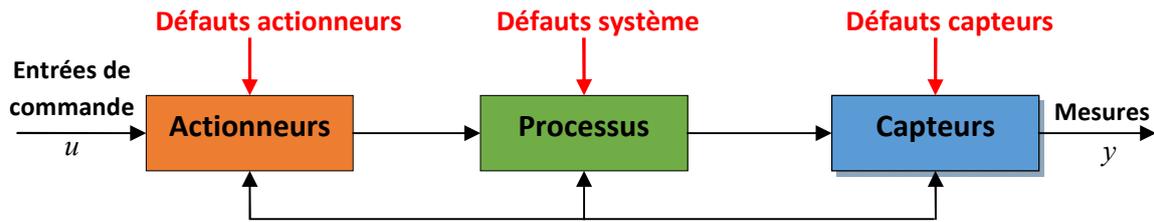


Figure 3.2 : Différents types de défauts d'un système physique.

3.3.4 Selon leurs caractéristiques temporelles

Les défauts peuvent également être classés à partir de leurs évolutions temporelles ou leurs formes. Ils peuvent être divisés en trois catégories distinctes : les défauts brusques, intermittents ou progressifs (Jain et al., 2018).

a) Les défauts brusques :

Habituellement, ils sont très graves car ils affectent les performances et/ou la stabilité du système commandé. La caractéristique principale de ce type de défauts est la discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable. Ce type de défauts se produit souvent en raison de dommages matériels.

b) Les défauts progressifs :

Ce type de défaut est plus difficile à détecter à son origine du fait de sa faible amplitude et son évolution lente.

c) Les défauts intermittents :

Ces défauts sont des défauts dits fugitifs, qui représentent un cas particulier de défauts abrupts avec la propriété d'un signal qui revient de façon aléatoire aux valeurs normales. Ces défauts affectent le système de manière instantanée et se manifestent par un écart important par rapport à la valeur nominale du signal. Leur cause est souvent due à un parasite.

3.3.5 Selon leurs influences

Les défauts peuvent être classés comme défauts additifs et défauts multiplicatifs, selon leurs influences et leurs impacts sur les performances du système. On appelle un défaut additif s'il affecte le comportement du procédé indépendamment des entrées connues (telles que les défauts actionneurs et défauts capteurs). S'il affecte le procédé d'une façon dépendante des entrées connues, ils sont considérés comme étant multiplicatifs (défauts système) (Patton et Chen, 1997) et (Victoria et Narvaez, 2007).

3.4 Classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic utilisées dans le milieu industriel sont très variées et ils reposent essentiellement sur le principe de comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance. Les méthodes de diagnostic peuvent être différenciées selon plusieurs critères : de la dynamique du système (continu, discret ou hybride), le type d'implantation du système de surveillance (en ligne ou hors ligne), la nature de l'information disponible (qualitative ou quantitative) et la structure de prise de décision (centralisée, décentralisée ou distribuée).

Dans la section suivante, nous présentons une classification des méthodes de diagnostic rencontrées dans la littérature.

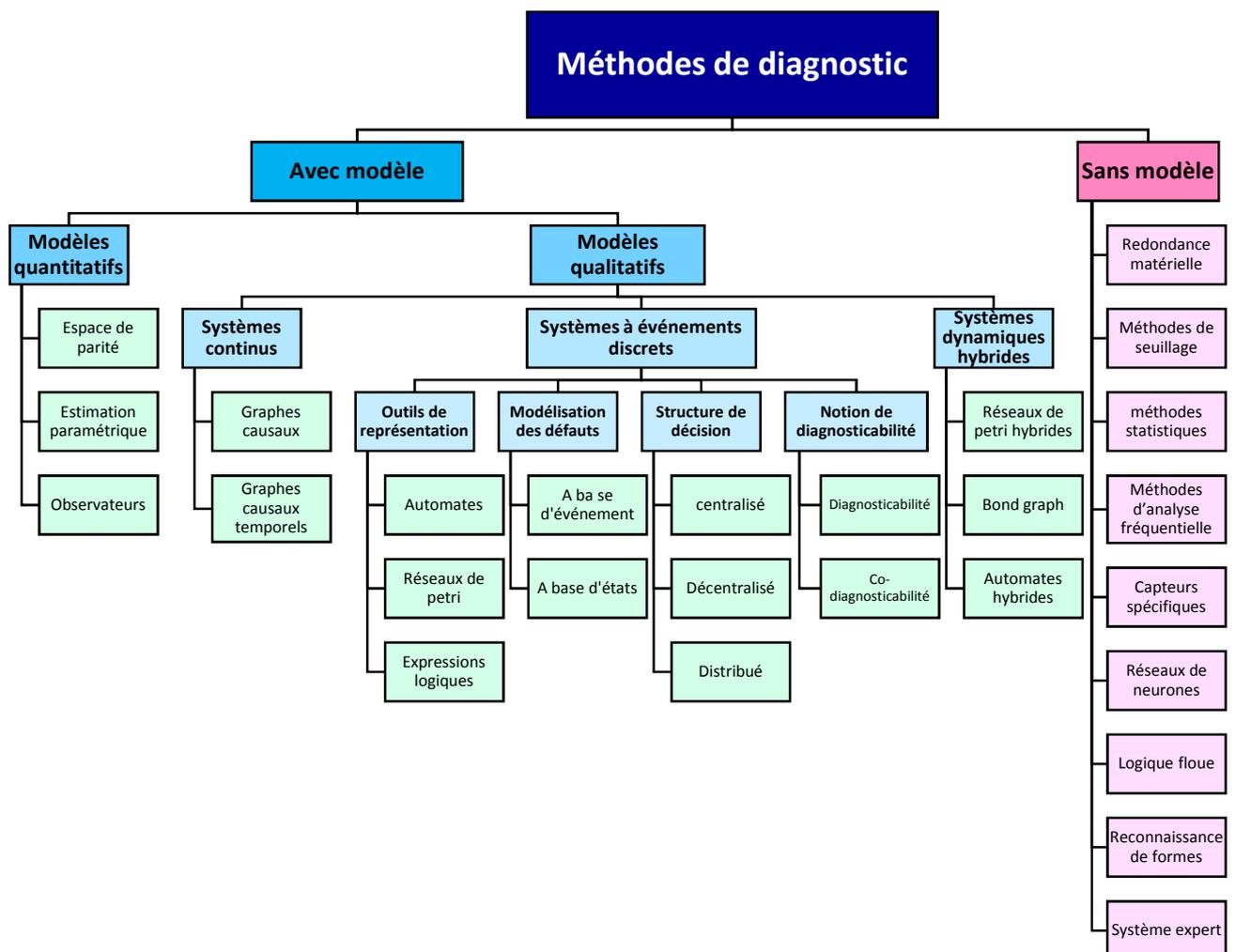


Figure 3.3 : Classification des méthodes de diagnostic.

Selon la connaissance dont on dispose sur le fonctionnement du système, ces méthodes peuvent être divisées en deux axes (Zwingelstein, 1995) :

- Les méthodes sans modèle (ou externes), qui sont des méthodes, soit à base de connaissance, soit des méthodes de traitement du signal.
- Les méthodes à base d'un modèle (ou internes), qui représentent des méthodes à base de modèles quantitatifs et/ou qualitatifs.

Le lecteur pour se référer aux travaux suivants : (Combacau, 1991), (Zemouri, 2003), (Derbel, 2009).

3.4.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles

Le principe général des méthodes de diagnostic à base de modèle est de détecter un écart entre le comportement du système avec le comportement d'un modèle. De nombreux auteurs, décomposent les méthodes de diagnostic à base de modèle selon le type du modèle en deux sous classes (Combacau et al., 2000a) :

- les méthodes basées sur des modèles quantitatifs : ces méthodes représentent les méthodes quantitatives issues de la communauté *FDI* (*Fault Detection and Isolation*).
- les méthodes basées sur des modèles qualitatifs.

La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approches peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic (Derbel, 2009).

3.4.1.1 Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs

Les méthodes à base de modèles quantitatifs reposent sur l'estimation de l'état, l'identification des paramètres ou de l'espace de parité à travers des modèles mathématiques du système, afin de représenter l'information disponible du fonctionnement.

Ces méthodes sont basées sur la génération de résidus. Si le résidu qui représente l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors détectée. A ce moment, ce résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connues, dans le but de localiser et d'identifier la défaillance avant de prendre une décision. Les avantages de ces méthodes sont tout d'abord la capacité de détecter les variations abruptes et progressives de défauts à travers une analyse de tendance des signaux.

De plus, ces méthodes possèdent la capacité de donner une localisation précise du défaut. Par contre, elles nécessitent une information dite "profonde" sur le comportement du système et de ses défauts, ce qui rend les calculs complexes pour le diagnostic en ligne. Elles sont également très sensibles aux erreurs de modélisation.

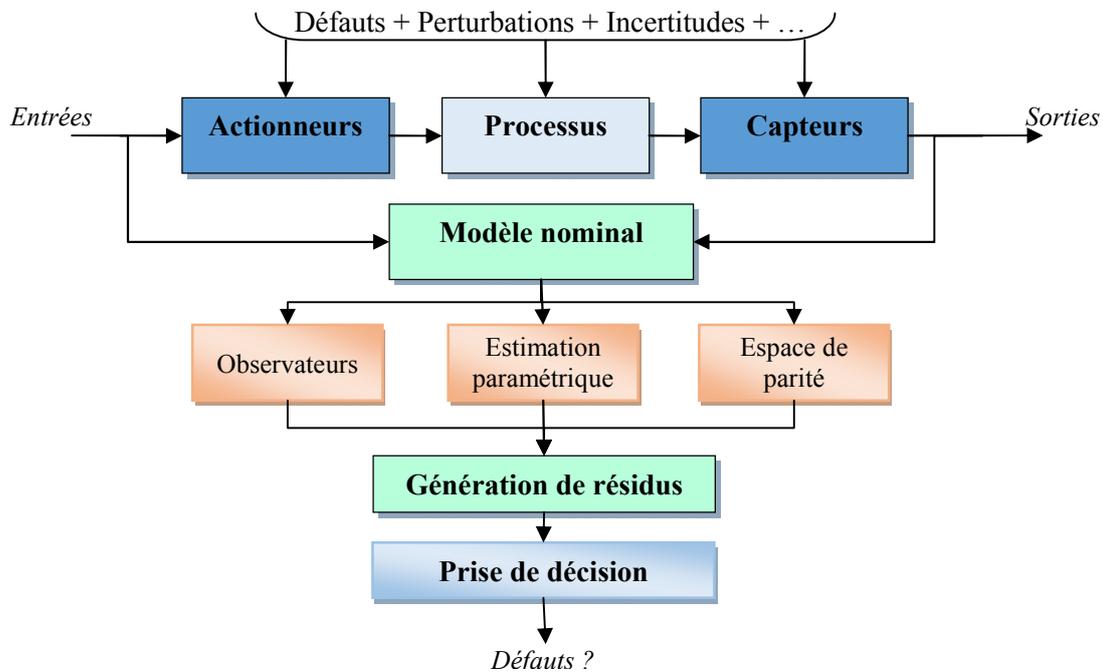


Figure 3.4 : Architecture générale du diagnostic de défauts à base de modèle quantitatif.

Plusieurs travaux ont été consacrés aux méthodes de diagnostic à base de modèles basées sur la génération de résidus (Isidori, 1995), (Koutsoukos et al., 2001).

a) Méthode d'espace de parité

La méthode de l'espace de parité, ou méthode de la Relation de Redondance Analytique, a été l'une des premières méthodes utilisées (Gertler et al., 1990) et l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine de la diagnostic basée sur un modèle. Le principe de génération de résidus par équations de parité repose sur la vérification des relations particulières, statiques ou dynamiques, appelées RRA (Relations de Redondance Analytiques) qui ne lient que des grandeurs connues, disponibles en ligne. L'espace de parité peut être vu comme l'espace des résidus possible. Il est souvent défini comme l'orthogonal de la matrice d'observabilité, ce qui revient à éliminer l'influence de l'état sur le résidu. Dans le cas d'un découplage "parfait", une projection orthogonale aux directions d'influence des perturbations permet de découpler ces dernières. Dans le cas d'un découplage approximatif optimal, une

direction de projection permettant de maximiser la sensibilité aux défauts et de minimiser la sensibilité aux perturbations (robustesse) est recherchée à travers l'optimisation d'un critère (Maquin et Ragot, 2000), (Christophe et al., 2004) et (Akhenak et al., 2008).

b) Méthode d'estimation paramétrique

La méthode d'estimation paramétrique a pour principe de supposer qu'il ya un modèle paramétrique qui peut décrire le comportement du système et que les valeurs de ces paramètres en fonctionnement nominal soient connues. Elle consiste alors à identifier les différents paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système (Willsky, 1976). 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 d'une défaillance dans le système, le principe consiste alors à comparer les paramètres estimés et les paramètres théoriques.

c) Méthode à base d'observateurs

Les méthodes à base d'observateurs ou filtres sont les plus couramment utilisées depuis les années soixante-dix (Willsky, 1976). L'idée principale de ces méthodes s'appuie sur la reconstruction de la sortie du processus à l'aide d'observateurs, de la comparer avec la sortie mesurée, puis l'écart entre ces deux fonctions est utilisé comme résidu. Ces résidus doivent servir d'indicateurs fiables de comportement du processus. Ils sont donc nuls en l'absence de défauts et dépendants des défauts en leur présence.

3.4.1.2 Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs

A. Classification des méthodes de diagnostic des systèmes continus

- ***Graphes causaux***

Un autre outil proposé par l'intelligence artificielle est le raisonnement causal. Les graphes causaux sont basés sur des relations de cause à effet. Une structure causale est une description des effets que les variables peuvent avoir les unes sur les autres. Cela peut être représenté par un graphe orienté. Les nœuds sont les variables et les arcs symbolisent les relations entre elles. Cette structure fournit un outil conceptuel pour le raisonnement à propos de la façon dont les changements normaux ou anormaux se propagent au sein du procédé. Les graphes causaux peuvent être utilisés comme support pour divers raisonnements, comme la simulation, le filtrage des défauts, localisation des défauts... Ces modèles ont donc l'avantage de représenter les relations et les interactions qui lient tous les éléments d'un modèle.

Le diagnostic est typiquement un processus causal. Il consiste à déterminer les composants défectueux qui peuvent expliquer le fonctionnement anormal observé. (Gentil et al., 2004), (Beltran et Daniel, 2004). Le comportement normal de n'importe quel procédé industriel peut être partiellement décrit par un graphe causal, composé de relations continues entre les variables. La transcription des modèles de comportement normal en termes de graphes orientés fournit un outil de raisonnement au sujet des lois physiques régissant le dispositif et fournit ainsi une manière normale de mettre en œuvre le diagnostic.

- ***Graphes causaux temporels***

Le graphe causal temporel est défini comme l'abstraction qualitative et symbolique du comportement d'un système continu. Il est construit à partir des équations analytiques du système. Le graphe causal temporel développé par (Mosterman et Biswas, 1999) est représenté par un graphe orienté et libellé $G(S, A, L, l_e)$, où S est l'ensemble des sommets représentant l'ensemble des variables du système, A est l'ensemble des arcs représentant les relations temporelles et causales entre les différentes variables du système, L est l'ensemble des labels associés aux arcs et l_e est une fonction permettant d'associer un label à chaque arc.

Dans (Manders et al., 2000) et (Biswas et al., 2003), les auteurs ont proposé une stratégie basée sur un algorithme récursif permet de diagnostiquer les défauts des systèmes à base des graphes causaux temporels. L'utilisation de ces derniers a été aussi étendue pour l'utilisation des systèmes dynamiques hybrides (Daigle, 2008). De plus, une autre évolution des graphes causaux temporels pour la surveillance des systèmes dynamiques a été proposée dans (Chatti, 2013).

B. Classification des méthodes de diagnostic des SEDs

Les systèmes à événements discrets représentent la classe des systèmes dynamiques dont les états et les transitions sont modélisés de manière discrète. Plusieurs classifications des méthodes de diagnostic des systèmes à événements discrets existent dans la littérature. Les méthodes de diagnostic des systèmes à événements discrets peuvent être généralement classées selon quatre approches :

- Les outils de représentation,
- Le type de modélisation des défauts,
- La structure de la prise de décision des diagnostiqueurs,
- La notion de diagnosticabilité.

B.1 Approches de diagnostic par outils de représentation du système

- ***Diagnostic à base d'automates à états***

L'automate à états représente un outil formel de modélisation de l'information sous forme d'événements basés sur la théorie des langages. Ce modèle permet de décrire les évolutions à travers des séquences d'événements qui rendent compte de l'état du système. C'est un outil largement utilisé dans les méthodes de diagnostic des systèmes à événements discrets surtout lorsqu'il s'agit de décrire le comportement complet du système (Sampath et al., 1995) et (Su et al., 2002). Il existe des travaux sur la diagnosticabilité des SED qui utilisent les automates finis simples comme modèles de représentation (Sampath et al., 1995).

Dans le cadre des automates à états finis, on peut s'intéresser au délai maximal nécessaire pour diagnostiquer toute défaillance dans le système. Si cela nécessite l'occurrence d'au plus K événements observables après l'occurrence, on dit que le système est K -diagnosticable (Tripakis, 2002). Afin de tenir compte de l'information temporelle sur la réception d'événements (délais entre l'observation de deux événements ou leurs instants d'occurrence), ces automates sont étendus vers des automates temporisés (Fakhfakh, 2015).

- ***Diagnostic à base de Réseaux de Petri***

Le diagnostic des systèmes à événements discrets par des Réseaux de Petri est utilisé dans nombreuses approches. Dans (Haar et al., 2003), la diagnosticabilité des SED a été étudiée en utilisant la technique de dépliage des réseaux de Petri (*Petri Net unfoldings*). Les travaux de (Liu et al., 2012), (Liu et al., 2013) et (Liu, 2014) ont proposé une extension des RdP temporels pour laquelle à chaque transition est associé un événement qui peut être observable ou non. Plus récemment, les auteurs de (Liu et al., 2017) ont proposé une méthode pour l'analyse de la diagnosticabilité et le diagnostic en ligne des RdP labélisés, dite à la volée. Les algorithmes à la volée ont l'avantage d'obtenir un résultat sans avoir nécessairement à explorer tout l'espace d'états (Fakhfakh, 2015).

- ***Diagnostic à base d'expressions logiques***

La modélisation d'un SED par un automate permet une interprétation de la situation d'un système mais est souvent difficilement exploitable dans le cas des systèmes complexes où le nombre d'états est important. La modélisation par un automate peut être renforcée en exploitant les propriétés algébriques du procédé. En effet, dans le cas où le procédé est composé de plusieurs capteurs et actionneurs du type Tout Ou Rien, renvoyant une valeur 0 ou 1, la modélisation par algèbre de Boole est particulièrement intéressante. Cet outil de

représentation décrit le comportement du système par des spécifications en utilisant des prédicats booléens. C'est un modèle abstrait permettant une exploitation et une compréhension souvent plus aisées. Chaque état du procédé est représenté par un vecteur composé de variables booléennes. Passer d'un état à un autre ne se produit que par changement d'une variable.

(Wang, 2000) présente, dans ses travaux, une approche booléenne permettant de représenter la situation d'un système autour de plusieurs exemples dont notamment un système de régulation de niveau d'une cuve par le vecteur de ses observations qui évolue en fonction des ordres émis. Ces travaux s'inscrivent plus dans le cadre de la synthèse de la commande afin de construire un superviseur. Cependant, les expressions logiques peuvent être utilisées dans le cadre de la détection des défauts en utilisant l'estimation des états du comportement normal.

B.2 Approches de diagnostic par modélisation des défauts

• *Modélisation des défauts à base d'événements*

Les systèmes à événements discrets peuvent être modélisés par des modèles à base d'événements. Ce sont des systèmes dont le comportement est considéré comme des transitions possibles entre différents états après que des événements se soient produits. Le concept de diagnosticabilité à base d'événements a déjà été introduit et défini par (Sampath et al., 1995) de la manière suivante : « Chaque défaillance de l'ensemble des défaillances doit avoir une signature distincte et observable pour inférer l'occurrence de cette défaillance et déterminer son type ».

Après la construction du diagnostiqueur, il suffit que ce diagnostiqueur satisfasse aux deux conditions suivantes :

- il existe au moins un état du diagnostiqueur pour lequel le diagnostiqueur décide avec certitude l'occurrence d'un défaut appartenant à une partition des défauts.
- il ne doit pas y avoir des cycles dits « indéterminés » pour lesquels le diagnostiqueur est incapable de décider avec certitude l'occurrence d'un défaut appartenant à une partition des défauts.

• *Diagnosticabilité à base d'événements*

Selon (Pencolé, 2004), une défaillance est la cause des événements. Dans ce contexte, la diagnosticabilité à base d'événements peut être définie de manière informelle comme suit : «

L'occurrence d'un évènement de panne F est diagnosticable s'il est toujours possible de diagnostiquer l'occurrence de F sans ambiguïté après un nombre fini d'observations qui suivent cette occurrence». Autrement dit, si F est diagnosticable :

- il est toujours possible de conclure sur la présence certaine de F ;
- cette conclusion est établie en attendant un nombre fini d'observations.

- **Modélisation des défauts à base d'états**

La modélisation à base d'états considère que l'occurrence d'un défaut est détectée par l'arrivée dans un état caractérisant ce défaut. Un diagnostiqueur à base d'états a été introduit et défini dans (Zad et al., 2003). Ce diagnostiqueur caractérisé par les sorties des capteurs et des commandes ainsi que le chemin qui conduit à ces états normaux ou défectueux. Il explique cette modélisation autour d'un système de régulation de température d'une salle composée d'un radiateur, d'un capteur de température et de la commande du radiateur. D'après (Mouchaweh et al., 2005), cette approche nécessite l'identification de l'état courant après chaque réception d'événements produit par le procédé (Fakhfakh, 2015).

B.3 Approche de diagnostic par structure de prise de décision

Dans la littérature, il existe nombreuses structures de prise de décision dépendant de la distribution de l'information disponible sur le procédé : centralisée, décentralisée ou distribuée. Dans l'approche centralisée, le système étudié est décrit par un modèle global unique qui intègre l'ensemble de son comportement. La structure centralisée d'un diagnostiqueur consiste à représenter un modèle unique du procédé avec un module de diagnostic unique. Dans le cas d'une structure décentralisée, l'approche consiste à partir du modèle global du procédé à obtenir des observations locales par projection naturelle pour établir des diagnostiqueurs locaux tout en gardant les performances d'une structure centralisée. Le principe de la structure distribuée consiste à établir pour chaque composant du système son propre modèle associé à son diagnostiqueur local (Philipot, 2006).

B.4 Approche de diagnostic par vérification de la diagnosticabilité

L'utilisation d'approche pour le diagnostic des défaillances est indispensable pour les systèmes plus ou moins complexes. Cependant, une question reste en suspens : le système est-il diagnosticable? En effet, avant d'appliquer une méthode sur un système, il faut pouvoir vérifier si ce dernier dispose d'informations en quantité suffisante pour pouvoir effectuer le diagnostic. Par conséquent, la notion de « diagnosticabilité » va permettre de déterminer

l'ensemble des pannes pouvant être diagnostiqué. Selon la structure (centralisée, décentralisée, distribuée) et l'information disponible, des extensions de la notion de diagnosticabilité ont été définies dans la littérature pour les SEDs. Un SED est dit diagnosticable pour l'ensemble des partitions de défauts et pour un ensemble d'événements observables s'il est possible de détecter l'occurrence de n'importe quel défaut appartenant à une des partitions de défaut dans un délai fini. Cette notion s'applique autant pour les méthodes à base d'états que celles à base d'événements.

C. Classification des méthodes de diagnostic des systèmes hybrides.

Les méthodes à base de modèles qualitatifs permettent de représenter le comportement du système avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles du type symbolique (Travé-Massuyès et Milne, 1997). Pour que le système de surveillance soit capable de détecter les déviations du fonctionnement normal, diagnostiquer et localiser les défauts, les modèles qualitatifs doivent représenter de manière qualitative les systèmes continus, les systèmes à événements discrets et les systèmes hybrides (Lunze, 2000), (David et Alla, 2005) et (Koutsoukos et al., 1998).

Dans ce qui suit, nous présentons une classification des méthodes de diagnostic des SDH, selon : les méthodes issues des systèmes continus, les méthodes issues des systèmes à événements discrets ou les méthodes issues des systèmes ou les méthodes mixtes.

C.1 Méthodes fondées sur des approches continues

De façon générale, ce type de méthodes est basé sur les méthodes de diagnostic issues des systèmes continus, telles que la génération des résidus et les graphes causaux. Pour la génération des résidus, plusieurs méthodes ont été proposées (Koutsoukos et al., 2001), (Karsai et al., 2003) et (Domlan et al., 2004). (Koutsoukos et al., 2001) ont proposé une méthode basée sur l'utilisation des réseaux de Petri afin d'estimer en ligne le mode de fonctionnement des SDH. Autrement, de nombreuses méthodes ont basé sur les méthodes à base d'observateurs (Balluchi et al., 2002), (Kratz et Aubry, 2003), (Saadaoui et al., 2006) et (Xu et al., 2007). Parmi lesquels, (Balluchi et al., 2002) ont proposé une méthode basée sur l'utilisation d'un observateur hybride, constitué d'un observateur continu permet d'estimer l'évolution des variables continues et un autre discret pour identifier l'état discret courant du système. Une autre méthode de diagnostic du SDH a été proposée dans (Cocquempot et al., 2004); les auteurs ont proposé une technique basée sur la redondance analytique. Le système à

diagnostiqueur est modélisé par un automate hybride. La détection de défauts est garantie grâce à la génération de résidus entre les variables d'entrée et de sortie mesurées et les relations de redondance analytique. Dans (Gomaa, 1997), une autre méthode de diagnostic des SDHs a été proposée. Cette méthode est basée sur l'utilisation des réseaux de Petri continus causaux hybrides. D'autres chercheurs étendent l'utilisation des approches de diagnostic qualitatif des systèmes continus pour le diagnostic des SDH (Olivier-Maget et al., 2009) et (Vento et Sarrate, 2010).

C.2 Méthodes fondées sur des approches des SED

Il existe peu de travaux de diagnostic des SDH, issues des méthodes de diagnostic des SED. Le diagnostic des systèmes à événements discrets est basé sur l'utilisation de modèles discrets tels que les réseaux de Petri et les automates d'états finis,... etc. Dans ce contexte, Sampath et al. ont proposé dans une approche de diagnostic consiste à modéliser le système par des automates à états finis, puis à construire son diagnostiqueur (Sampath et al., 1995). On trouve aussi les travaux de (Lunze, 2006), où les auteurs introduisent des algorithmes de diagnostic similaires au concept du diagnostiqueur du Sampath (Sampath et al., 1995). L'idée de base repose sur une acquisition expérimentale du modèle du système à travers l'abstraction des équations de l'espace d'état et les méthodes d'identification à base de réalisations expérimentales (Philippot, 2006). D'autre part, une méthode basée sur l'utilisation d'un modèle d'automate hybride à temps discret a été proposé dans (Bhowal et al., 2007).

C.3 Méthodes mixtes

Pour qu'un système de surveillance des systèmes dynamiques hybrides soit efficace, il est nécessaire de prendre en compte les deux dynamiques à la fois. Malheureusement, il n'existe que peu de travaux s'inscrivant dans ce cadre. De plus, (Karsai et al., 2003) ont proposé une approche basée sur la modélisation du système par un modèle bond graph hybride, puis la génération d'un graphe de propagation des défauts. Une autre méthodologie de surveillance a été proposée, dans (Touria, 2005), basée sur l'utilisation des automates hybrides. De même, une approche de diagnostic pour une classe de SDH a été proposée dans (Derbel, 2009). Cette classe des SDHs a été représenté par une sous classe d'automate hybride, les automates rectangulaires. Par ailleurs, une approche basée sur les filtres de Kalman étendus et les réseaux de Petri différentiel objet (RDPDO) a été proposé par (Olivier-Maget et al., 2009).

3.4.2 Méthodes de diagnostic sans modèles

Dans le domaine industriel, la majorité des systèmes sont de nature non linéaires ce qui rend la modélisation une tâche très difficile, voire impossible. Cette difficulté est justifiée par la complexité du système ou la reconfiguration plusieurs fois en cours de fonctionnement. Ainsi, seules les méthodes de diagnostic sans modèles, également appelées méthodes des bases de données historiques, sont opérationnelles pour ce type d'applications industrielles. Ces méthodes de diagnostic sont basées sur des informations provenant d'une expérience préalable sur des règles heuristiques ou même des exemples de résolution. Dans ce qui suit, nous décrivons quelques méthodes de surveillance sans modèle.

3.4.2.1 Méthode de redondance matérielle

La méthode de redondance matérielle, ou redondance physique, est une méthode consistant à intégrer différents capteurs afin d'obtenir des informations complémentaires sur les mêmes grandeurs physiques de l'installation. Donc, si les composants identiques (capteurs) placés dans le même environnement émettent des signaux distincts, alors nous parlons d'un cas défectueux sinon, ces composants sont considérés dans un état de fonctionnement nominal. Ce type de redondance a été très couramment employé dans les domaines à haut niveau de risque, notamment dans le cas de l'aéronautique ou le nucléaire. Cette méthode a l'avantage d'être relativement efficace et conceptuellement simple mais sa mise en œuvre est coûteuse et ne s'applique généralement que sur des capteurs. Cette méthode souffre d'inconvénients majeurs, tels que le coût (prix élevés des capteurs) et les contraintes ergonomiques associées à l'installation du capteur (manque d'espace).

3.4.2.2 Méthode de seuillage

Le principe de base de cette méthode consiste à comparer les signaux fournis par les capteurs avec des valeurs-limites constantes ou adaptatives (Montmain, 1992). Si ces valeurs seuils sont franchies, on parle d'une anomalie détectée. La mise en place de deux seuils de détection permet de déterminer la gravité de l'anomalie. Le franchissement du premier indique la présence probable d'un défaut, tandis que le franchissement du second peut caractériser sa gravité.

3.4.2.3 Méthodes statistiques

Ces méthodes supposent que les signaux issus des capteurs possèdent certaines propriétés statistiques, sur lesquelles des tests de seuil sont effectués (Basseville, 1998) et

(Zemouri, 2003). L'étude de l'évolution de la moyenne ou de la variance d'un signal peut détecter la présence d'une anomalie. La prise de décision est généralement effectuée à l'aide d'un test d'hypothèses où deux hypothèses (par exemple le maximum de vraisemblance généralisée représentent le fonctionnement normal et anormal (Willisky, 1976).

3.4.2.4 Méthodes d'analyse fréquentielle (Filtrage)

Les méthodes d'analyse fréquentielle sont des méthodes du traitement du signal basées sur l'analyse fréquentielle. Ces méthodes sont généralement très utilisées pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. Au cours de la surveillance, l'état du système est bien déterminé par l'analyse du spectre des signaux provenant des capteurs. Ces signaux sont analysés premièrement dans le cas de fonctionnement normal. Puis, tout écart par rapport aux caractéristiques de fréquence du signal est lié à une situation de défaillance.

Ces approches possèdent l'avantage d'être relativement simple à mettre en pratique, mais l'inconvénient d'être assez sensible aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt. De plus un échantillonnage fréquent est nécessaire pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence (Steyer et al., 2001).

3.4.2.5 Capteurs spécifiques

L'utilisation des capteurs spécifiques peut également être utilisée pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs de fin de course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles (Touaf, 2005).

3.4.2.6 Méthodes à base réseaux de neurones artificiels

Lorsque la connaissance du processus à surveiller est insuffisante et que le développement du modèle de connaissance du processus est impossible, il peut être envisagé d'utiliser le modèle dit «boîte noire». On appelle alors aux réseaux de neurones artificiels ont été utilisés. Leur application dans les domaines de la modélisation, de la commande et du diagnostic a été largement rapportée dans la littérature. Un réseau de neurones artificiels est un système informatique, constitué de processeurs élémentaires (ou nœuds) ayant une connexion interne entre eux, qui traite de façon dynamique l'information arrivant à partir des signaux extérieurs. On présente au RNA, de nouveaux exemples n'ayant pas été utilisés pendant l'apprentissage, pour juger de sa capacité à prédire les comportements du système

ainsi modélisé. Les propriétés rendant l'utilisation des RNA attrayante sont leur faible sensibilité aux bruits de mesures, leur capacité, dans un premier temps, à résoudre des problèmes non linéaires et multi-variables, puis à stocker les connaissances de manière compacte et enfin à apprendre en ligne et en temps réel. Alors leur emploi peut s'effectuer à trois niveaux:

- comme modèle du processus à surveiller en état normal et pour générer un résidu d'erreur entre les observations et les prédictions.
- comme système d'évaluation de résidus pour le diagnostic.
- ou comme système de détection en une seule étape, ou en deux étapes (pour la génération de résidus et le diagnostic).

3.4.2.7 Méthodes à base systèmes d'inférence flous

Au cours des dernières décennies, les applications dans les domaines de la modélisation, de la supervision de processus, de commande et de la prise de décision démontrent la capacité des systèmes d'inférence flous à traiter des problèmes non linéaires grâce à l'utilisation des connaissances expertes. Pareillement, les systèmes d'inférence flous dont les fondations sont basées sur la théorie des ensembles flous de Zadeh (Zadeh, 1965) sont devenus très populaires.

Un système d'inférence flou se compose d' :

- un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes, les plus usuelles étant les formes triangulaires, trapézoïdales, et gaussiennes,
- une base de connaissance qui regroupe les règles liant les variables d'entrées et de sorties sous la forme « Si...Alors... »,
- un mécanisme de raisonnement.

Les tâches de diagnostic reposent sur des quantités d'heuristiques difficiles à formaliser dans un modèle mathématique :

- la corrélation entre des variables très différentes,
- des observations qualitatives (par exemple : couleur, bruit),
- des intuitions, liées à des statistiques (par exemple : tel appareil pose plus de problèmes que tel autre...) difficilement quantifiables mais très efficaces (Touaf, 2005).

3.4.2.8 La reconnaissance des formes

La reconnaissance des formes se base sur la définition d'algorithmes permettant la classification des formes ou des objets en les assimilant à des formes types. Une forme est l'examen du fonctionnement du système. Elle peut être incarnée par un vecteur nommé « vecteur forme » dans un espace à n paramètres nommé espace de représentation. Les formes types représentent les modes de fonctionnement présentés par des ensembles de points occupant des zones limitées de l'espace de représentation appelées classes et notée C_i , est définie autour de chaque forme-type de l'espace de représentation en englobant les formes semblables.

Le diagnostic par reconnaissance des formes est effectué en utilisant une approche de classification qui additionne une nouvelle observation à une classe correspondant à un mode de fonctionnement. L'utilisation de la reconnaissance des formes en diagnostic est surtout efficace en termes de temps de calcul pour la classification d'une nouvelle observation, et de capacité à traiter des données qui sont à la fois incertaines et imprécises. Elle est également capable de réaliser un diagnostic prédictif et de travailler avec des bases de données incomplètes.

Pour le diagnostic des processus industriels, une forme représente l'observation de l'état du système à étudier et chaque classe de l'espace de représentation présente un mode de fonctionnement. Le problème du diagnostic par RdF est de savoir décider à quelle classe, parmi les classes connues, une nouvelle observation recueillie ressemble le plus. Alors cela devient un problème de classification qui cherche à identifier un des modes de fonctionnement connus, selon les règles de décisions utilisées.

Cependant, l'inconvénient majeur de l'utilisation de la reconnaissance des formes en diagnostic réside dans la difficulté à trouver l'ensemble minimal mais suffisant des paramètres informatifs modélisant le fonctionnement réel du procédé. Toutefois, le diagnostic par reconnaissance des formes a été appliqué avec succès sur différentes applications réelles (Jain et al., 2000), (Dubuisson, 2001) et (Mouchaweh, 2002). Les auteurs ont montré l'importance du diagnostic par RdF où la modélisation du procédé est difficile à établir comme la biométrie, la reconnaissance de caractères, la reconnaissance vocale, le diagnostic médical, l'automatisation industrielle, le comportement humain, le diagnostic des machines électriques, etc.

3.4.2.9 Les systèmes experts

Ils emploient une information heuristique pour relier les symptômes aux fautes. Ce sont des processus à base de règles qui effectuent des associations empiriques entre effets et causes. Ces associations sont basées sur l'expérience de l'expert humain plutôt que sur une connaissance de la structure et/ou du comportement du système.

D'une façon générale, le système expert (Charbonnier, 1996) est formé d'une base de connaissances et d'un moteur d'inférence. La base de connaissance correspondant d'une part aux règles qui modélisent la connaissance du domaine considéré et d'autre part aux faits contenant les informations concernant le cas observé à traiter (symptôme). Le moteur d'inférence doit être capable de raisonner par un choix de règles (causes) selon les faits observés par deux raisonnements différents :

- Le raisonnement inductif par chaînage avant, afin de trouver tous les symptômes qui sont la conséquence d'un symptôme initial (état réel du système).
- Le raisonnement déductif par chaînage arrière, afin de trouver toutes les causes possibles qui peuvent expliquer un symptôme.

La première qualité des systèmes experts consiste en leur efficacité au niveau temps de calcul. Le processus doit attendre les événements observables des règles pour sauter directement aux conclusions. Généralement, l'interprétation du résultat est compréhensible pour l'opérateur car ces règles sont le produit d'experts humains. Finalement, les systèmes experts sont facilement implantables car il s'agit d'une énumération de règles. Néanmoins, ils sont totalement dépendants de l'expertise, et les règles acquises sur une application ne sont pas utilisées sur une autre application.

Dans le cas de nouveaux systèmes, il n'y a pas d'expériences au sujet des pannes qui peuvent se produire, ce qui rend l'acquisition des règles difficile. Un système expert ne peut pas être opérationnel dès le début de son utilisation mais il a besoin de temps pour son apprentissage. De même pour l'ajout ou la suppression des composants.

Enfin, un système expert est la conséquence d'une règle connue. Il ne donne pas d'explication sur les conclusions données et donc rend difficile de diagnostiquer les pannes.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement la terminologie et les définitions liées à la surveillance et au diagnostic de défauts d'un système. Ce chapitre a également présenté un état de l'art sur la surveillance des systèmes dynamiques hybrides. Comme nous l'avons vu, toute étude sur les systèmes dynamiques hybrides traite à la fois les deux aspects continus et discrets du système étudié. Pour cette raison, nous avons présenté un aperçu succinct sur les différentes approches de surveillance proposées pour les trois types de systèmes qu'ils soient continus, discrets ou hybrides.

Deux grandes classes des approches de surveillance ont été identifiées : les approches basées sur des modèles et les approches sans modèle. Les approches basées sur des modèles sont quant à elles représentées par des modèles quantitatifs et/ou qualitatifs. Par contre, les approches sans modèles reposent essentiellement sur les connaissances de l'expert.

Malgré la diversité des méthodes de surveillance et de diagnostic, à notre connaissance, le nombre de contributions actuellement enregistrées pour traiter les problématiques de la surveillance et du diagnostic des systèmes dynamiques hybrides reste très limité. L'objectif du chapitre suivant sera orienté vers la mise en œuvre d'une loi de commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides.

CHAPITRE IV

CONCEPTS DE LA COMMANDE TOLERANTE AUX
DEFAUTS DES SYSTEMES DYNAMIQUES

4. Concepts de la commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques

4.1 Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, un système de surveillance doit permettre, en cas de défauts, de les détecter et de les localiser le plus rapidement possible. Une fois le diagnostic effectué, il est naturel de s'efforcer de limiter leur action sur le système par une commande appropriée.

Pour cette raison, il est recommandé d'implanter un module de reconfiguration capable de modifier la loi de commande du processus permettant de compenser l'effet du défaut et d'assurer le bon fonctionnement du système commandé. Cette stratégie de commande s'appelle : Commande Tolérante aux Défauts.

Un système de commande tolérant aux défauts a pour but de maintenir des performances proches de celles désirées tout en préservant la stabilité, non seulement en l'absence de défauts, mais également en présence de composants défectueux (Guenab, 2007).

Durant ces dernières décennies, la commande tolérante aux défauts a touché plusieurs applications dans le domaine industriel. Dans la suite de ce chapitre, nous exposons un état de l'art sur les techniques de commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques qu'ils soient continus, discrets ou hybrides.

4.2 Définition

Par définition, un système tolérant aux défauts possède la capacité de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances acceptables en présence de défauts (Patton, 1997), (Zhang et Jiang, 2003) et (Zhang et Jiang, 2008). En dépit du fait qu'un schéma classique de commande permet d'assurer la stabilité et

les performances désirées du système dans le cas nominal, il s'avère très limité et peut amener le système vers des comportements non désirés, voire à l'instabilité, en présence d'un défaut.

Pour pallier de telles insuffisances, des lois de commande particulières, prenant en compte l'effet du défaut, ont été développées dans le but précis de préserver les performances (Boussaïd, 2011). Pour cela, la structure d'un système tolérant aux défauts permet de garantir la stabilité et le bon fonctionnement du système à commander en présence de défauts.

4.3 Structure d'un système tolérant aux défauts

Un système est dit être tolérant aux défauts chaque fois qu'en cas de défaut, le système est en mesure de récupérer sa tâche d'origine avec les mêmes performances ou des performances dégradées.

La plupart des travaux de recherche dans le domaine de la commande tolérante aux défauts ont été développés en supposant l'existence d'un module de surveillance fonctionnant d'une façon intégrative avec un module de reconfiguration des lois de commande. Un système tolérant aux défauts est composé alors de deux modules en cascade :

4.3.1 Module de surveillance

Le module de détection et de diagnostic est utilisé pour surveiller le système et détecter les défauts et diagnostiquer leurs origines et leurs significations. De plus, des informations sur l'état du système sont fournies au superviseur.

4.3.2 Superviseur

Le superviseur est un module de récupération qui prend les mesures nécessaires pour que le système défectueux puisse atteindre les objectifs de commande presque à tout moment. Ces actions peuvent exiger de reconfigurer l'ensemble des actionneurs, des capteurs ou la loi de commande. Généralement, dans la littérature, ce module est également appelé module d'accommodation de défaut ou module de reconfiguration de régulateur.

Le schéma fonctionnel général d'un système de commande tolérant aux défauts est illustré à la figure 4.1 avec quatre composants principaux: l'installation elle-même (y compris les capteurs et actionneurs), une unité de détection et de diagnostic des défauts, un régulateur reconfigurable, et un sous-système de supervision (Jain et al., 2018).

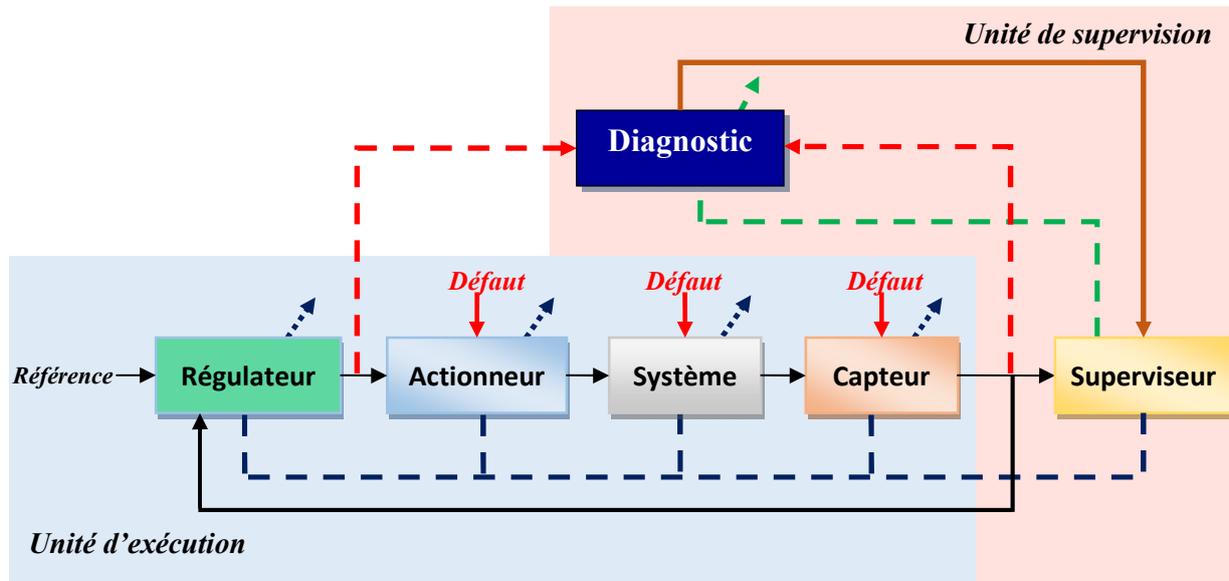


Figure 4.1: Structure générale d'un système tolérant aux défauts.

4.4 Commande tolérante aux défauts des systèmes continus

Dans la littérature, les approches de synthèse des systèmes de commande tolérante aux défauts sont généralement classées en deux grandes classes : les approches passives et les approches actives.

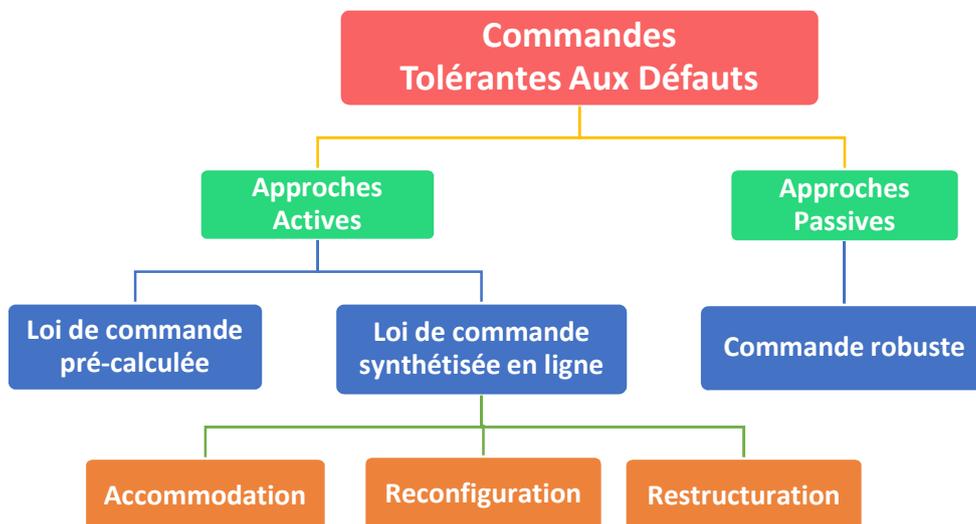


Figure 4.2: Classification des approches de la commande tolérante aux défauts.

4.4.1 Approches passives

Dans ces approches, les contrôleurs sont synthétisés de manière à être robustes à certains défauts. En d'autres termes, les approches de commandes passives tolérantes aux défauts utilisent des techniques de commandes robustes de sorte que le système en boucle fermée reste robuste et insensible à un certain ensemble de défauts. Les défauts de ce type d'approche sont pris en compte dans la conception du système de commande et sont considérés comme des sources de perturbations. Par conséquent, la tolérance aux défauts ne nécessite ni un module de détection et de diagnostic des défauts ni un module de reconfiguration des lois de commande.

L'inconvénient majeur de ces approches réside dans le fait que la robustesse accrue vis-à-vis de certains défauts est obtenue au prix d'un niveau de performance dégradé en régime normal de fonctionnement. De plus, la classe des défauts considérés est limitée, il devient, alors, très risqué d'utiliser la commande passive tolérante aux défauts seule (Blanke et al., 2006a), (Medjmadj, 2018).

On peut dire que dans ce cas, le système défectueux continue de fonctionner avec le même contrôleur et la même structure de système, c'est-à-dire les objectifs et les performances restent les mêmes que ceux du système nominal.

Pour mieux clarifier le principe de ces approches, nous procédons à la décomposition du système en niveaux tel qu'il est présenté en figure 4.3, sur laquelle une décomposition hiérarchique d'un système de commande passive tolérante aux défauts comprenant trois niveaux :

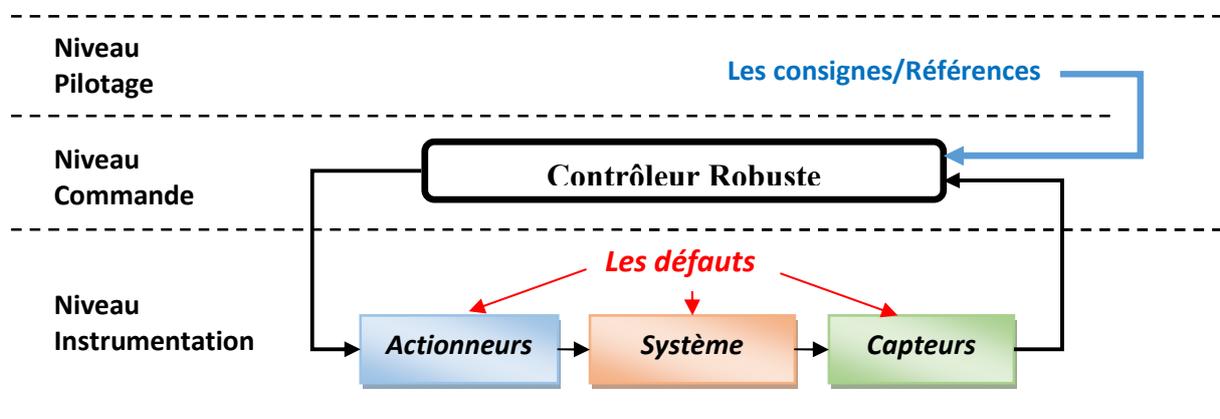


Figure 4.3 : Décomposition hiérarchique d'un système passif tolérant aux défauts.

- Niveau pilotage : ce niveau permet de gérer les consignes/références nécessaires pour piloter l'activité en question,
- Niveau commande : le deuxième niveau est le niveau de commande. Ce niveau contient le contrôleur robuste chargé de commander en temps réel l'activité,
- Niveau instrumentation : aussi, le niveau instrumentation regroupe tous les moyens d'instrumentations nécessaires pour les mesures.

Le contrôleur reçoit les consignes/références de niveau pilotage et les mesures de niveau instrumentation pour élaborer les signaux de commandes pour le système. Le niveau commande fonctionne en permanence pour assurer la poursuite de la référence et l'atténuation des perturbations et de quelques défauts prédéfinis. Les auteurs des ouvrages suivants (Šiljak, 1980), (Veillette et al., 1990), (Veillette, 1995), (Yang et al., 1998), (Jiang et Zhao, 2000) et (Liao et al., 2002) détaillent d'une façon globale les méthodes de commandes robustes (Boussaïd, 2011). Parmi lesquelles, nous présentons brièvement les techniques suivantes : Dans (Jamouli, 2003), une méthodologie basée sur la minimisation d'un critère LQG, est utilisée, pour synthétiser le correcteur de commande tolérante aux défauts. L'idée est de modéliser l'effet des défauts sur le système par un processus aléatoire. Une autre méthode a été proposée dans (Niemann et Stoustrup, 2005), où les auteurs utilisent la paramétrisation de Youla comme degré de liberté pour atteindre les performances de commande tolérante aux défauts requises. Le problème est résolu à l'aide de la technique '*loop-shaping*' de la commande robuste H_∞ . La minimisation d'un critère H_∞ est aussi le point initial autour duquel les travaux de (Yang et al., 2000) et (Yang et Lum, 2003) sont développés. La méthode de synthèse mise en jeu est basée sur les inégalités matricielles linéaires (LMI), ou sur la résolution d'équations algébriques de Riccati (Yang et al., 2001). Dans (Nett et al., 1988) et (Tyler et Morari, 1994), les auteurs ont proposé une méthode consiste en la synthèse d'un régulateur à quatre degrés de liberté. La méthodologie implique donc la gestion d'un compromis entre les performances de régulation et de diagnostic.

4.4.2 Approches actives

L'approche active de commande tolérante aux défauts, contrairement à l'approche passive, réagit sur les défauts en reconfigurant en ligne la loi de commande de manière à maintenir la stabilité et les performances nominales du système (Patton, 1997), (Blanke et al., 2006) et (Kanev, 2004). Cette approche permet alors de faire face à des défauts imprévus mais nécessite une méthode efficace de détection et de localisation des défauts qui permet de

fournir le plus précisément possible des informations utiles sur les défauts éventuels (l'instant d'apparition, le type et l'amplitude du défaut). L'architecture générale d'une commande active tolérante aux défauts est essentiellement composée d'un régulateur reconfigurable, un module diagnostic permettant la détection, la localisation et l'estimation de l'amplitude des défauts et un mécanisme de reconfiguration qui permette de recouvrir les performances du système.

Une décomposition hiérarchique d'un système de commande tolérant aux défauts actif est représentée dans la figure 4.4. Ce système comporte quatre niveaux.

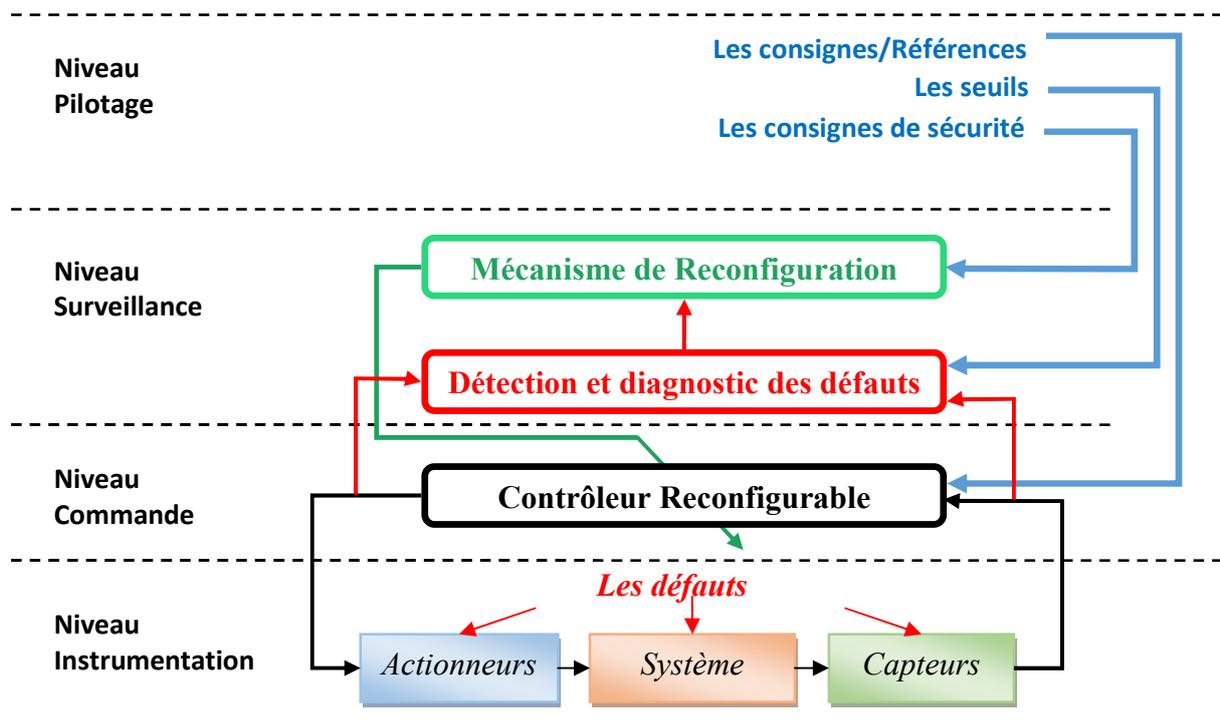


Figure 4.4 : Décomposition hiérarchique d'un système actif tolérant aux défauts.

- Niveau pilotage : ce niveau permet de fixer les consignes de pilotage de l'activité.
- Niveau surveillance : Ce mécanisme agit sur un contrôleur reconfigurable qui doit être capable de s'adapter automatiquement au comportement du système. Ce niveau est intercalé entre les niveaux commande et pilotage, a pour but de satisfaire, en boucle fermée, aux exigences de performance du système dans le cas sain ainsi que dans le cas défectueux. Ce niveau effectue les deux étapes conceptuelles de la commande active tolérante aux défauts, qui sont le diagnostic de défauts et la reconfiguration de la loi de commande, habituellement réalisées séparément et dans cet ordre.
- Niveau commande : le niveau commande comporte un contrôleur reconfigurable.
- Niveau instrumentation : comporte les capteurs et les actionneurs.

Certains travaux sur la commande tolérante aux défauts active s'appuient sur des étapes spécifiques dédiées au traitement des défauts comme des systèmes de détection et de diagnostic. De façon générale, selon la compensation des effets de défauts, on distingue deux classes différentes : les approches basées sur la sélection d'une loi de commande pré-calculée (Maybeck et Stevens, 1990), (Rauch, 1995) et (Zhang et Jiang, 2001) et les approches basées sur la synthèse en ligne d'une nouvelle loi de commande (Looze et al., 1985). Les deux approches nécessitent la présence d'un bloc de diagnostic pour fournir des informations sur l'état du système (Boussaïd, 2011).

4.4.2.1 Loi de commande pré-calculée

L'idée de base de cette approche est de considérer qu'il existe un banc de régulateurs pré-calculés hors ligne, où chaque régulateur représente un mode de fonctionnement correspondant à un mode de fonctionnement nominal ou des modes défaillants. Le régulateur associé au mode de fonctionnement actif (présent) est choisi par le bloc de reconfiguration, sur la base des informations fournies en ligne par le bloc de diagnostic. Cette approche a fait l'objet de plusieurs travaux notamment (Moerder et al., 1989), (Maybeck et Stevens, 1990), (Zhang et Jiang, 2001) et (Sun et El-Farra, 2011).

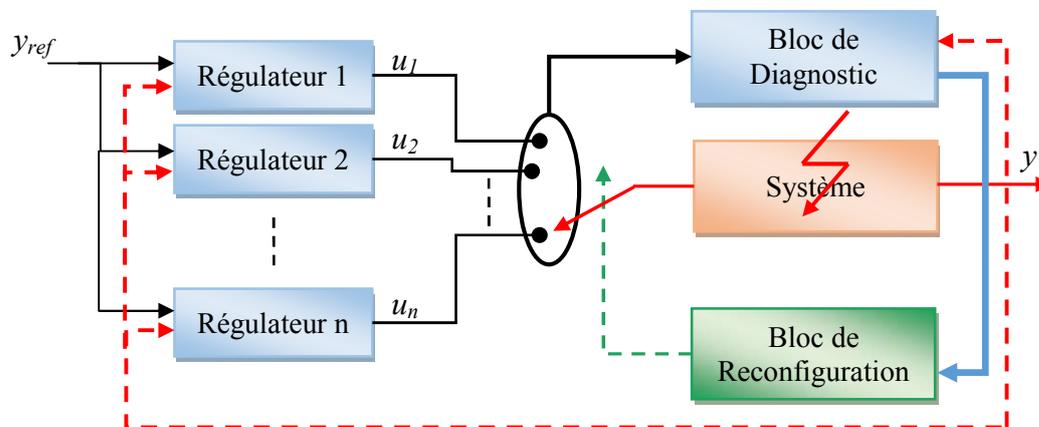


Figure 4.5 : Structure d'une commande tolérante aux défauts active à base de régulateurs pré-calculée.

4.4.2.2 Loi de commande synthétisée en ligne

En général, ce type de méthode comprend un calcul en ligne des paramètres du correcteur où une nouvelle synthèse de la loi de commande modifiée ainsi que sa structure et ses paramètres. En fonction de la gravité des défauts et des informations que le bloc de diagnostic peut fournir, trois situations peuvent être envisagées : l'accommodation, la

reconfiguration de la commande du système et la restructuration. Des définitions fondamentales de ces aspects ont été proposées par (Patton, 1997), (Staroswiecki et Gehin, 2001) et (Theilliol, 2003).

a) Accommodation du défaut

L'étape de reconfiguration définit simplement la commutation entre les différentes lois de commande. Cette étape est rapide et peut répondre à de fortes contraintes en temps réel. Cependant, la reconfiguration du contrôleur doit être effectuée pour tous les défauts possibles avant la mise en service du système et tous les contrôleurs résultants doivent être stockés dans le logiciel de contrôle.

L'idée de base de cette technique est la génération d'une nouvelle loi de commande afin de mettre le système hors de danger et d'affranchir la présence du défaut en adaptant en ligne les paramètres du régulateur ou en compensant une commande supplémentaire. Dans ce cas, la structure de la loi de commande n'est pas modifiée et seuls les défauts de faible amplitude sont pris en compte par l'accommodation. En général, cette technique représente un moyen simple mais bien établi de gérer les défauts sur la base de contrôleurs prédéfinis, chacun étant sélectionné hors ligne pour un défaut spécifique.

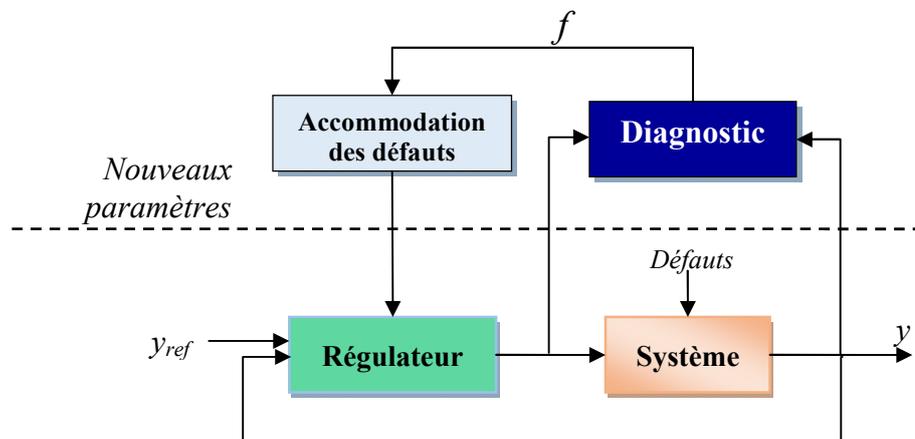


Figure 4.6: Accommodation du défaut

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de conception de stratégies d'accommodation de défauts : La méthode de la pseudo-inverse (Gao et Antsaklis, 1992), (Staroswiecki, 2005), la méthode de placement de structure propre (Andry et al., 1983), (Konstantopoulos et Antsaklis, 1996) et (Wang et Lin, 2000), la commande prédictive (Maciejowski, 1997a), (Gopinathan et al., 1999) et (Jamouli, 2003).

b) Reconfiguration

Si l'accommodation des défauts est impossible, la boucle de commande complète doit être reconfigurée. Donc, les approches dites de reconfiguration du système sont utilisées dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées en raison d'une haute gravité du défaut. Dans ces approches la structure du système à contrôler est modifiée de façon à compenser l'effet du défaut (utilisation de redondance matérielle, logicielle...).

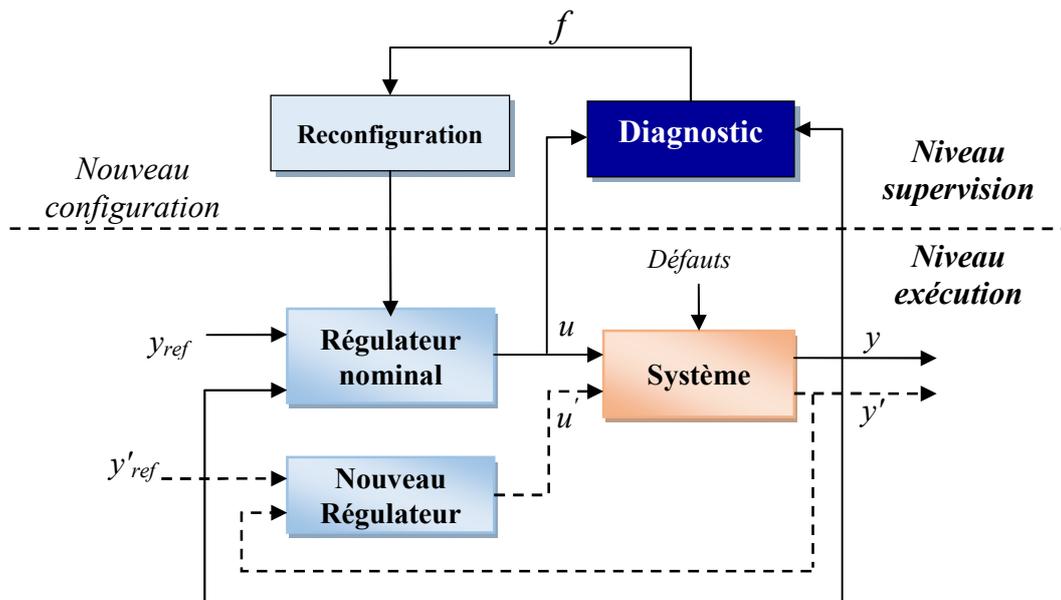


Figure 4.7 : Reconfiguration du système.

Contrairement à l'accommodation de défaut, cette technique utilise seulement les tâches de détection et de localisation du bloc de diagnostic, et n'a donc pas besoin de l'estimation de l'amplitude du défaut. L'avantage de ce type de commande réside dans la simplicité de commander le système sans tenir compte du type et de la forme du défaut. La reconfiguration du système est nécessaire quand des défauts graves se produisent et conduisent à des changements structurels profonds de la dynamique du système (Blanke et al., 2006).

c) Restructuration

La restructuration est utilisée dans le cas où le problème de commande n'a pas de solution avec l'accommodation et la reconfiguration (Oudghiri, 2008). Le principe est de synthétiser une nouvelle loi de commande en modifiant la structure et les paramètres de cette dernière (Staroswiecki et Gehin, 2001).

4.4.3 Différentes méthodes FTC actives

4.4.3.1 Méthode du pseudo inverse

Cette méthode est l'une des méthodes les plus mentionnées dans le domaine de commande active tolérante aux défauts (Huang et Stengel, 1990), (Staroswiecki, 2005) et (Blanke et al., 2006). Elle est caractérisée par sa simplicité de calcul et sa capacité de traiter une grande classe de défauts système, à condition qu'ils soient prédéfinis.

Soit le système en boucle fermée, dont le modèle nominal est défini par une représentation d'état de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A x + B u \\ y = C x \end{cases} \quad (4.1)$$

Avec $A \in \mathfrak{R}^{n \times r}$, $B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ et $C \in \mathfrak{R}^{q \times r}$ représentent les matrices du système dans le cas nominal.

Sous l'hypothèse que le vecteur d'état est connu, on considère que le système est commandé par un contrôleur par retour d'état $u = -k \cdot x$, $K \in \mathfrak{R}^{m \times n}$. Le système en boucle fermée est :

$$\begin{cases} \dot{x} = (A - BK) \cdot x \\ y = C x \end{cases} \quad (4.2)$$

L'apparition d'un défaut conduit à un changement du modèle. Le système en défaut est représenté de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_f = A_f x_f + B_f u_f \\ y_f = C_f x_f \end{cases} \quad (4.3)$$

L'idée de base de cette méthode est de modifier la loi de commande par retour d'état de telle sorte que la dynamique du système défaillant en boucle fermée soit approximativement égale à celle du système nominal en boucle fermée. Nous considérons une nouvelle matrice de gain K_f :

$$u_f = -K_f x_f \quad (4.4)$$

Telle que :

$$A - BK = A_f - B_f K_f \quad (4.5)$$

d'où :

$$K_f = B_f^+ (A_f - A + B K) \quad (4.6)$$

B_f^+ Étant la matrice pseudo inverse de B_f .

De façon générale, l'avantage de la méthode de pseudo-inverse est la simplicité du calcul mais la solution pouvant être obtenue n'est pas toujours satisfaisante car elle ne garantit pas la stabilité en mode défaillant. L'inconvénient majeur relatif de cette méthode réside dans le non garanti de la stabilité du système en boucle fermée. Afin de pallier ce problème, une méthode de pseudo-inverse modifiée a été proposée dans (Gao et Antsaklis, 1992) et (Staroswiecki, 2005).

4.4.3.2 Méthode par placement de structure propre

La méthode par placement de structure propre a été introduite initialement dans (Andry et al., 1983). Cette approche est plus intuitive que l'approche par pseudo-inverse. L'idée de base de cette méthode est d'assigner exactement les plus importantes valeurs propres de ces matrices, et au même temps de minimiser la différence entre les différents vecteurs propres correspondants. Cette méthode a été développée aussi bien avec une loi de commande par retour d'état (Zhang et Jiang, 1999), (Zhang et Jiang, 2000) qu'avec une loi de commande par retour de sortie (Konstantopoulos et Antsaklis, 1996).

Dans le cas de retour d'état, on définit λ_i et v_i , $i = 1, 2, \dots, n$, les valeurs propres de la matrice d'état du système en boucle fermée et les vecteurs propres correspondants respectivement. Le rôle est de calculer le nouveau gain de retour d'état K_r pour le modèle en défaut (4.3), solution du problème d'optimisation suivant :

$$\begin{cases} \text{Trouver } K_r & \text{tel que} \\ (A_f + B_f K_r)v_i^f = \lambda_i v_i^f & i = 1, 2, \dots, n \\ \text{et } v_i^f = \underset{v_i^f}{\text{arg min}} \|v_i - v_i^f\|_{W_i}^2 \end{cases} \quad (4.7)$$

Où

$$\|v_i - v_i^f\|_{W_i}^2 = (v_i - v_i^f)^T W_i (v_i - v_i^f) \quad (4.8)$$

W_i est une matrice de pondération définie positive servant de degré de liberté supplémentaire.

L'avantage de cette approche comparée à la méthode du pseudo inverse, réside dans le fait que la solution, si elle existe, assure la stabilité de la boucle fermée du système défaillant. En revanche, l'inconvénient vient du fait que les erreurs de modèles ne sont pas aisément incorporables dans le calcul d'optimisation (Zhang et Jiang, 1999).

4.4.3.3 Commande adaptative

La commande adaptative est une commande très appropriée pour résoudre le problème d'accommodation aux défauts de type interne. Ce type de commande a la capacité d'adapter automatiquement les paramètres du régulateur en fonction des changements dans le système. Par conséquent, un défaut interne agit sur le système provoque des variations des paramètres. L'identification en ligne de ces paramètres permet alors la modification des paramètres du régulateur à structure fixe. Une autre propriété de ce type de commande est l'absence de module de détection et de diagnostic des défauts. Un régulateur multi-variable adaptatif ajustant directement les gains du régulateur en temps réel a été proposé dans (Morio, 2009).

Dans (Kanev, 2004), les méthodes de commandes avec paramètres linéaires variant dans le temps ou *Linear Parameter Varying* (LPV) dédiées aux commandes tolérantes aux défauts sont incluses dans la classe des commandes adaptatives. D'autres méthodes adaptatives proposées dans (Landau, 1999), (Jiang et al., 2003), (Bošković et Mehra, 2003) et (Dionísio et al., 2003) illustrent les propos de la commande adaptative.

4.4.3.4 Commande prédictive

Le contrôle prédictif est une approche qui vous permet d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel pour anticiper le comportement futur du système. Le principe est de réadapter le correcteur en présence de défauts de manière à garantir la stabilité du système et à maintenir des performances très proches de celles du système nominal. Notons que la commande prédictive permet de gérer facilement les différentes contraintes de commande avec un nombre limité de paramètres de synthèse.

L'avantage de cette méthode dans le domaine de commande tolérante aux défauts est de pouvoir modifier en ligne les différentes contraintes de commande de façon à garantir un niveau de performance acceptable. Tout le potentiel de la commande prédictive à résoudre le problème de l'accommodation aux défauts a été montré dans (Maciejowski, 1997b), (Kerrigan et Maciejowski, 1999) et (Maciejowski et Jones, 2003).

4.4.3.5 Autres méthodes

- Ces dernières années, plusieurs méthodologies basées sur des techniques d'apprentissage par réseaux de neurones ont été proposées par la communauté intéressée à la commande tolérante aux défauts. Une approche permettant d'estimer le défaut en ligne à l'aide de réseaux de neurones a été présenté dans (Polycarpou et Helmicki, 1995). Cette estimation sert

à la fois au diagnostic et à l'accommodation aux défauts. Une procédure systématique pour la mise en œuvre d'un algorithme d'estimation non linéaire a été proposée dans ces travaux.

- Les méthodes d'accommodation des défauts basées sur la logique floue ont été appliquées à de nombreux systèmes non linéaires. Ces méthodes d'accommodation sont basées sur une commande floue adaptative permettant l'apprentissage en ligne de nouvelles dynamiques inconnues causées par l'apparition des défauts. Cette approche a l'avantage d'interagir avec des systèmes non linéaires et inclue des représentations multi-modèles où des fonctions d'interpolation qui sont synthétisées de telle manière que la dynamique du modèle représente au mieux la dynamique du système et donne la possibilité d'étendre de nombreux concepts théoriques de l'automatique linéaire au cas des systèmes non linéaires. Les travaux suivants représentent certaines applications des méthodes d'accommodation aux défauts basés sur la logique floue (Eryurek et Upadhyaya, 1995), (Lopez-Toribio et al., 2000) et (Liu et Dexter, 2001).

4.5 Commande tolérante aux défauts des systèmes à événements discrets

En général, peu d'études ont abordé le problème de la commande tolérante aux défauts dans le contexte des systèmes à événements discrets. L'idée de base des premières études repose sur deux aspects : la première est basée sur l'amélioration de la robustesse face aux défauts, des contrôleurs discrets (Ioradache et Antsaklis, 2004), et la deuxième est basée sur la sélection du contrôleur approprié pour chaque mode de fonctionnement (normal ou défaillant) à partir d'un ensemble de contrôleurs pré-synthétisés hors ligne, (Darabi et al., 2003).

Ensuite, (Xue et Zheng, 2005) ont proposé une approche de commande tolérante aux défauts des systèmes à événement discrets par l'utilisation des réseaux de Petri afin de modéliser le procédé et la commande. L'ensemble des contraintes à vérifier par la commande ont été reformulées en termes de marquages et de séquences d'événements interdits. La structure de la commande proposée comporte deux unités. La première est représentée par un contrôleur dont le rôle de ce dernier est de restreindre le fonctionnement du procédé de telle manière que seulement les marquages légaux puissent être atteints. Un estimateur d'état discret représente la deuxième unité qui permet d'estimer les états du système et générer des informations de diagnostic.

Par l'adaptation des techniques optimales et pour la synthèse de commandes tolérantes aux défauts, les auteurs (Dumitrescu et al., 2007) et (Park et Cho, 2009) ont défini deux types de performances: celles qui doivent être assurées en fonctionnement normal et celles relatives aux dysfonctionnements.

Par ailleurs, une définition de la tolérance aux défauts des systèmes à événements discrets a été proposée dans (Wen et al., 2008). Un système à événement discret est dit tolérant aux défauts, si tous ses comportements post-défaut sont identiques à ceux non défectueux après un nombre limité de séquence. Ainsi, un contrôleur est dit tolérant aux défauts, s'il est en mesure de forcer le système à maintenir ses performances post-défauts. Par la suite, les auteurs ont fourni une condition nécessaire et suffisante pour l'existence d'un contrôleur tolérant aux défauts. De même, (Wen, 2009) a proposé une approche de commande tolérante aux défauts conçue autour d'un module de recouvrement. Il détermine en particulier les entrées/sorties à mettre en fonctionnement, celles à arrêter, et les séquences d'opérations qui doivent être appliquées de façons à maintenir les performances désirées.

D'autre part, une commande tolérante aux défauts d'actionneurs a été proposée dans (Nke et Lunze, 2010), pour un système à événement discret modélisé à l'aide d'automates à état finis. L'idée est d'exploiter la redondance des états de l'automate afin de déterminer les séquences d'opération assurant le maintien des performances désirées.

4.6 Commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides

La conception d'une commande tolérante aux défauts pour les systèmes dynamiques hybrides est importante et mérite une enquête approfondie pour sa signification académique et pratique. La plupart des résultats existants sont consacrés à l'analyse et à la conception hors ligne, de sorte que le système dynamique hybride fonctionne bien comme prévu. Les défauts peuvent changer brusquement le comportement du système, la stratégie de commande tolérante aux défauts doit être appliquée en ligne pour maintenir la stabilité du SDH malgré les défauts. Il en résulte un grand défi théorique.

Dans la conception d'une commande tolérante aux défauts, nous nous soucions souvent sur les performances du système après l'application de la loi de commande tolérante aux défauts plutôt que dans le processus global du système, c'est-à-dire avant que le défaut ne se

produise, pendant la période de diagnostic des défauts et après l'application de la loi de commande tolérante aux défauts. En fait, les performances du système peuvent ne pas être satisfaisantes dans le processus global qui est cependant souvent acceptable. Ce n'est pas le cas des systèmes dynamiques hybrides. Étant donné que les conditions de stabilité de systèmes hybrides sont assez précises, le processus global du système doit toujours être pris en compte. Cela rend de nombreuses méthodes de commande tolérante aux défauts non applicables aux systèmes dynamiques hybrides.

À ce jour, peu de travaux se sont concentrés sur la synthèse des lois de commande tolérantes aux défauts appliquées aux SDH. La plupart des travaux dans ce domaine consiste à étendre les techniques de systèmes continus. Dans (Noura et al., 2000), sous contrainte d'occurrence de défauts simples, une proposition d'une approche de commande tolérante aux défauts qui vise à compenser séparément les pertes d'efficacité provoquées par la présence de défauts de capteurs et d'actionneurs. Suite à l'apparition d'un défaut de capteurs ou d'actionneurs, l'une des deux commandes additives à la commande nominale (situation sans défaut) est activée. Le calcul de cette dernière est effectué en ligne à l'aide de l'estimation de l'amplitude de défaut fournie par le bloc de diagnostic.

Dans le même cadre, une approche de commande tolérante aux défauts à base de retour de sortie pour une classe de système linéaire à commutation a été présentée par (Rodrigues et al., 2006). Les auteurs ont considéré uniquement les défauts d'actionneurs, mais ont dépassé le cas de présence de défauts simples. Une fois qu'un défaut apparaît, les lois de commande sont adaptées en ligne pour maintenir les valeurs propres de la boucle fermée dans une zone bien définie afin d'assurer une dynamique proche de celles imposées en fonctionnement normal.

Par la suite, (Yang et al., 2007b) ont proposé une approche de commande tolérante aux défauts à base d'observateurs pour une classe de systèmes non-linéaires à commutations. Le principe de base de cette stratégie est d'assurer la stabilité asymptotique en présence de défauts et la stabilité sortie-entrée de chaque sous-système en fonctionnement normal. Pour ce faire, un ensemble de lois de commutations a été établi qui garantissait la stabilité asymptotique du système global.

(Yang et al., 2009) ont proposé aussi une autre stratégie de commande tolérante aux défauts combinant les deux types de commande continu et à événements discrètes. L'objectif

est de garantir la stabilité de la partie continue du système dynamique hybride en présence de défauts affectant la partie continue et la reconfiguration de la partie discrète à l'aide d'une commande discrète, en présence d'un défaut affectant la partie discrète, de façon à maintenir les performances du système.

Lorsque l'évolution des modes du système est inconnue, un autre défi s'est posé pour identifier, à tout instant, le mode de fonctionnement actif pour maintenir les performances requises. Dans ce sens, les auteurs (Yang et al., 2007a) ont proposé une stratégie par l'adaptation de la structure générale de la commande tolérante aux défauts aux SDH en ajoutant un bloc d'identification de signal de commutation. Ce bloc est à base d'un banc d'observateurs. En effet, l'idée de base est inspirée des méthodes de diagnostic et elle repose sur la structuration des résidus générés par le banc d'observateurs de telle façon que l'estimation du mode actif soit sensible uniquement aux transitions discrètes et robuste aux défauts continus. Dans la même contexte, les auteurs (Xie et Chen, 2008) ont abordé le problème des retards de détections de commutations. Ils ont proposé une approche de commande tolérante aux défauts à base d'observateurs adaptatifs qui prend en compte ces retards. Cette méthode permet d'assurer la stabilité asymptotique et exponentielle des sous-systèmes et du système global. De même, une autre approche à base de la commande prédictive et un banc de filtres de Kalman a été proposée par (Prakash et al., 2010) pour une classe de SDH. (Belkhiat, 2011b) a proposé une approche préliminaire de synthèse de lois de commande tolérantes aux défauts de capteurs stabilisante via un retour d'état. Cette approche permet de préserver les performances nominales du système (situation non défaillante) en présence d'un défaut de capteurs. L'idée consiste à reconfigurer le retour d'état en remplaçant le vecteur d'état estimé à partir d'une sortie en défaut par un autre estimé à partir d'une sortie saine. La redondance des estimations est assurée dans cette approche par un banc d'observateurs hybrides robustes qui fournit plusieurs estimations correctes des vecteurs d'état et de sorties. (Du et al., 2015) ont proposé une commande active tolérante aux défauts pour les systèmes à commutation avec temporisation. Par l'utilisation d'un observateur de diagnostic de défaut, un algorithme adaptatif d'estimation de défaut a été proposé, qui peut estimer le signal de défaut rapidement et avec précision. Pendant ce temps, un critère dépendant du délai est obtenu dans le but de réduire le conservatisme de la conception d'observateur adaptatif.

4.7 Conclusion

Au cours de ce chapitre, une synthèse bibliographique générale sur la commande tolérante aux défauts des systèmes a été présentée pour justifier les choix et l'orientation de cette thèse. Dans un premier temps, nous avons présenté un système tolérant aux défauts, son objectif ainsi sa structure de base. Dans un second temps, nous avons rappelé une synthèse bibliographique de méthodes existantes.

La classification de ces méthodes de commandes tolérantes aux défauts, permet d'effectuer un état de l'art regroupant toutes les méthodes des systèmes, qu'ils soient continus, à événements discrets ou hybrides, citées dans la littérature. Les deux principales classes des méthodes existantes de commande tolérante aux défauts ont été rappelées : les méthodes passives et les méthodes actives. Les méthodes passives sont basées sur des techniques de conception d'une loi de commande robuste. En revanche, les méthodes actives permettent de faire face à des défauts imprévus mais nécessitent un module de diagnostic et une commande reconfigurable.

Bien que nous avons cité différentes méthodes utilisées pour la commande tolérantes aux défauts, tels que; les méthodes adaptatives, les méthodes prédictives, les méthodes à base des réseaux de neurones et les méthodes utilisant logique floue. Ces deux dernières méthodes feront l'objectif de la deuxième partie de travail dans cette thèse, dans le but de modéliser, la dynamique des systèmes, cela permet de réaliser une stratégie de diagnostic et de commande tolérante aux défauts efficace.

Malgré les progrès réalisés dans le domaine de surveillance, la commande tolérante aux défauts reste des domaines de recherche active. Dans le chapitre suivant, nous présentons des applications proposés des stratégies de surveillance et de commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides.

Partie II

APPLICATIONS ET RESULTATS

CHAPITRE V

METHODOLOGIES DE DIAGNOSTIC ET DE
TOLERANCE AUX DEFAUTS DES SDHs

5. Méthodologies de diagnostic et de tolérance aux défauts des SDHs

5.1 Introduction

Ce chapitre est dédié au développement d'une approche de diagnostic et commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides. La contribution principale consiste à l'élaboration des systèmes de diagnostic et la mise en œuvre des lois de commande tolérante aux défauts appliqués aux SDHs. Le choix d'une méthode de diagnostic doit prendre en compte plusieurs critères différents : une faible complexité, la robustesse (pas de fausses alarmes ni d'alarmes manquantes), la rapidité en diagnostic (temps de détection faible) et aussi, être réalisable en temps réel (Philippot, 2006).

Les systèmes réels sont généralement des systèmes de dynamique hybride. De plus, l'interaction entre les deux aspects a rendu la modélisation plus difficile. Pour cela, la recherche des méthodes de modélisation, de diagnostic et de commande capables de prendre en compte à la fois la dynamique continue et discrète ainsi que leur interaction est devenue une nécessité.

C'est dans ce contexte que s'inscrit l'objectif de ce travail, il s'intéresse à l'utilisation d'un module combinant les systèmes Neuro-Flou et l'automate hybride pour la surveillance et la commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides. Un tel choix permettra l'obtention d'une représentation hybride optimale, dans laquelle la partie continue sera représentée par des modèles Neuro-Flou, d'autre part, l'automate à états finis garantira également que la partie discrète du système est parfaitement représentée et modélisée.

Dans un système dynamique hybride, les changements des événements discrets affectent la dynamique continue et peuvent réinitialiser les variables d'état, par conséquent, le diagnostic des défauts doit faire face à l'évolution de la dynamique continue dans chaque mode discret afin de construire un module de diagnostic capable d'identifier les défauts affectant les deux dynamiques continue et discrète.

Les défauts affectent la dynamique continue du système se caractérisent par des modifications anormales de certains paramètres du système; alors que les défauts discrets affectent la dynamique discrète du système et sont considérés comme l'occurrence d'événements discrets non observables. Dans les deux cas, ils entraînent une modification imprévue et anormale de la configuration du système.

Par conséquent, une classe des défauts connus peut être introduite, en introduisant des paramètres dans le modèle du système par des événements de défaut explicites ou/et des modes de défaut.

L'intérêt de cette section est de construire un module de diagnostic, appelé diagnostiqueur, appliqué au système dynamique hybride capable de détecter et de localiser l'apparition des défauts affectant les deux comportements, continu ou discret, du système.

5.2 Développement d'un système de diagnostic à base de Neuro-Flou appliqué aux SDHs

5.2.1 Diagnostic à base de modèle

Le diagnostic à base de modèle est largement présent dans la littérature pour des applications industrielles. Ce type de diagnostic est basé sur la génération d'indicateurs de défauts, appelés résidus, qui représente la comparaison du comportement observé et du comportement attendu (prédit par un modèle) du système. Tout écart entre les observations et les valeurs prédites est interprété comme la présence d'une anomalie survenue suite à un ou plusieurs défauts ou à des perturbations.

Dans cette partie de travail, nous nous intéresserons aux méthodes *FDI* (*Fault Detection and Isolation*). Ce type de méthodes est réalisé en deux étapes : une étape de génération des résidus, suivie d'une étape d'analyse et évaluation des résidus grâce à un système de décision.

5.2.1.1 Génération de résidus

L'étape de génération de résidus représente le problème fondamental du diagnostic basé sur un modèle. Le principe de cette étape est de générer l'écart entre les mesures issues du système et les mesures théoriques issus du modèle dans des conditions de fonctionnement normal (sans perturbation). Le résidu obtenu devrait être proche de zéro (pas de défauts).

Dans le cas contraire, en présence de défauts, la valeur de ce résidu sera non nulle. Les résidus contiennent des informations sur les dysfonctionnements ou les anomalies du système à surveiller.

5.2.1.2 Analyse et évaluation des résidus

Le but de cette étape est la détection et la localisation d'un ou plusieurs défauts dans le procédé et, éventuellement, l'identification de l'élément défectueux. Cette étape permet donc de classer une infinité des comportements potentiels des résidus dans plusieurs classes qui représentent différentes situations de défaut. Nous parlons de localisation lorsque nous sommes, en mesure, de préciser la nature du ou des défauts survenant.

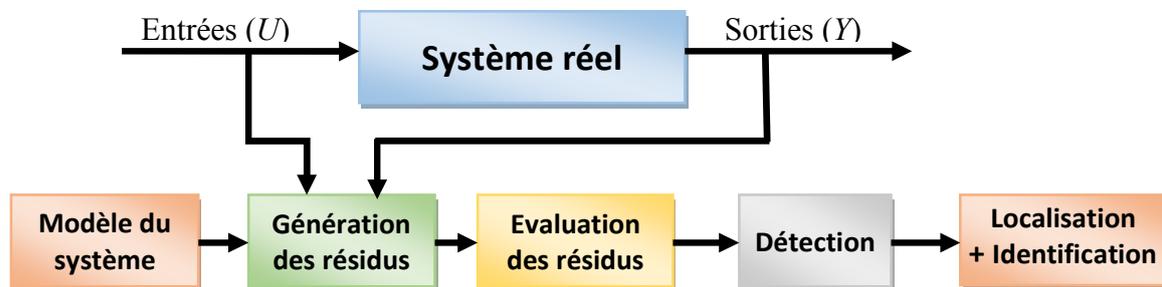


Figure 5.1 : Principe des méthodes de diagnostic avec modèle.

5.2.2 Diagnostic à base de modèle Neuro-Flou

Le principal inconvénient des méthodes analytiques utilisées dans le diagnostic est la nécessité d'un modèle mathématique précis. En revanche, le modèle mathématique introduit souvent peut être très sensible aux erreurs de modélisation, à la variation des paramètres et aux perturbations. Pour surmonter les difficultés liées à l'utilisation de modèles mathématiques, il est très important de choisir des algorithmes *FDI* les plus applicables aux systèmes réels.

L'utilisation des modèles Neuro-Flou pour le diagnostic industriel permet de modéliser des processus non linéaires et de manipuler la connaissance numérique et symbolique d'un système (Achbi, 2012). Les modèles Neuro-Flous sont nés de l'association des deux techniques d'intelligence artificielle, les réseaux de neurones et la logique floue, afin de tirer profit de ces deux technologies. Lors de l'utilisation de modèles Neuro-Flou dans le diagnostic, on parle d'un diagnostic à base de modèle Neuro-Flou.

5.2.2.1 Modèles Neuro-Flou pour la génération des résidus

De façon générale, l'idée de la génération de résidus reste la même pour les modèles analytiques. Il consiste à comparer les sorties du procédé à leurs estimées, mais dans ce cas, les estimées sont calculées par un modèle Neuro-Flou, comme le montre sur la figure 5.2.

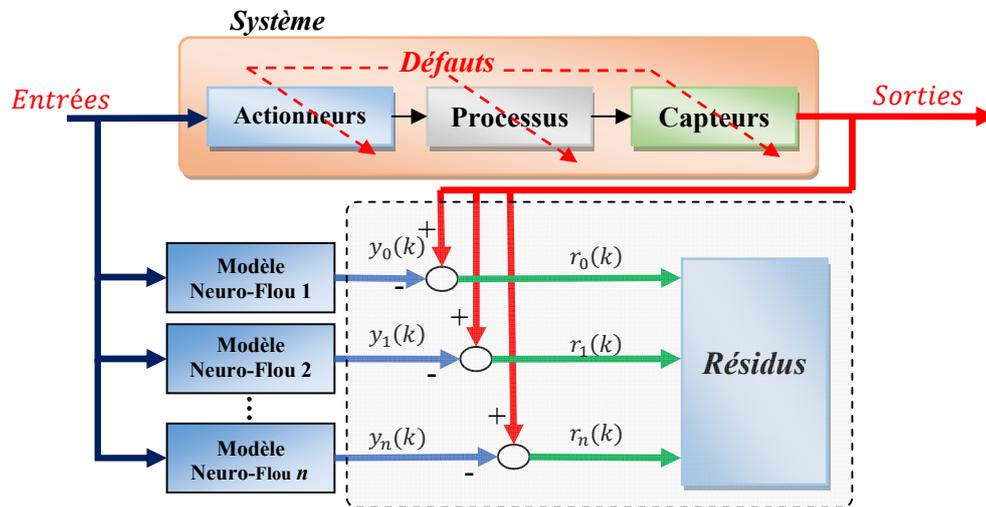


Figure 5.2 : Génération des résidus Neuro-Flou.

Récemment, plusieurs applications de systèmes basés sur des architectures Neuro-Flou ont été développées pour la modélisation de systèmes industriels. Une architecture connue sous le nom « ANFIS » a prouvé son efficacité pour la modélisation de systèmes non linéaires complexes. Le modèle « ANFIS » permet d'intégrer les connaissances issues de données réelles dans la phase d'apprentissage de réseaux de neurones et les connaissances de l'expertise, exprimées sous forme de règles floues, permettent d'ajuster les paramètres de la structure globale du modèle utilisé.

- **Définition et structure**

L'ANFIS est un réseau adaptatif proposé par (Jang, 1993). Ce système peut être vu comme un réseau de neurones non bouclé pour lequel chaque couche est un composant d'un système flou.

L'ANFIS est le modèle le plus utilisé en pratique et il comporte cinq couches. Le concept de structure ANFIS peut être représenté à l'aide d'une base de règles simple, définie comme suit :

$$\text{Règle1: Si } x \text{ est } A_1 \text{ et } y \text{ est } B_1, \text{ Alors } y_1 = f_1(x, y) = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (5.1)$$

$$\text{Règle2: Si } x \text{ est } A_2 \text{ et } y \text{ est } B_2, \text{ Alors } y_1 = f_2(x, y) = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (5.2)$$

A_1, A_2, B_1 et B_2 sont les ensembles flous qui représentent des valeurs linguistiques des entrées x et y , respectivement et p_1, q_1, r_1 et p_2, q_2, r_2 sont des paramètres de conception également déterminés au cours du processus d'apprentissage.

Couche 1: Les nœuds de cette couche représentent des nœuds d'entrée et sont également appelés nœuds adaptatifs. Le niveau d'appartenance est généré par les nœuds de cette couche à l'aide de fonctions:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1,2 \quad (5.3)$$

Couche 2: Chaque nœud de cette couche est un nœud fixe portant l'étiquette Π et qui multiplie les signaux entrants et génère le produit w_i . La sortie de chaque nœud de cette couche représente le poids d'une règle.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1,2 \quad (5.4)$$

Couche 3: Cette couche contient des nœuds fixes étiquetés N qui permettent de calculer le rapport entre le poids de la règle et la somme des poids de toutes les règles, également ce rapport \bar{w}_i est appelé le poids normalisée de la règle:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1,2 \quad (5.5)$$

Couche 4: Cette couche contient les nœuds adaptatifs. La sortie de chaque nœud est simplement le produit du poids normalisé avec un polynôme de premier ordre. Les sorties de la couche 4 sont définies par:

$$O_i^4 = \bar{w}_i \times f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1,2 \quad (5.6)$$

Où \bar{w}_i est la sortie de la couche 3 et p_i, q_i et r_i sont des paramètres linéaires du SFIM du premier ordre, qui sont appelés paramètres conséquents.

Couche 5: Il n'y a qu'un seul nœud dans cette couche. C'est un nœud fixe qui est étiqueté Σ . Comme son étiquette l'indique, il effectue la somme de tous les signaux entrants. Par conséquent, la sortie globale du modèle est définie par :

$$O_i^5 = f = \sum_i \bar{w}_i \times f_i \quad i = 1,2 \quad (5.7)$$

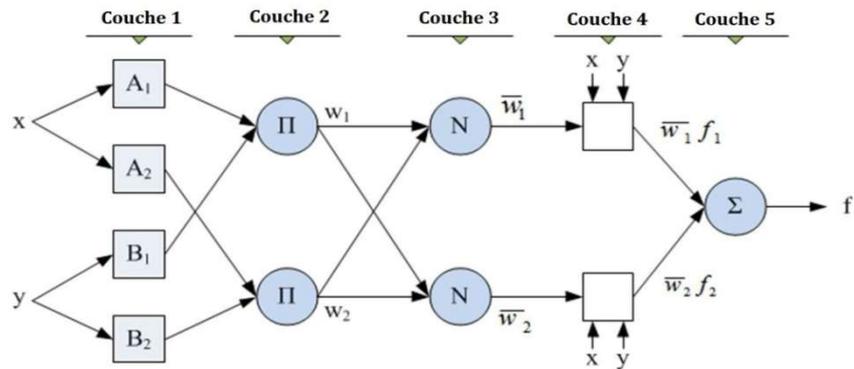


Figure 5.3 : Structure de modèle Neuro-Flou adaptatif ANFIS.

Le système ANFIS applique le mécanisme d'apprentissage des réseaux neurone sur des techniques d'inférence floues. En d'autres termes, l'ANFIS est un système d'inférence floue dont les paramètres des fonctions d'appartenances sont ajustés en utilisant l'algorithme d'apprentissage rétro-propagation, en combinaison avec les algorithmes de moindres carrés.

5.2.2.2 Modèle flou pour l'évaluation des résidus

L'évaluation des résidus est un processus de prise de décision logique qui transforme les connaissances quantitatives à des états qualitatives. Il peut également être considéré comme un problème de classification. Une variété d'approches et de techniques bien établies (seuil, seuil adaptatif, méthodes statistiques et de classification) peuvent être utilisées pour l'évaluation des résidus.

Parmi ces approches, les méthodes basant sur la logique floue sont très attractives et les plus fréquemment utilisées dans les méthodes *FDI*. Il y a trois principales approches dans le processus de décision : le seuil adaptatif flou, la classification floue et le raisonnement flou.

La logique floue se définit comme une description mathématique d'un processus basée sur la théorie des ensembles flous développée en 1965 par (Zadeh, 1965). On peut dire aussi que la logique floue est un outil qui permet la représentation des connaissances sous une forme proche du langage naturel. C'est-à-dire, cet outil se propose de remplacer les variables booléennes de la logique classique par des variables floues.

Les modèles flous peuvent être considérés comme des modèles logiques qui utilisent une représentation de la connaissance sous forme des règles du type « Si ... Alors... ». Ce type des règles permet d'établir des relations qualitatives entre les variables d'entrée et de sortie du système.

• Raisonnement flou

L'avantage principal du raisonnement flou, est qu'il peut principalement introduire des informations heuristiques dans le schéma d'analyse. Les schémas des raisonnements flous sont aussi faciles à comprendre, car ils sont très similaires à la manière avec laquelle les humains résolvent des problèmes d'analyse. L'idée de base est d'utiliser l'inférence floue pour l'analyse des résidus, vient du fait que chaque résidu est zéro, positif ou négatif par rapport à un certain degré. Un schéma flou comporte trois étapes :

- **La fuzzification** : C'est la transformation des valeurs données brutes en des valeurs d'entrée floues. Pour cela, on détermine pour chaque entrée et sortie sa fonction d'appartenance floue.
- **L'inférence** : Cette étape fait la détermination de la base des règles qui sont formées pour déterminer les conditions sous lesquelles le défaut existe et sous lesquelles le système est non défaillant. Si les règles ne reflètent pas l'expérience d'un opérateur, alors elles peuvent être difficilement validées.
- **La défuzzification** : C'est la construction de valeurs de sorties brutes à partir des ensembles d'inférence. La sortie du processus de la décision logique, est une valeur qui donne le degré avec lequel un défaut est présent dans le système, plutôt qu'un constat simple de défaut/non défaut. Le degré peut être une indication aussi bien de la taille du défaut présent, que de la certitude avec laquelle un défaut est présent dans le système. Une telle sortie est donnée pour chaque défaut considéré.

La figure 5.4 illustre le schéma général de diagnostiqueur proposé. L'idée de ce dernier est basée sur l'utilisation des modèles Neuro-Flou de type ANFIS permet de générer des résidus afin d'être analysés et évalués grâce à un module de raisonnement flou. La limitation de cette technique proposée est qu'on peut garantir un meilleur diagnostic des défauts affectant un système dynamique hybride sans l'estimation de mode.

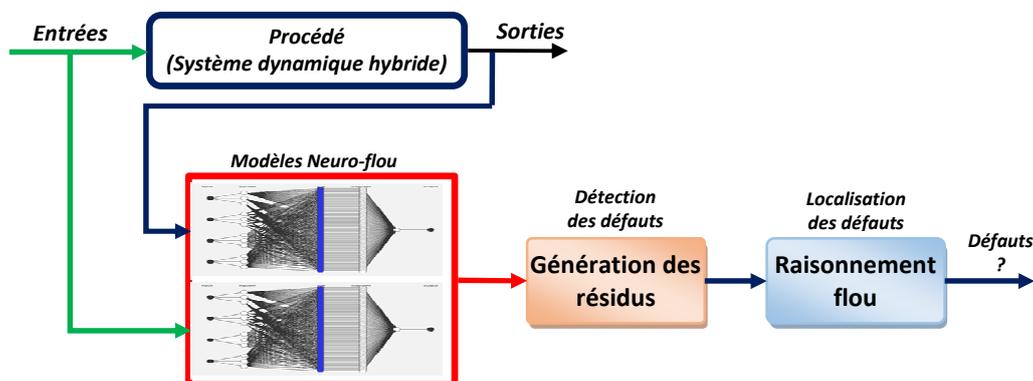


Figure 5.4 : Diagnostiqueur basé sur les modèles Neuro-Flou.

5.2.3 Application 1

Afin d'illustrer nos résultats, nous proposons un exemple académique qui sert de support à la validation de la méthode proposée. Le système hydraulique considéré est inspiré d'un benchmark défini par l'AS193 «diagnostic et supervision des systèmes dynamiques hybrides» (Cocquempot, 2004).

Le système étudié est un système hybride à saut et à dynamique non linéaire possédant plusieurs variables, continues et événementielles. Les variables événementielles sont générées par le changement supposé instantané des états des vannes et des pompes, cela nous conduit à des variables tout ou rien ou booléennes. La combinaison entre ses variables aboutit à un nombre maximum de modes égales 32 modes possibles, mais pour des raisons simplificatrices, nous allons considérer quatre modes seulement.

5.2.3.1 Présentation du système

Considérons un système hydraulique, représenté par la figure 5.5. Ce système est composé de deux réservoirs cylindriques de section identique $S = 0.0154 \text{ m}^2$ reliées par les conduites C_2, C_3 placées respectivement aux niveaux $h = 0 \text{ m}$ et $h = 0.5 \text{ m}$ et équipées des vannes V_2 et V_3 . Les conduites C_1 et C_4 munie des vannes V_1 et V_4 permettent l'évacuation du liquide pour l'utilisation. Une pompe P_1 est utilisée pour commander le débit Q_{p1} affectant le niveau de réservoir 1. Deux capteurs de niveau mesurant les niveaux h_1 et h_2 dans les deux réservoirs.

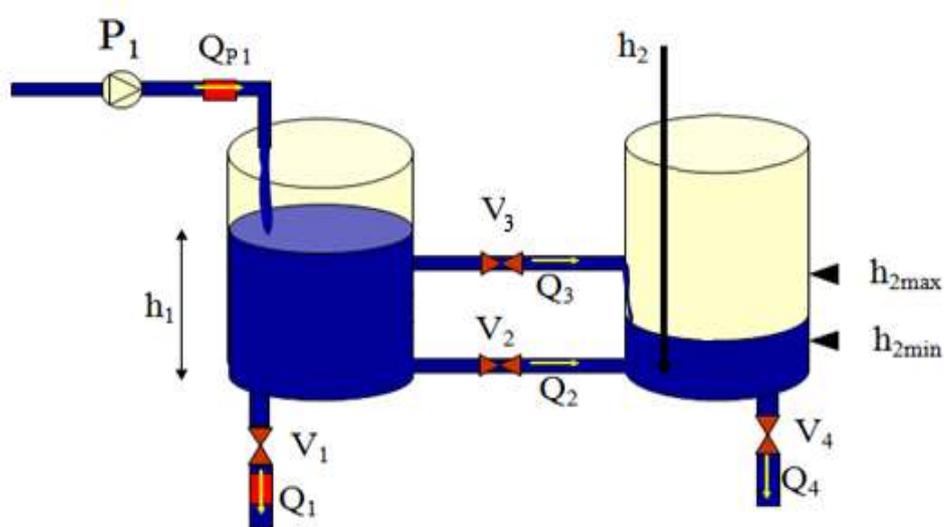


Figure 5.5 : Le système hydraulique à deux bacs.

Pour simplifier l'étude, on suppose que les vannes V_1 , V_2 et V_3 restent constamment ouvertes. La pompe est commandée de manière à maintenir h_2 dans un intervalle fixé. Le débit de la pompe est nul lorsqu'elle est à l'arrêt. Lorsqu'elle fonctionne le débit $Q_{p1} = Q_0 = 0.001 \text{ m}^3/\text{h}$. La logique de la pompe est comme suit :

- La pompe est initialement en marche.
- Elle est arrêtée lorsque $h_2 \geq 0.2\text{m}$.
- Elle est mise en marche lorsque $h_2 \leq 0.1\text{m}$.

La vanne V_4 est manuelle et 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). Quatre 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.

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

$$\begin{cases} Q_1(t) = A_1 \cdot \sqrt{2g \cdot h_1(t)} \\ Q_2(t) = A_2 \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1(t) - h_2(t)|} \\ Q_4(t) = A_4 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2(t)} \end{cases} \quad (5.8)$$

Avec les sections des conduites $C_i (i = 1, \dots, 4)$ sont identiques,

$$A_1 = \dots = A_4 = 3.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2, g = 9.81 \text{ m/s}^2.$$

Q_3 peut être donné par trois expressions en fonction du niveau du liquide dans les réservoirs :

$$Q_3 = \begin{cases} A_3 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1(t) - h(t))} & \text{si } h_1 \geq h \text{ et } h_2 < h \\ -A_3 \cdot \sqrt{2g \cdot (h_2(t) - h(t))} & \text{si } h_1 < h \text{ et } h_2 > h \\ A_3 \cdot \text{sign}(h_1(t) - h_2(t)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |h_1(t) - h_2(t)|} & \text{si } h_1 \geq h \text{ et } h_2 > h \end{cases} \quad (5.9)$$

Pour simplifier l'écriture, nous réécrivons $Q_3(t)$ par l'expression suivante :

$$Q_3(t) = A_3 \cdot \text{sign}(H_1(h_1) - H_2(h_2)) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot |H_1(h_1) - H_2(h_2)|} \quad (5.10)$$

Où H_1, H_2 sont respectivement des fonctions de h_1 et h_2 :

$$H_1(h_1) = \begin{cases} 0 & \text{si } h_1 < h \\ h_1 - h & \text{si } h_1 \geq h \end{cases}; \quad H_2(h_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } h_2 < h \\ h_2 - h & \text{si } h_2 \geq h \end{cases} \quad (5.11)$$

Les expressions des débits deviennent :

$$\begin{cases} Q_1 = A \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_1} \\ Q_2 = A \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|h_1 - h_2|} \\ Q_3 = A \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{|h_1 - h|} \\ Q_4 = A \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{h_2} \end{cases} \quad (5.12)$$

Ce système comporte deux types d'événements :

Événements contrôlés : Ces événements sont associés aux commandes Tout ou Rien des vannes. Les événements e_1 et e_2 permettent d'ouvrir et de fermer la vanne V_4 à l'instant $t = 240$ s et à l'instant $t = 380$ s, respectivement.

Événements spontanés : Ces événements sont internes ou autonomes. Ils sont générés lorsque h_1 et h_2 dépasse ou non le niveau d'eau dans les réservoirs. La pompe est mise en marche lorsque $h_2 = h_{2min} = 0.1m$. La pompe est arrêtée lorsque $h_2 = h_{2max} = 0.2m$.

L'automate hybride représentant le système en fonctionnement normal est donné par ses quatre modes selon l'état de C_3 (V ou P) et l'état de V_4 (F ou O) :

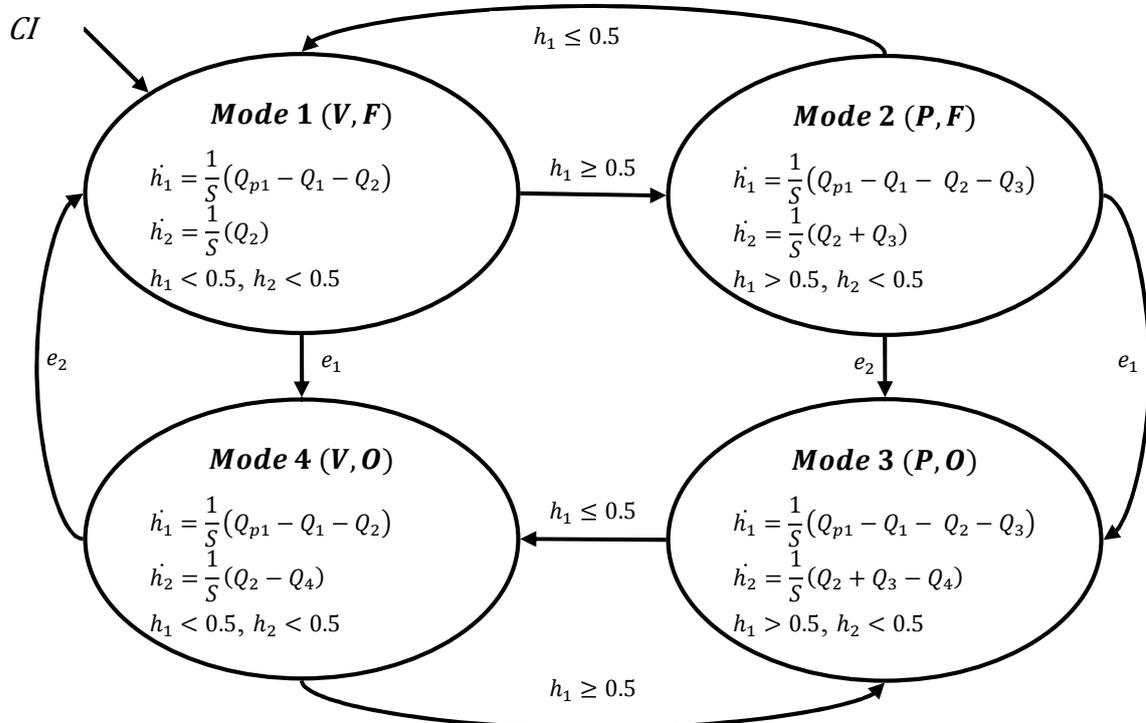


Figure 5.6 : Automate hybride.

Le modèle ainsi conçu représente une version réduite du comportement global du système.

5.2.3.2 Simulation de bon fonctionnement du système

La simulation est réalisée sur un horizon de temps égal à 500 s, avec les conditions initiales suivante : $h_{1,0} = 0.4 \text{ m}$ et $h_{2,0} = 0 \text{ m}$. Les niveaux des liquides h_1 et h_2 sont donnés par la figure 5.7.(a). L'évolution des modes, autrement dit le chronogramme des modes est donné par la figure 5.7.(b) où chaque mode est associée à une dynamique continue propre.

L'automate génère alors le passage d'un mode à l'autre par l'intermédiaire des mesures et en prenant en compte l'ensemble des événements contrôlés et spontanés générés par le système.

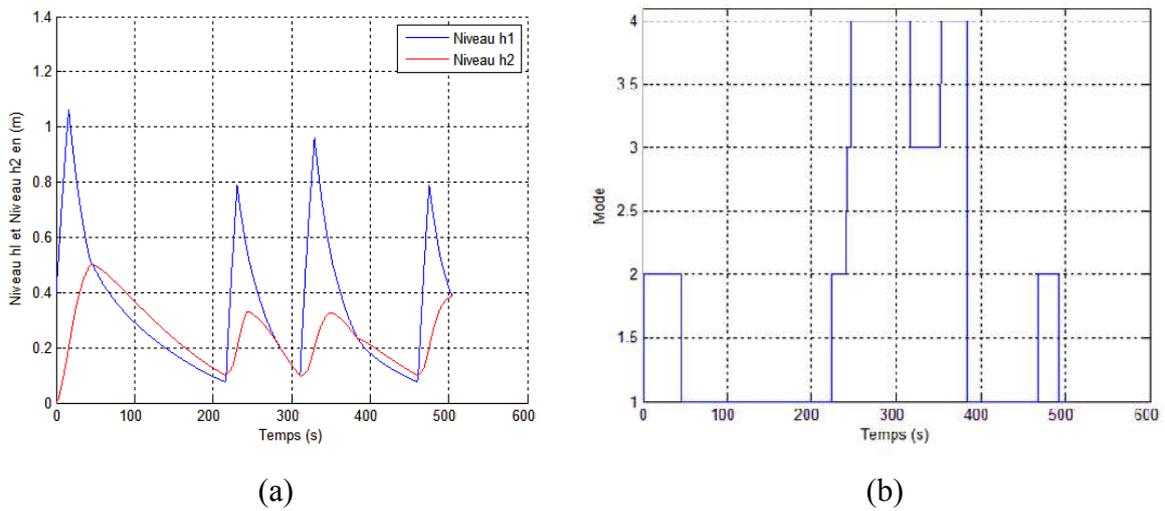


Figure 5.7 : (a) L'évolution des niveaux h_1 et h_2 , (b) L'évolution des modes.

5.2.3.3 Modélisation du système (génération des résidus) à base modèles Neuro-Flou

Suivant le fonctionnement et l'architecture du système et après plusieurs essais, le modèle choisi est composé de deux réseaux ANFIS :

$$\hat{h}_1(k) = F_1(Q_{p1}(k-1), Q_{p1}(k-2), h_1(k-1), h_1(k-2)) \quad (5.13)$$

$$\hat{h}_2(k) = F_2(Q_{p1}(k-1), Q_{p1}(k-2), h_2(k-1), h_2(k-2)) \quad (5.14)$$

Où h_1 et h_2 sont les deux sorties du système, \hat{h}_1 et \hat{h}_2 sont respectivement la sortie estimée de h_1 et h_2 et Q_{p1} : L'entrée du système.

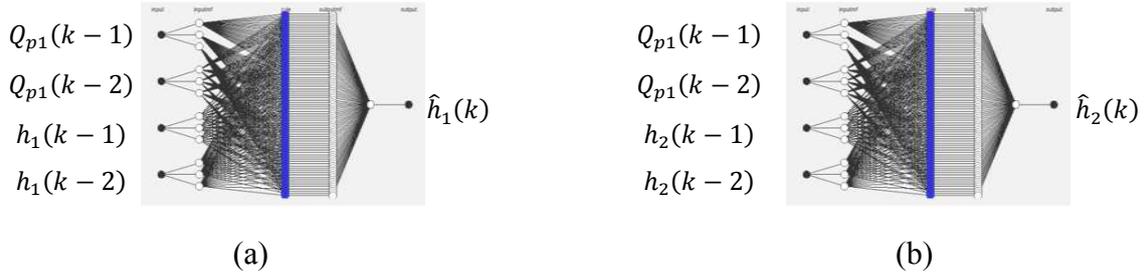


Figure 5.8 : (a) Réseau ANFIS 1 (Sortie \hat{h}_1), (b) Réseau ANFIS 2 (Sortie \hat{h}_2).

La figure 5.9 représente la dynamique des sorties h_1, h_2 réelles et estimées.

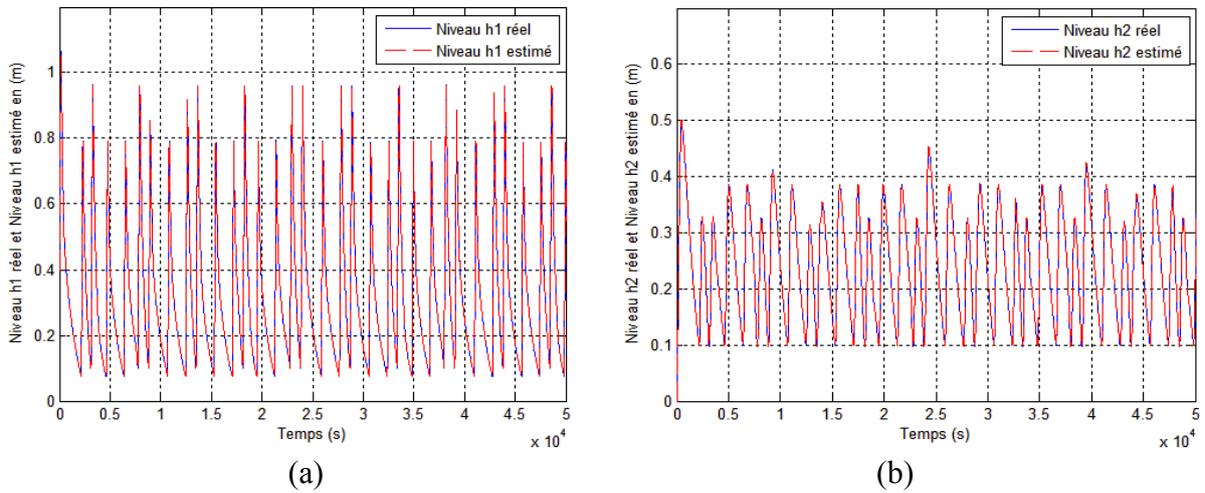


Figure 5.9 : (a) La sortie h_1 réelle et estimée, (b) La sortie h_2 réelle et estimée.

Les résidus sont illustrés par la figure 5.10 (en absence de défauts).

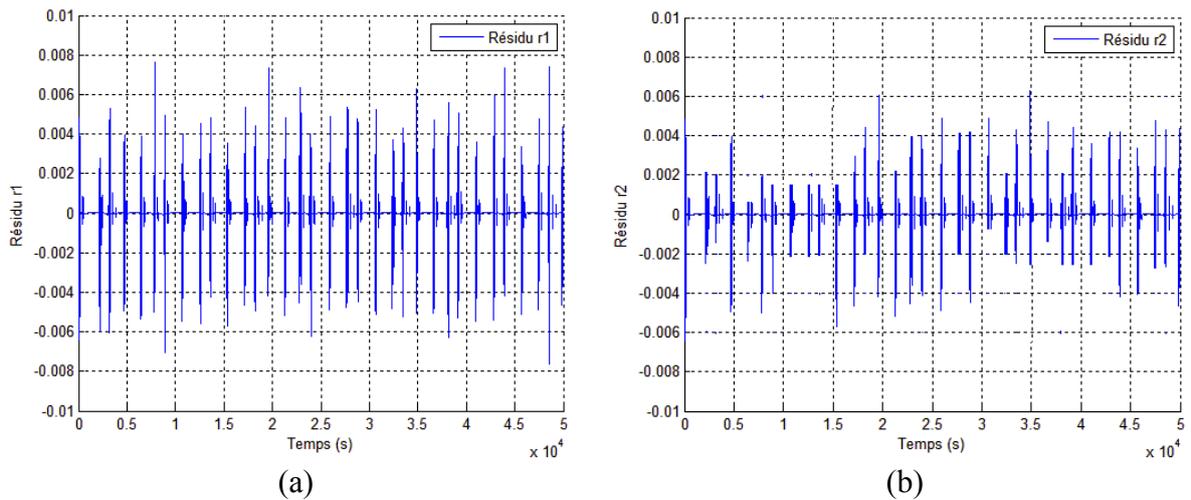


Figure 5.10 : (a) Comportement de résidu r_1 , (b) Comportement de résidu r_2 .

Donc, cette étape permet de générer les résidus afin d'être analysés. Ces résidus sont obtenus en comparant les sorties mesurées et les sorties estimées. En absence de défaillances, ce résidu doit fluctuer autour de zéro.

5.2.3.4 Simulation des scénarios des défauts

Une fois les résidus sont générés; il faut passer à la deuxième étape qui est l'évaluation des résidus. Pour cela, des scénarios des défauts ont été proposés et simulés afin de valider la fiabilité du système du diagnostic.

a) Défauts capteurs :

Nous considérons des scénarios des défauts, notés f . On suppose qu'on a deux capteurs de niveau mesurant les niveaux h_1 et h_2 dans les deux réservoirs.

$$\begin{cases} y_1 = h_1 & \text{capteur de mesure de } h_1. \\ y_2 = h_2 & \text{capteur de mesure de } h_2. \end{cases} \quad (5.15)$$

On suppose que ces deux capteurs subissent des biais dans leurs mesures, c'est-à-dire on considère deux défaillances f_1 et f_2 respectivement pour les deux capteurs de h_1 et h_2 . De ce fait, les équations de mesure deviennent :

$$\begin{cases} y_1 = h_1 + f_1 \\ y_2 = h_2 + f_2 \end{cases} \quad (5.16)$$

- **Défaut f_1** : Nous simulons le défaut capteur f_1 d'une perte d'efficacité de 20%, introduit sur le capteur h_1 pendant l'intervalle de temps [100s - 150s].
- **Défaut f_2** : Aussi, nous simulons le défaut capteur f_2 d'une perte d'efficacité de 40%, introduit sur le capteur h_2 pendant l'intervalle de temps [400s - 450s].

b) Défauts actionneurs :

On suppose une autre défaillance de type actionneur affectant l'efficacité de la pompe. Cette défaillance système influence les équations différentielles. Plusieurs défauts et différents scénarios peuvent d'être simulés mais il n'était pas nécessaire de les inclure.

$$\begin{cases} S.\dot{h}_1 = Q_{p1} - Q_1 - Q_2 - Q_3 - f_3 \\ S.\dot{h}_2 = Q_2 + Q_3 - Q_4 \end{cases} \quad (5.17)$$

- **Défaut f_3** : Un défaut actionneur f_3 représenté par une perte d'efficacité de 10% de la pompe P_1 pendant l'intervalle de temps [310s - 330s].

Tableau 5.1 : Les défauts simulés.

Défaut	Désignation	Apparition de défaut	Perte de l'efficacité
f_1	Capteur h_1	[100 – 150]	20%
f_2	Capteur h_2	[400 – 450]	40%
f_3	Actionneur P_1	[310 – 330]	10%

La figure 5.11 illustre l'effet des trois défauts sur le comportement du système.

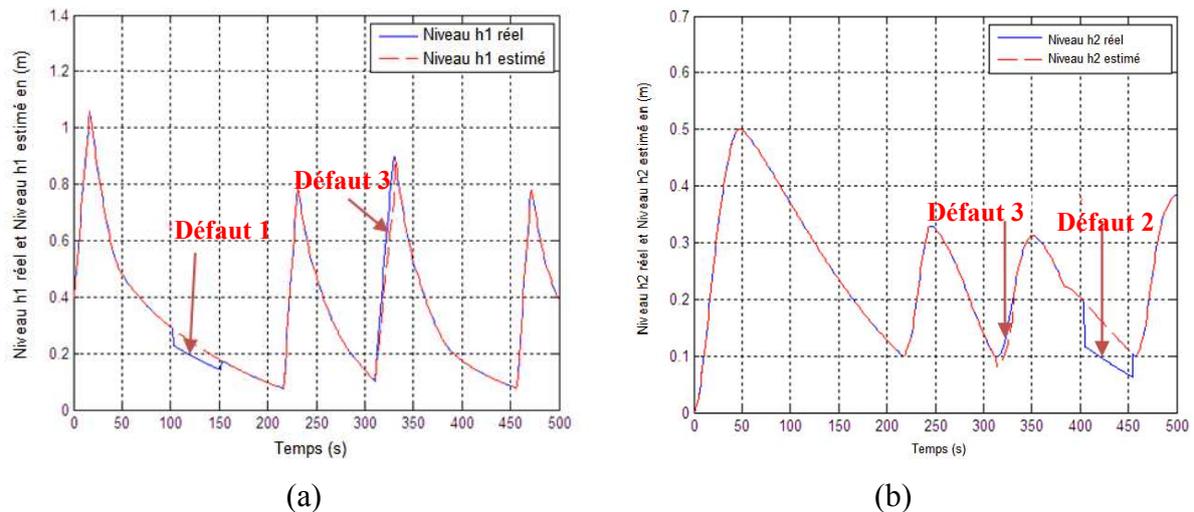


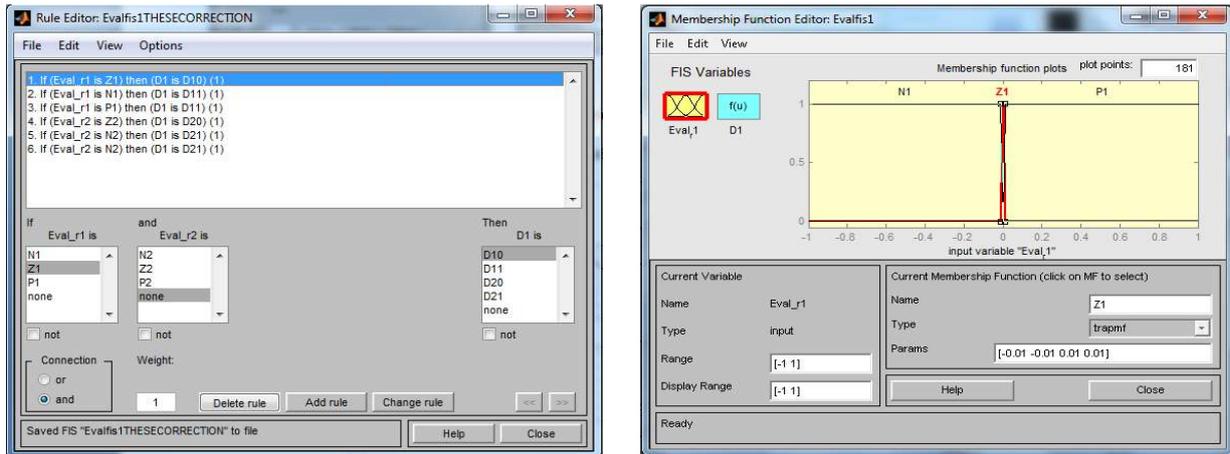
Figure 5.11 : (a) La sortie h_1 réelle et estimée, (b) La sortie h_2 réelle et estimée.

5.2.3.5 Analyse et évaluation des résidus à base un modèle flou

Nous avons proposé un modèle de raisonnement flou, afin d'identifier les défauts. On a choisi pour chaque résidu trois fonctions d'appartenance : deux fonctions de type trapézoïdale et une de type triangulaire, pour le choix de leurs paramètres on a effectué de nombreux essais en présence de plusieurs défauts différents.

Tableau 5.2 : Fonctions d'appartenance des résidus.

	Résidu 1	Résidu 2
N	[-1 - 1 - 0.011 - 0.011]	[-1 - 1 - 0.0021 - 0.0021]
Z	[-0.01 - 0.01 0.01 0.01]	[-0.002 - 0.002 0.002 0.002]
P	[0.011 0.011 1 1]	[0.0021 0.0021 1 1]

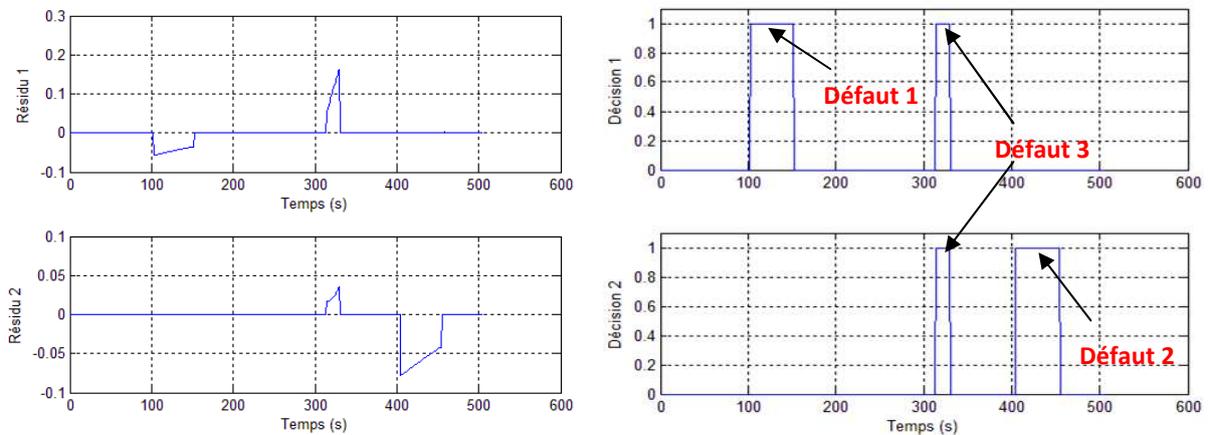


(a)

(b)

Figure 5.12 : (a) Fuzzification des résidus, (b) Inférence (Règles floues).

Ensuite, nous allons analyser les résidus flous obtenus précédemment à l'aide des règles de type « si..., alors... ». Exemple : Si le Résidu 1 est Z_1 , alors $D_1 = 0$. (Système non défaillant).



(a)

(b)

Figure 5.13 : (a) Les résidus, (b) Les décisions.

5.2.3.6 Résultats et discussions

La figure 5.13.(a) illustre l'évolution de l'indicateur de défauts. Cette figure montre clairement que le résidu généré s'éloigne notablement de zéro suite à l'apparition de défauts brusques. Le comportement du système de décision est illustrée par la figure 5.13.(b). Cette figure montre que la décision prend la valeur 1 dès l'apparition de défaut.

En analysant ces deux figures, on peut observer que le mécanisme de diagnostic est activé en présence de défauts. Nous avons réalisé d'autres tests pour montrer la capacité de cette stratégie de diagnostic à reconnaître tous les défauts possibles affectant le système. Donc, nous pouvons constater que les résultats de diagnostic des défauts sont satisfaisants car l'apparition des défauts est bien détectée et localisée et qu'aucune fausse alarme n'est générée.

En conclusion, nous pouvons dire que les résultats obtenus lors de l'application ont confirmé les avantages de technique Neuro-Flou pour le diagnostic des systèmes dynamiques hybrides. Ces derniers ont été modélisés par des modèles ANFIS sans qu'il soit nécessaire d'identifier ces modes. Les performances de cette approche ont été présentées sur un exemple de simulation et les résultats obtenus fournissent des preuves de la bonne performance des modèle ANFIS.

5.3 Développement d'un diagnostiqueur basé sur les modèles Neuro-Flou et l'Automate à états finis appliqué aux SDHs

L'objectif de ce travail est de déterminer un modèle approprié du système dynamique hybride, puis de rechercher une procédure de diagnostic permettant de détecter et d'identifier les défauts affectant le SDH. De plus, la méthode de diagnostic considérée doit prendre en compte les interactions entre la dynamique continue et discrète lors de l'analyse du comportement du système.

Comme nous avons vu dans l'application précédente, l'utilisation des modèles ANFIS permet de modéliser, parfaitement, l'aspect continu des systèmes. Par contre, l'absence d'une méthode assurant une représentation de l'évolution discrète du système représente un problème majeur.

A cet effet, nous proposons une approche de diagnostic basée sur l'utilisation des modèles Neuro-Flou de type ANFIS et l'automate à états finis. Cette dernière technique a attiré l'attention de plusieurs chercheurs afin de modéliser l'évolution discrète des systèmes. Une fois les résidus générés, il est nécessaire de réaliser une étape d'analyse et évaluation des résidus. L'utilisation d'un modèle de raisonnement flou permet, alors d'assurer la localisation des défauts détectés et même une estimation du mode de fonctionnement. La figure 5.14 illustre le schéma général de la méthodologie proposée.

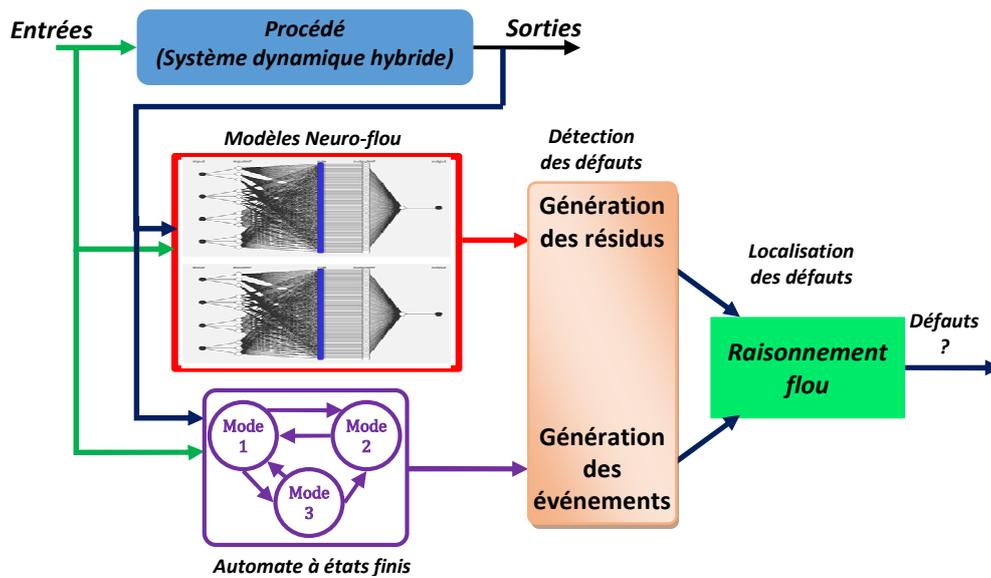


Figure 5.14 : Principe de la méthodologie basée sur les modèles Neuro-Flou et l'automate à états finis.

5.3.1 Application 2

5.3.1.1 Présentation du système

Considérons un procédé hydraulique/thermique représenté par la figure (5.15). Ce système est composé de trois cuves cylindriques de section identiques $S = 0.0154 \text{ m}^2$. Les sections des conduites S_1, S_2 sont aussi identiques. Les coefficients de viscosité sont $\mu_1 = \mu_2 = 2.1082 \cdot 10^{-5}$ et $\mu_3 = 4.2164 \cdot 10^{-5}$.

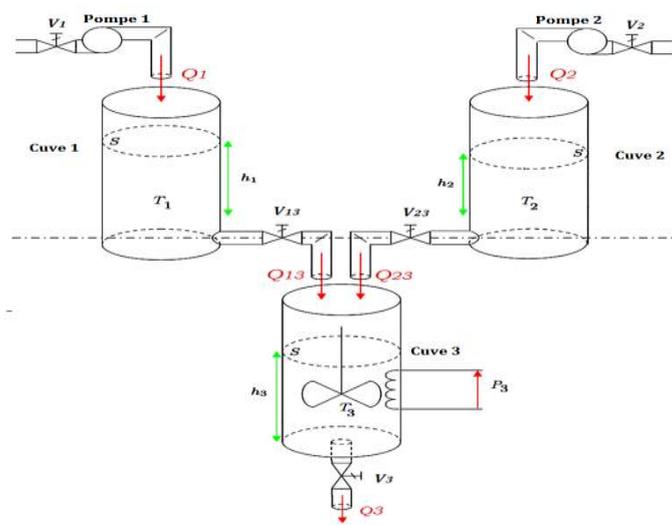


Figure 5.15 : Système à trois cuves.

Deux pompes, T.O.R (Tout Ou Rien) de même débit, sont utilisées pour commander les débits Q_1, Q_2 dans chaque cuve T_1 et T_2 . Les deux vannes V_{13} et V_{23} permettent l'évacuation du liquide dans la troisième cuve puis le mélange sera évacué à travers la vanne V_3 . La température du mélange dans la troisième cuve est ajustée par une résistance électrique P_3 .

Les mesures sont la température T_3 de la troisième cuve et les niveaux de liquide (h_1, h_2, h_3) dans chaque cuve. Les cuves sont supposés parfaitement calorifugées et leurs capacités thermiques sont négligeables. L'objectif est de conserver un niveau de liquide entre $[0.4 - 0.6]m$ à une température entre $[30 - 40]^\circ C$ dans la troisième cuve.

5.3.1.2 Modélisation du système

En effectuant le bilan volumique et le bilan calorimétrique, nous obtenons la représentation non-linéaire du système. En écrivant les équations de la conservation du volume du liquide, nous obtenons :

$$\begin{cases} S \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13}(t) \\ S \frac{dh_2}{dt} = Q_2 - Q_{23}(t) \\ S \frac{dh_3}{dt} = Q_{13}(t) + Q_{23}(t) - Q_3(t) \end{cases} \quad (5.17)$$

$$\text{Avec} \quad \begin{cases} Q_{13}(t) = \mu_1 S_1 \sqrt{2gh_1(t)} \\ Q_{23}(t) = \mu_2 S_2 \sqrt{2gh_2(t)} \\ Q_3(t) = \mu_3 S_3 \sqrt{2gh_3(t)} \end{cases} \quad (5.18)$$

Définissons les coefficients α_i , tels que $\alpha_i = \mu_i S_i \sqrt{2g}$ avec $i = 1 \dots 3$. Le système d'équations différentielles non linéaires précédent devient :

$$\begin{cases} \dot{h}_1(t) = \frac{1}{S} (Q_1(t) - \alpha_1 \sqrt{h_1(t)}) \\ \dot{h}_2(t) = \frac{1}{S} (Q_2(t) - \alpha_2 \sqrt{h_2(t)}) \\ \dot{h}_3(t) = \frac{1}{S} (\alpha_1 \sqrt{h_1(t)} + \alpha_2 \sqrt{h_2(t)} - \alpha_3 \sqrt{h_3(t)}) \end{cases} \quad (5.19)$$

Sachant que l'énergie calorifique apportée par la résistance chauffante est utilisée d'une part pour élever la température du fluide et d'autre part pour modifier la température de la cuve 3. L'énergie électrique apportée au système :

$$\frac{dW_{elec3}}{dt} = P_3 \quad (5.20)$$

L'énergie consommée pour élever la température du fluide entre la valeur $t_{entrée}$ à la valeur t_{sortie} :

$$\frac{dW_{r3}}{dt} = \mu c Q_{13}(T_3 - T_1) + \mu c Q_{23}(T_3 - T_2) \quad (5.21)$$

Avec c la chaleur spécifique du fluide et μ sa masse volumique. L'énergie consommée pour modifier la température du mélange à l'intérieur de la troisième cuve est :

$$dW''_3 = \mu c S h_3 dT_3 \quad (5.22)$$

À partir de la relation $dW_{elec3} = dW'_3 + dW''_3$, on obtient :

$$P_3 dt = \mu c S h_3 dT_3 + \mu c Q_{13} (T_3 - T_1) dt + \mu c Q_{23} (T_3 - T_2) dt \quad (5.23)$$

Donc, on aboutit à l'équation différentielle non linéaire suivante :

$$\frac{dT_3(t)}{dt} = \frac{1}{S h_3(t)} \left[\frac{P_3}{\mu c} + Q_{13}(t) \cdot (T_1 - T_3) + Q_{23}(t) \cdot (T_2 - T_3) \right] \quad (5.24)$$

Les valeurs numériques des différents paramètres sont :

$$\begin{aligned} Q_1 &= 3,9 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot s^{-1}, Q_2 = 3,9 \cdot 10^{-6} m^3 \cdot s^{-1}, \\ \mu &= 4180 J \cdot Kg^{-1} \cdot C^{-1}, c = 1000 J \cdot Kg^{-3}, P_3 = 500 \text{ watt}, \\ h_{10} &= 0,5m, h_{20} = 0,5m, h_{30} = 0,5m, T_{10} = 10^\circ C, T_{20} = 40^\circ C, T_{30} = 32^\circ C. \end{aligned}$$

Donc, les équations différentielles représentant ce système sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{S} (Q_1(t) - \alpha_1 \cdot \sqrt{h_1(t)}) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{1}{S} (Q_2(t) - \alpha_2 \cdot \sqrt{h_2(t)}) \\ \frac{dh_3(t)}{dt} = \frac{1}{S} (\alpha_1 \cdot \sqrt{h_1(t)} + \alpha_2 \cdot \sqrt{h_2(t)} - \alpha_3 \cdot \sqrt{h_3(t)}) \\ \frac{dT_3(t)}{dt} = \frac{1}{S h_3(t)} \left[\frac{P_3}{\mu c} + Q_{13} \cdot (T_1 - T_3) + Q_{23} \cdot (T_2 - T_3) \right] \end{array} \right. \quad (5.25)$$

Ce système est un système multivariable non linéaire composé de trois actionneurs et six capteurs. Les signaux de commande sont la puissance délivrée par la résistance chauffante, et les débits fournis par les deux pompes. Les mesures sont les niveaux (h_1, h_2, h_3) et les températures (T_1, T_2, T_3) des cuves, respectivement (Guenab, 2007).

La figure 5.16 illustre la décomposition physique du système en trois sous-systèmes : S_1 (cuve 1), S_2 (cuve 2) et S_3 (cuve 3) avec les différentes grandeurs physiques.

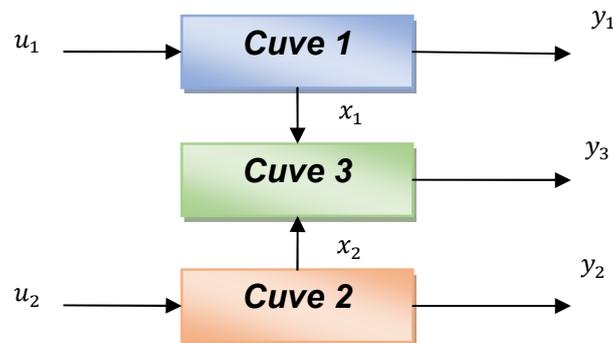


Figure 5.16 : La décomposition physique du système.

5.3.1.3 Développement du diagnostiquer

Ce système hydraulique/thermique implique explicitement et simultanément des modèles à dynamique continue et dynamique d'événement (discrète). La partie événement implique la notion de mode où chaque mode est associé à sa propre dynamique continue. L'ensemble des modes caractérise le fonctionnement complet du système où le passage d'un mode à un autre est généré par un automate au moyen des mesures et en tenant compte de tous les événements contrôlés (ouverture et fermeture des vannes et marche / arrêt de la résistance) et spontanés (en fonction du niveau de liquide dans les cuves) générés par le système.

En fonctionnement normal, le comportement nominal est basé sur les valeurs des variables $h_i = (i = 1, 2, 3)$ et l'état des composants discrets ($V_i, (i = 1, 2, 3)$ et P_3). Il doit vérifier les contraintes de fonctionnement formulées par :

$$0,4m < h_3 < 0,6m \quad (5.26)$$

$$\text{et } 30^\circ\text{C} < T_3 < 40^\circ\text{C}$$

Suivant le fonctionnement et l'architecture du système et sur la base de la relation des entrées et des sorties, le système peut être exprimé par un modèle composé de quatre modèles ANFIS, représenté par les quatre équations suivantes :

$$h_1(k) = F_1(Q_1(k-1), h_1(k-1)) \quad (5.27)$$

$$h_2(k) = F_2(Q_2(k-1), h_2(k-1)) \quad (5.28)$$

$$h_3(k) = F_3(h_1(k-1), h_2(k-1), h_3(k-1)) \quad (5.29)$$

$$T_3(k) = F_4(h_1(k-1), h_2(k-1), h_3(k-1), T_3(k-1)) \quad (5.30)$$

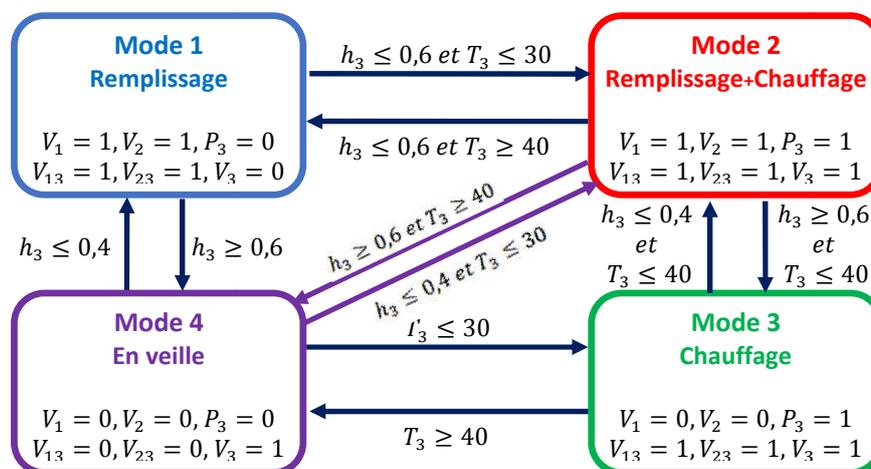


Figure 5.17 : Automate du système à trois cuves.

Le comportement normal du processus est représenté par un automate à états finis. La figure 5.17 décrit les trajectoires correspondant aux configurations du système en fonctionnement normal. Chaque configuration est définie par le mode de l'état discret (état des vannes V_i et la température T_3), par l'évolution continue associée à cette configuration (décrite par les modèles ANFIS) et le domaine de validité (contraintes définies précédemment). Le passage d'un mode à un autre est conditionné par le niveau du liquide h_3 et / ou sa température T_3 .

- **Mode 1 (Remplissage) :** La troisième cuve doit être remplie jusqu'à ce que le niveau h_3 atteigne 0,6 m (Toutes les vannes sont ouvertes sauf V_3).
- **Mode 2 (Remplissage et Chauffage) :** Le fluide dans la cuve 3 doit être chauffé entre 30 et 40 °C (P_3 est en état marche).
- **Mode 3 (Chauffage) :** La température dans la cuve 3 dépasse 40 °C (P_3 est en état marche).
- **Mode 4 (en veille) :** Les cuves 1 et 2 dépassent les limites et la température dans le réservoir 3 dépasse 40 °C, (Toutes les vannes fermées sauf V_3 et P_3 est en état arrêt).

Il est à noter que le modèle ainsi conçu représente une version réduite du comportement global du système. L'évolution des modes (évolution discrète) est illustrée par la figure 5.18.(a). Il est évidemment clair d'après cette figure que les modèles ANFIS fournissent le même comportement que l'évolution réelle décrite par des équations non linéaires.

Un test de cohérence réalisé entre les observations effectuées et l'évolution en mode normal est illustré par le comportement des résidus (figure 5.18.(b)), où on peut observer leurs convergences vers zéro indiquant ainsi l'absence de toute anomalie dans le système.

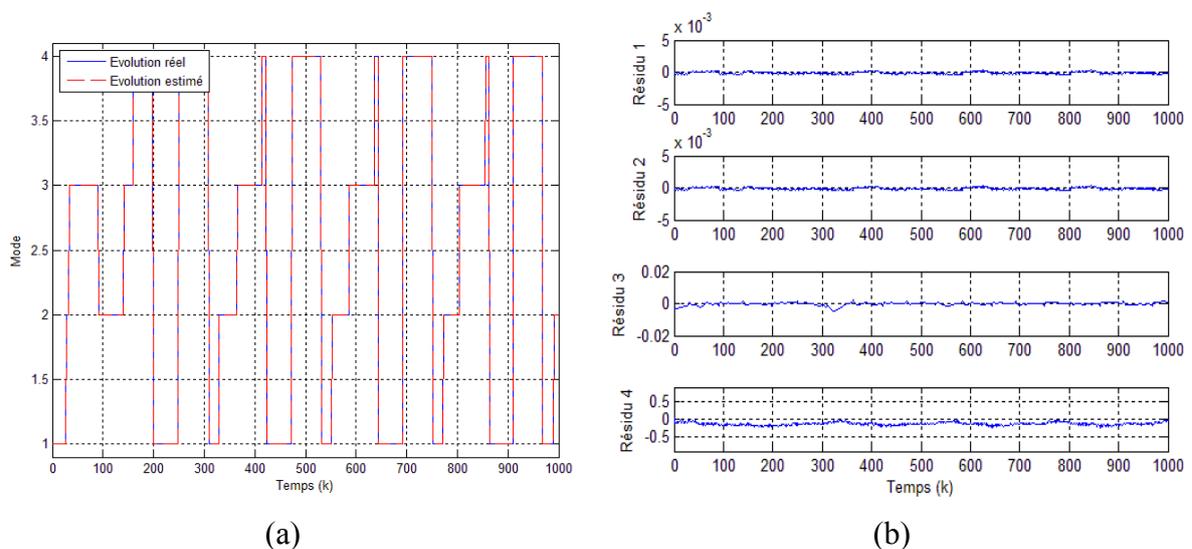


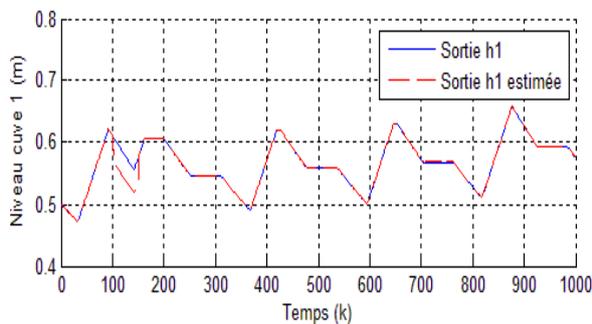
Figure 5.18 : (a) Evolution des modes réels et estimés, (b) Résidus (cas sans défauts).

Après l'étape de modélisation et l'étape de génération des résidus, nous procédons à une évaluation des résidus. Dans cette section, nous considérons un fonctionnement défectueux et nous appliquons un raisonnement flou pour classer les défauts «intermittents» et spécifier l'évolution des modes du système. Dans un souci de simplicité, nous ne prendrons en compte que les défaillances affectant les composants discrets et nous nous concentrons sur une classe de modes de défaillance qui apparaissent à des intervalles différents.

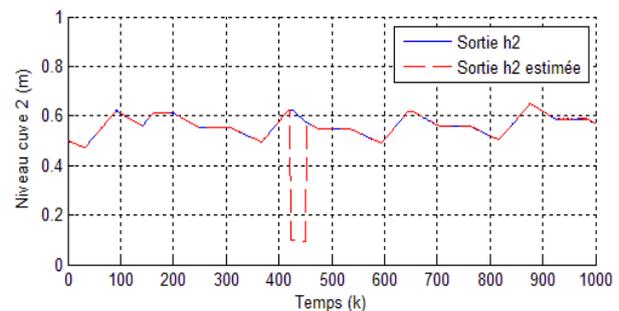
Pour illustrer la méthode proposée et vérifier l'efficacité et la fiabilité du système de diagnostic, nous considérons des scénarios de pannes, notés f , constitués de pertes de rendement des vannes V_1 , V_2 et de perte de puissance de la résistance chauffante de la troisième cuve. En réalité, le défaut de V_1 est une perte d'efficacité de 5%, cela signifie que V_1 n'est pas entièrement ouvert (il est partiellement ouvert).

Tableau 5.3 : Les défauts simulés.

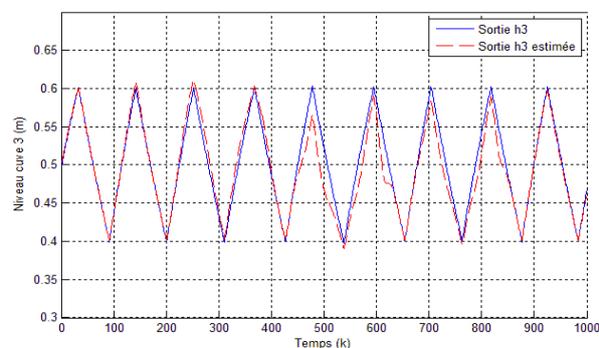
Actionneur affecté	Défaut	Apparition de défaut	Perte de l'efficacité
V_1	f_{V_1}	[100 – 150]	5%
V_2	f_{V_2}	[420 – 450]	30%
P_3	f_{P_3}	[800 – 900]	50%



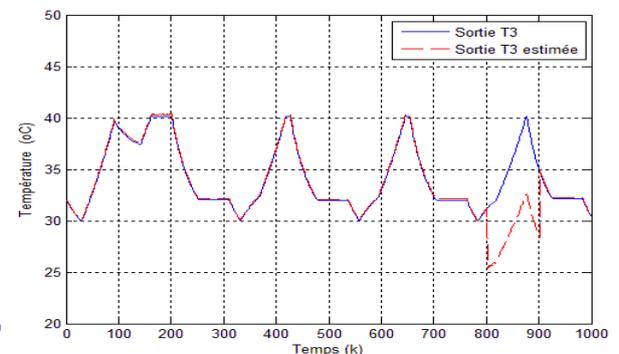
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 5.19 : Comportement de la dynamique continue du système en présence des défauts.

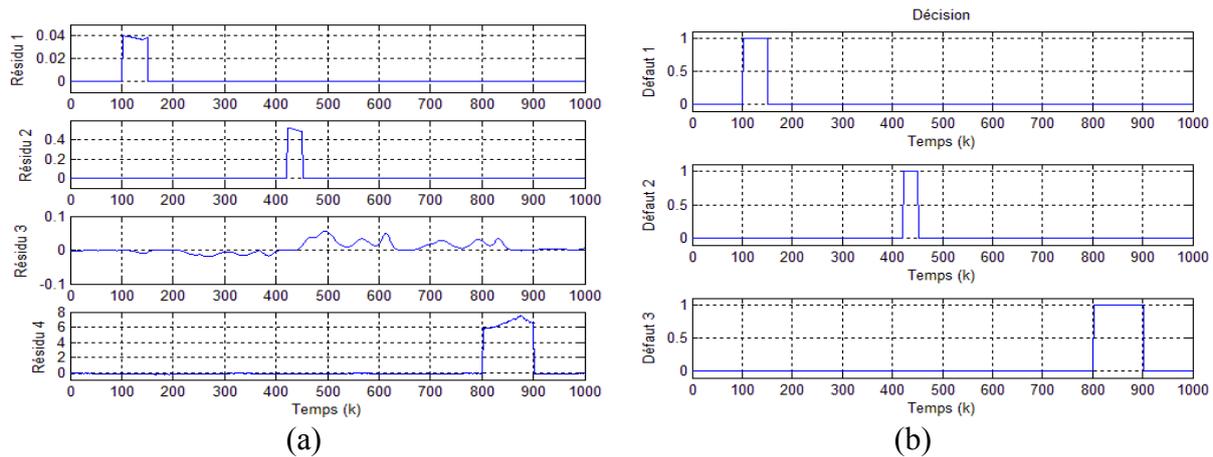


Figure 5.20 : (a) Les résidus, (b) Les décisions.

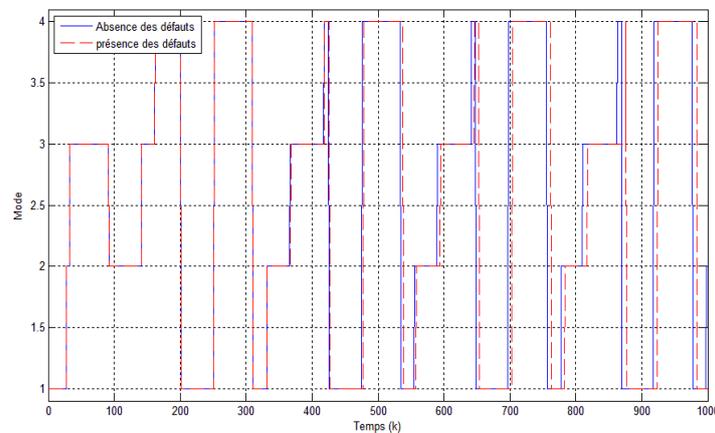


Figure 5.21 : Séquence des modes, en absence des défauts (-), en présence des défauts (- -)

5.3.1.4 Résultats et discussions

Dans cette application, nous avons abordé une méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides en utilisant une combinaison des modèles Neuro-Flous bien connus dans le domaine de modélisation d'évolution continu, et couplé aux automates utilisés pour la représentation des événements discrets du système, afin d'obtenir des performances meilleures. Cette méthode de diagnostic combine les avantages de ces deux approches.

L'approche utilisée consiste, dans un premier temps, à modéliser un système physique complexe à l'aide des modèles Neuro-Flous et l'automate à états finis, afin de générer des résidus (ou indicateurs de défauts), sensibles à tout défaut affectant le système. Ensuite, il est nécessaire d'analyser ces résidus et détecter la présence ou non des défauts. Cette procédure est effectuée à partir d'un modèle de raisonnement flou. Les résultats de la simulation montrent l'efficacité du schéma proposé pour le diagnostic des défauts, qu'ils soient continus ou discrets.

5.4 Commande tolérante aux défauts des SDH

Le diagnostic des défauts est nécessaire mais ne peut pas être suffisant. Donc, Il serait judicieux de tenir compte de la présence des défauts dès l'étape de conception de la loi de commande du système. Dans ce cadre, nous avons vu l'importance du diagnostic et de la tolérance aux défauts dans la conduite des systèmes automatisés dont l'objectif est :

- ✓ d'améliorer la sécurité des personnes et des systèmes.
- ✓ de mieux gérer les procédures de maintenance.
- ✓ d'améliorer la qualité et le rendement de la production.

Depuis plusieurs années, le problème de la tolérance aux défauts a été abordé sous plusieurs points de vue. La tolérance aux défauts devient d'une importance capitale afin d'éviter des conséquences catastrophiques et de préserver la sécurité des personnes et des systèmes. L'objectif principal des méthodes de tolérance aux défauts consiste à préserver au mieux les performances nominales du système : la stabilité, la précision et la rapidité.

Généralement, la commande tolérante aux défauts peut être classée suivant deux approches distinctes : une approche de commande passive et une approche active. L'approche passive est caractérisée par une loi de commande robuste vis à vis des défaillances et les régulateurs sont synthétisés de façon être robuste à certains défauts. Cette approche ne nécessite aucun schéma de détection de défauts ni aucune reconfiguration de loi de commande, mais sa capacité de tolérance reste restreinte à quelques défauts spécifiques. En revanche, l'approche active est caractérisée par un schéma de détection de défauts et une stratégie de changement de la loi de commande tout en préservant la stabilité et les performances du système.

Pour l'approche active, deux stratégies sont présentées, qui sont l'accommodation des défauts et la reconfiguration du système. L'accommodation est possible quand l'étape *FDI* permet aussi d'estimer le défaut (nécessité d'un modèle de fonctionnement défaillant). Si le défaut ne peut être estimé, on parle de la reconfiguration du système (utilisation d'un sous-ensemble de composants, remplacement d'éléments défaillants).

L'accommodation de défaut prend la forme d'une reconfiguration de commande, une fois que le diagnostic observé est activé après la déclaration de défaut. La reconfiguration de commande prend la forme d'un signal additif au contrôleur de modèle du fonctionnement nominale.

La figure (5.22) représente un schéma général de diagnostic et d'accommodation de défauts.

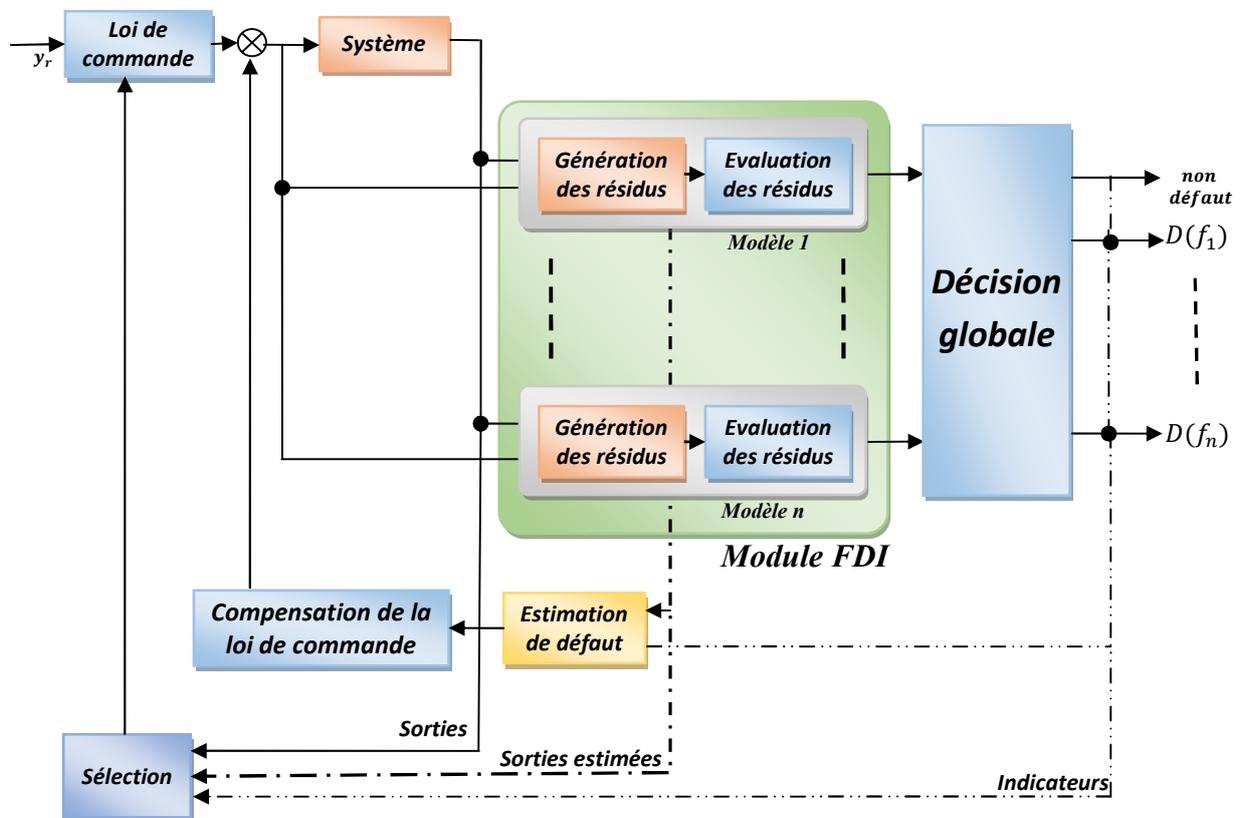


Figure 5.22 : Schéma général de diagnostic et d'accommodation de défauts.

Une approche de commande tolérante effectuée dans le cadre de l'accommodation de défauts en ligne basée sur un module de diagnostic de défauts. Ce module utilise un banc de contrôleurs permet de générer des signaux de compensation de la loi de commande.

Les relations entrées/sorties entre la loi de commande et le système à contrôler restent inchangées lorsque l'on parle d'accommodation de défauts. Donc, il s'agit de sélectionner la loi de commande adéquate à partir d'un ensemble de régulateurs pré-calculés hors ligne.

Selon la phase de processus identifiée par l'étape de diagnostic, un sélecteur de mode flou sert à sélectionner le mode de commande approprié, qui peut comprendre la commutation de différentes situations spécifiques des structures de contrôleurs. La commutation entre les contrôleurs est plus utile si les exigences de performance doivent être modifiées.

La figure (5.23) montre un schéma général d'une commande tolérante aux défauts utilisant les réseaux Neuro-flous.

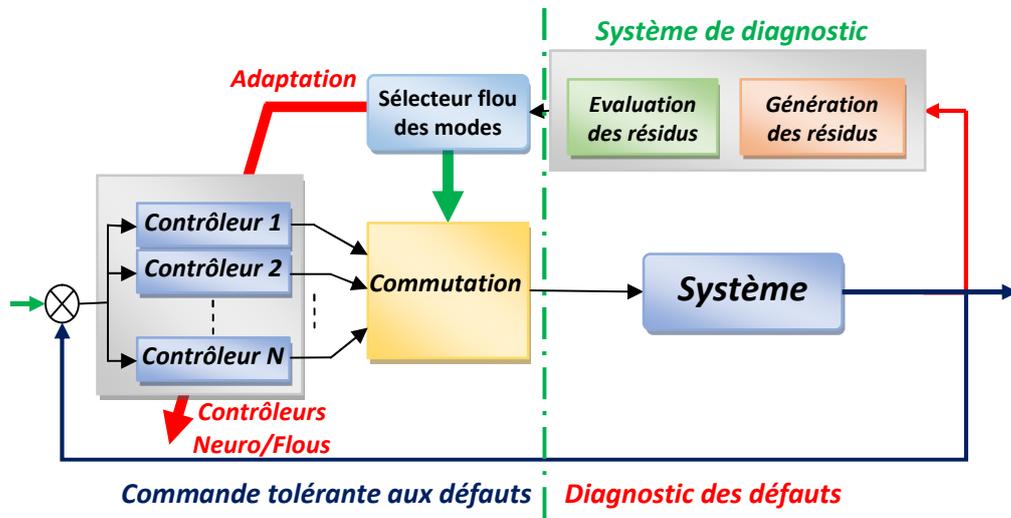


Figure 5.23 : Schéma général d'une commande tolérante aux défauts utilisant la logique floue et les réseaux Neuro-Flous.

5.4.1 Application 3

5.4.1.1 Stratégie de diagnostic des défauts (défaut actionneur)

Afin d'illustrer la méthode proposée et de vérifier l'efficacité et la fiabilité de la stratégie de diagnostic, nous considérons un scénario de défaut, noté f . Reprenons le système hydraulique à deux bacs de la figure (5.5). On suppose qu'un défaut est supposé comme une perte d'efficacité d'actionneur de la pompe. Ce défaut influence les équations différentielles.

$$\begin{cases} S.\dot{h}_1 = Q_{p1} - Q_1 - Q_2 - Q_3 - f \\ S.\dot{h}_2 = Q_2 + Q_3 - Q_4 \end{cases} \quad (5.31)$$

Nous avons proposé un modèle de raisonnement flou pour classer les défauts. Nous avons choisi pour chaque résidu trois fonctions d'appartenance : deux trapézoïdales et une triangulaire, pour le choix de leurs paramètres nous avons effectué de nombreux tests en présence de plusieurs défauts différents.

Supposons une perte d'efficacité de 20% affectant l'entrée du premier actionneur entre les instants 3100s et 3400s, puis examinons les résultats obtenus (l'évolution des sorties du système, les résidus associés et les sorties des modèles de décision).

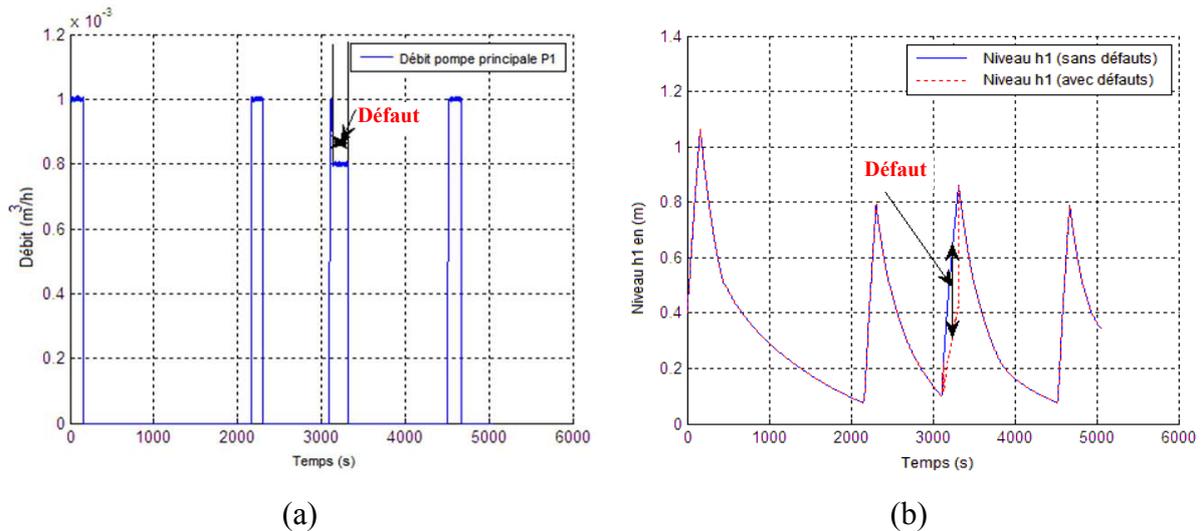


Figure 5.24 : (a) Evolution du débit de la pompe avec défaut, (b) L'évolution réelle et estimée du niveau h_1 .

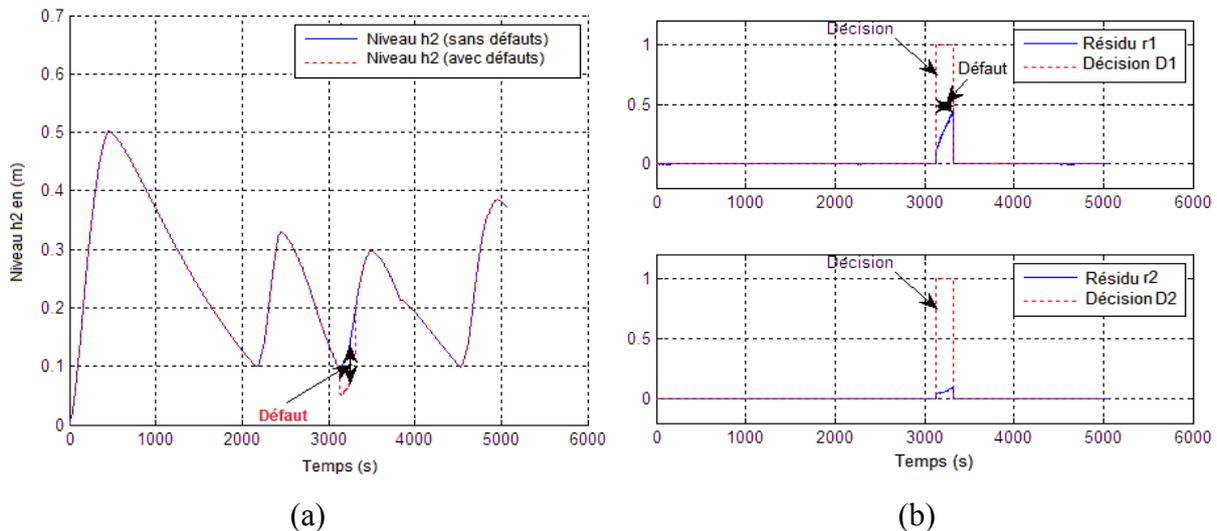


Figure 5.25 : (a) L'évolution réelle et estimée du niveau h_2 , (b) L'évolution des résidus et des décisions associées.

Les figures (5.24) et (5.25), respectivement, représentent l'évolution du débit de la pompe, les niveaux des réservoirs, les résidus et les décisions. Ces figures montrent l'influence des entrées et des sorties par le défaut injecté entre les instants 3100s et 3400s. La figure (5.25 b) illustre la sensibilité des résidus dès l'apparition du défaut intermittent. Il est également clair que les signaux de décisions prennent la valeur un (1) entre ces instants. Il est à noter que le système de diagnostic prend des décisions positives dans le cas où les défauts provoquent une entrée du système. De nombreux autres tests ont été réalisés et ont tous montré la capacité de cette stratégie de diagnostic à reconnaître tous les défauts possibles affectant le système.

5.4.1.2 Stratégie de commande tolérante aux défauts

Après vérification de l'efficacité et de la fiabilité du système de diagnostic, nous présentons maintenant la stratégie de commande tolérante aux défauts ainsi que les résultats obtenus suite à un test de validation.

Appliquons une accommodation de défaut détecté précédemment. Pour cela, une pompe de secours sera activée pour compenser les effets d'un dysfonctionnement de la pompe principale. La pompe de secours P_2 de même débit, est utilisée pour commander le débit Q_{P_2} affectant le niveau de réservoir 1. Le principe est donc d'arrêter la pompe défectueuse et de démarrer immédiatement la pompe de secours.

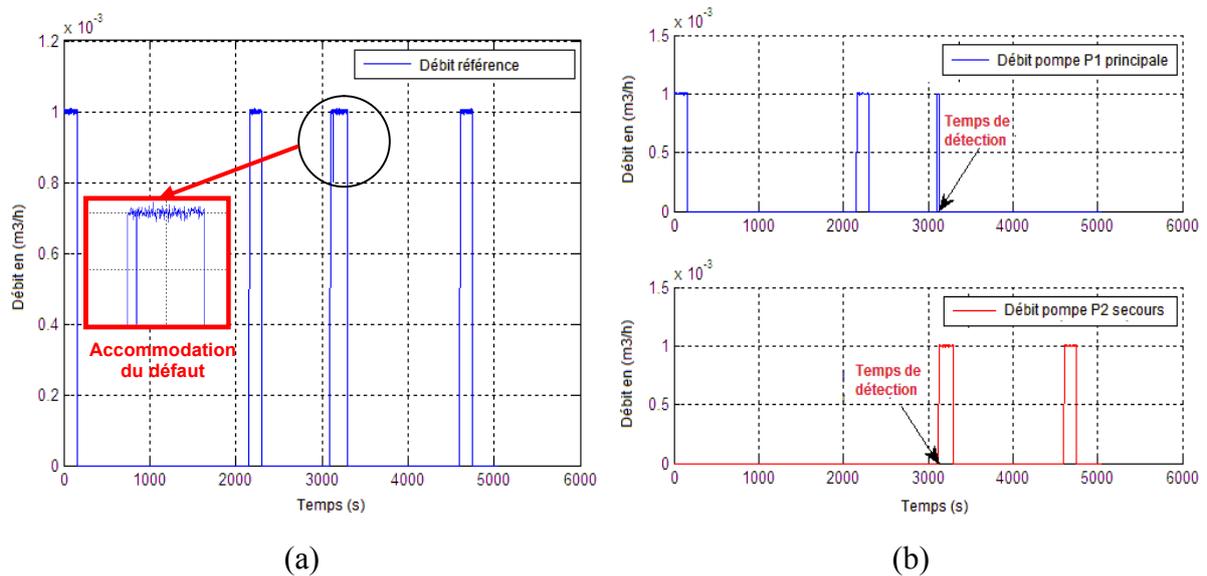


Figure 5.26 : (a) Evolution de débit référence, (b) Evolution de débit des pompes, avec accommodation du défaut.

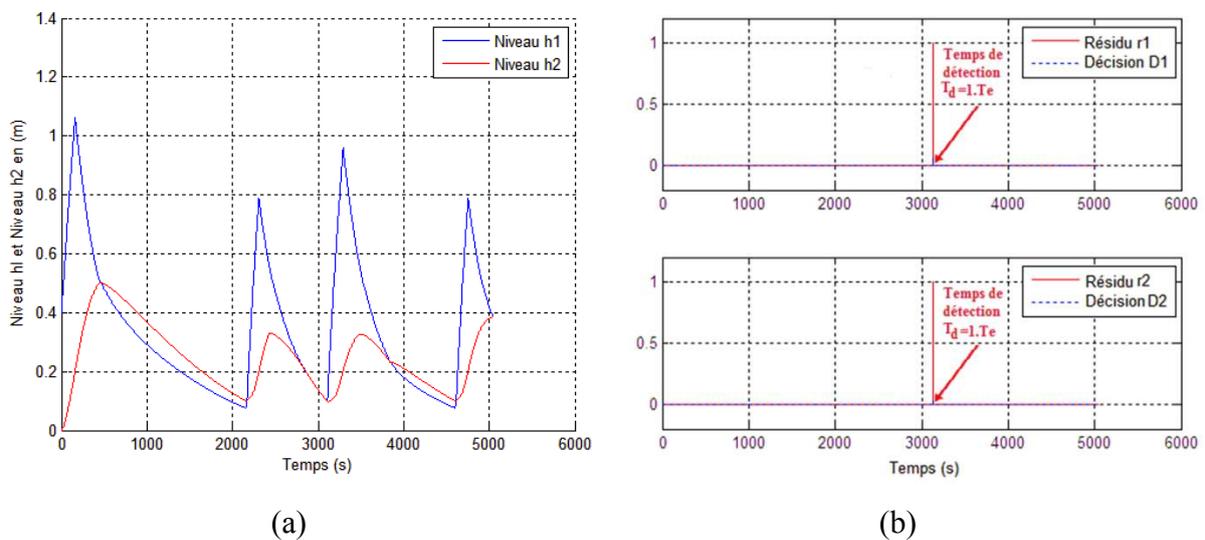


Figure 5.27 : (a) Evolution des résidus et (b) les décisions, avec accommodation du défaut.

Il est clair que la stratégie d'accommodation de défauts utilisée donne d'excellents résultats en permettant au système de garder son mode de fonctionnement normal sans être influencé par la présence du défaut. Néanmoins, le système de décision marque un petit saut, et revient à zéro. Ce petit retard est appelé temps de détection $T_d = 1.T_e$. Ainsi, la reconfiguration de la commande tolérante est activée après un temps d'échantillonnage de l'apparition du défaut.

Les figures (5.28) à (5.30) illustrent une comparaison entre les deux stratégies, la stratégie de diagnostic (sans reconfiguration) et la stratégie de commande tolérante aux défauts (avec reconfiguration).

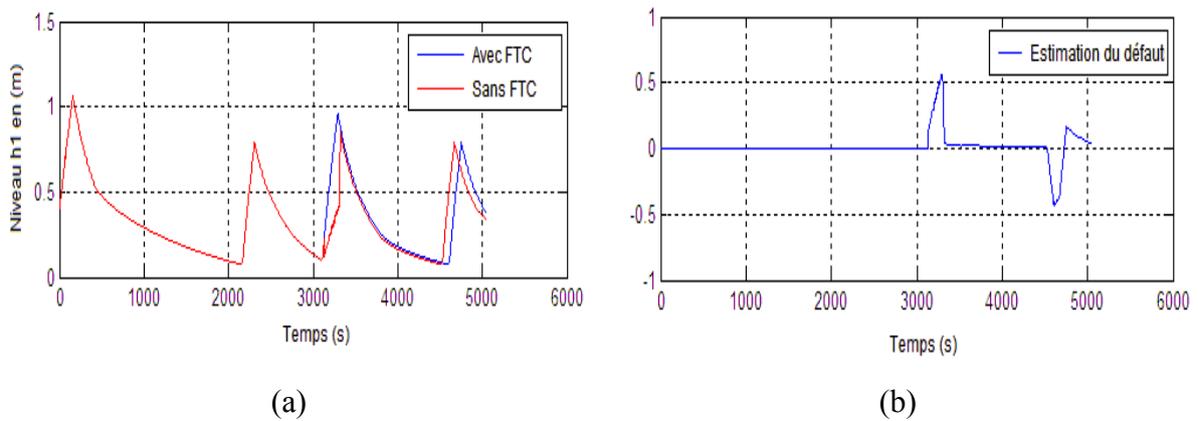


Figure 5.28 : Evolution des niveaux h_1 réel et estimé dans le cas sans et avec reconfiguration,
(b) Estimation du défaut h_1 .

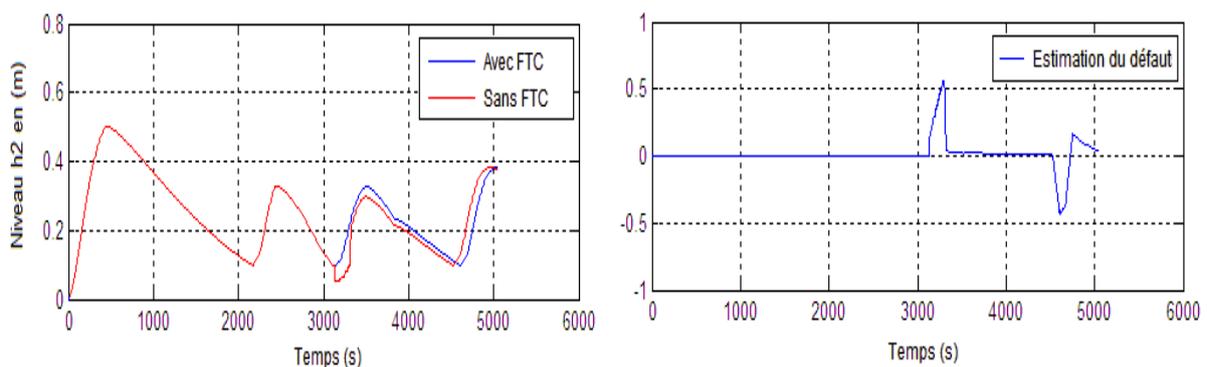


Figure 5.29 : Evolution des niveaux h_2 réel et estimé dans le cas sans et avec reconfiguration,
(b) Estimation du défaut h_2 .

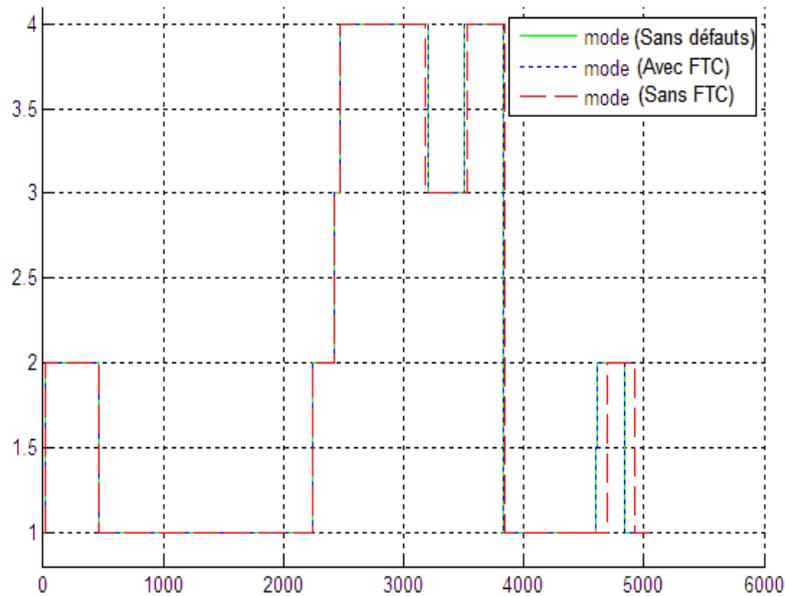


Figure 5.30 : Evolution des modes dans le cas sans et avec reconfiguration.

5.4.1.3 Résultats et discussions

Dans la stratégie de diagnostic, les sorties s'écartent, selon le type de défaut, de la valeur nominale alors que, dans la stratégie de commande tolérante aux défauts, toutes les sorties restent inchangées en compensant l'effet des défauts de type actionneur qui peut altérer le fonctionnement normal du système. Ces résultats montrent donc l'importance de la commande tolérante aux défauts qui garantissent les propriétés recherchées relatives à l'annulation des effets fatals liés à l'apparition d'un ou plusieurs défauts sur le système.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est consacré dans un premier temps à l'application d'une méthodologie de diagnostic aux défauts permettant de diagnostiquer les défauts apparaissant. L'utilisation de techniques issues du domaine de l'intelligence artificielle apparaît comme la principale alternative pour aborder les problèmes connus comme difficilement modélisables par des méthodes analytiques et qui requièrent souvent l'intervention des experts du domaine ou le traitement d'information de nature qualitative. Les exemples de simulation ont permis de montrer l'intérêt de ces méthodes.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté la mise en œuvre d'une méthodologie de commande tolérante aux défauts permettant de construire un mécanisme garantissant le

fonctionnement normal de procédé. La stratégie de commande proposée repose sur un schéma coopératif fédérant au sein d'une même structure le système de commande nominale, le module de diagnostic et les régulateurs responsables pour assurer la tolérance aux défauts.

La commande tolérante aux défauts proposée est basée sur les trois étapes essentielles suivantes :

- Dans la première étape, une méthode de modélisation des systèmes dynamiques hybrides est représentée à base de Neuro-Flou et des automates à états finis pour modéliser respectivement la partie continue et la partie discrète.
- La deuxième étape regroupe la génération et l'analyse des résidus. Nous avons utilisé dans cette étape un modèle de raisonnement flou afin de classer les défauts détectés.
- La dernière étape permet de sélectionner des lois pré-calculées de commande Neuro/Flou, cela nous a conduit à introduire une commande tolérante aux défauts capable de compenser les effets des défauts en ajoutant un terme de compensation.

Les lois de commande tolérantes proposées sont basées sur une estimation parfaite des défauts de l'actionneur. Cette application montre que les modèles Neuro-Flou peuvent être utilisés pour le diagnostic et la commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides.

CHAPITRE VI

CONTROLE ET SUPERVISION D'UN PROCEDE DE
PRODUCTION D'EAU POTABLE

6. Contrôle et supervision d'un procédé de production d'eau potable

6.1 Introduction

La complexité des systèmes industriels modernes provoque une interaction entre le comportement continu et discret des systèmes. C'est le cas de plusieurs procédés de production. Comme nous l'avons vu, ce type de système hybride nécessite un formalisme spécifique pour être modélisé, analysé et synthétisée des lois de commande.

Aujourd'hui, la surveillance reste une tâche très importante en raison de son rôle essentiel dans l'amélioration de la fiabilité, mais aussi dans la minimisation des conséquences néfastes qui peuvent être catastrophiques pour la sécurité des équipements et des personnes. En effet, un diagnostic efficace améliore non seulement la fiabilité, mais réduit également les coûts de maintenance. De plus, la supervision de ces systèmes industriels nécessite la mise en place d'un système de surveillance capable, à tout moment, de gérer une anomalie apparente. Par conséquent, le choix de l'approche de surveillance est très important pour assurer les performances demandées. Récemment, différentes techniques de surveillance ont été développées et appliquées pour la supervision des procédés.

Dans ce travail, nous concentrons notre attention sur ces deux axes : la surveillance et la supervision des systèmes industriels. L'objectif est de présenter en premier temps, la problématique de la supervision dans le contexte des systèmes industriels et plus particulièrement les systèmes de production automatisés. Ensuite, nous menons une étude appliquée sur un système de supervision réel d'une station de déminéralisation, à travers laquelle nous essayons d'améliorer et de développer la procédure de commande et de surveillance.

6.2 Situation mondiale de l'eau potable

Au cours des dernières décennies, l'augmentation de la consommation d'eau et la diminution des précipitations, ont conduit à un manque d'eau dans plusieurs pays. En réalité,

97,5% de l'eau du monde est salée et non potable. En outre, la majeure partie de l'eau douce (2,5% de l'eau mondiale totale) est à l'état solide (68,9%) ou est de l'eau souterraine (30,8%). Seulement 0,3% (sur 2,5%) est stocké dans les lacs et les rivières et est disponible pour la consommation humaine. Toutefois, cette eau est répartie d'une façon très inégale d'un point de vue géographique (Figure 6.1).

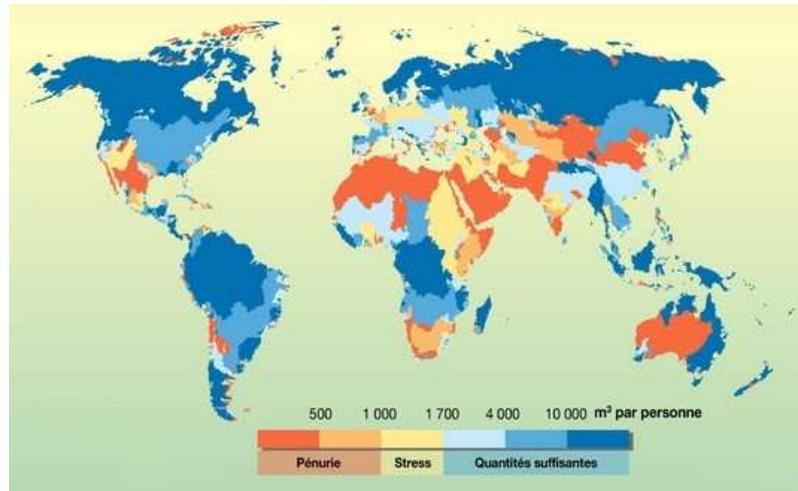


Figure 6.1 : Estimation de la situation mondiale de l'eau. (Projection pour 2025).

Par ailleurs, la demande en eau douce, croît chaque année de 4 à 5%, tandis que les ressources naturelles restent invariables pour ne pas dire qu'elles diminuent (problème de pollution de plus en plus grand). Cette équation montre que bientôt la demande sera supérieure aux ressources. Le problème de la pénurie de l'eau s'est amèrement posé maintenant et ces dernières années, car la situation dans certains pays situés dans des zones très désertes et peuplées devient inquiétante, et suscite des tensions.

Pour lutter contre ce manque d'eau potable, au cours des dernières décennies, le dessalement est devenu une solution efficace. Le dessalement est un processus qui produit de l'eau potable, en éliminant la plus grande partie du sel d'un cours d'eau (mer ou eau saumâtre). Récemment, le dessalement de l'eau a été la principale source d'approvisionnement en eau potable dans de nombreuses régions.

6.3 Technologies de dessalement

Il existe plusieurs technologies de dessalement et plusieurs façons de les classer (El-Dessouky et Ettouney, 2002). Les techniques de dessalement peuvent être divisées en deux

catégories importantes : les procédés à membranes ou méthodes électriques [Osmose inverse (RO), Inversion de l'électrodialyse (EDR) et Compression mécanique de vapeur (MVC)] et les procédés à distillation ou méthodes thermiques [Flash multi-étapes (MSF), Distillation à effets multiples (MED), Compression thermique de la vapeur (TVC) et Distillation sur membrane (MD)].

À partir des années 90, l'osmose inverse est devenue la technologie de dessalement la plus populaire, en particulier pour les grandes usines de dessalement d'eau de mer. Les autres procédés n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

6.3.1 Définition du procédé osmose inverse

A la base de la technologie d'osmose inverse se trouve le phénomène d'osmose. L'osmose est un processus physique naturel où l'eau s'écoule à travers une membrane semi-perméable d'une solution avec une faible concentration de solides dissous à une solution avec une concentration élevée de solides dissous. L'eau continuera de s'écouler à travers la membrane dans cette direction jusqu'à ce que la concentration soit équilibrée des deux côtés de la membrane.

Supposons une cellule divisée en deux compartiments par une membrane semi-perméable, comme le montre la figure 6.2. Cette membrane laisse passer l'eau et certains ions, mais elle est imperméable à la plupart des solides dissous. Un compartiment dans la cellule a une solution avec une concentration élevée de solides dissous tandis que l'autre compartiment a une solution avec une faible concentration de solides dissous.

À l'équilibre, la concentration de solides dissous est la même dans les deux compartiments (figure 6.2.a); il n'y a plus de flux net d'un compartiment à l'autre. Cependant, le compartiment qui contenait autrefois la solution à concentration plus élevée a maintenant un niveau d'eau plus élevé que l'autre compartiment.

Si on applique une pression dans le compartiment de la solution concentrée, supérieure à la pression osmotique, (figure 6.2.b), la diffusion se produit en sens inverse, de la solution concentrée vers la solution diluée, ce qui a pour effet d'extraire l'eau douce de la solution salée, tel est le principe de l'osmose inverse.

L'osmose inverse est le processus par lequel une pression appliquée, supérieure à la pression osmotique, est exercée sur le compartiment qui contenait autrefois la solution à haute concentration (figure 6.2.c). Cette pression oblige l'eau à traverser la membrane dans le sens inverse de celui de l'osmose. L'eau se déplace maintenant du compartiment contenant la solution à haute concentration vers celui contenant la solution à faible concentration.

De cette manière, relativement l'eau pure passe à travers la membrane dans l'un des deux compartiments, tandis que les solides dissous sont retenus dans l'autre compartiment. Par conséquent, l'eau dans l'un des compartiments est purifiée ou déminéralisée et les solides dans l'autre compartiment sont concentrés. Finalement, on arrive à une position d'équilibre (figure 6.2.d). La hauteur pour le nouvel équilibre dépend de la pression appliquée, des caractéristiques de la membrane semi-perméable et de la concentration des deux solutions.

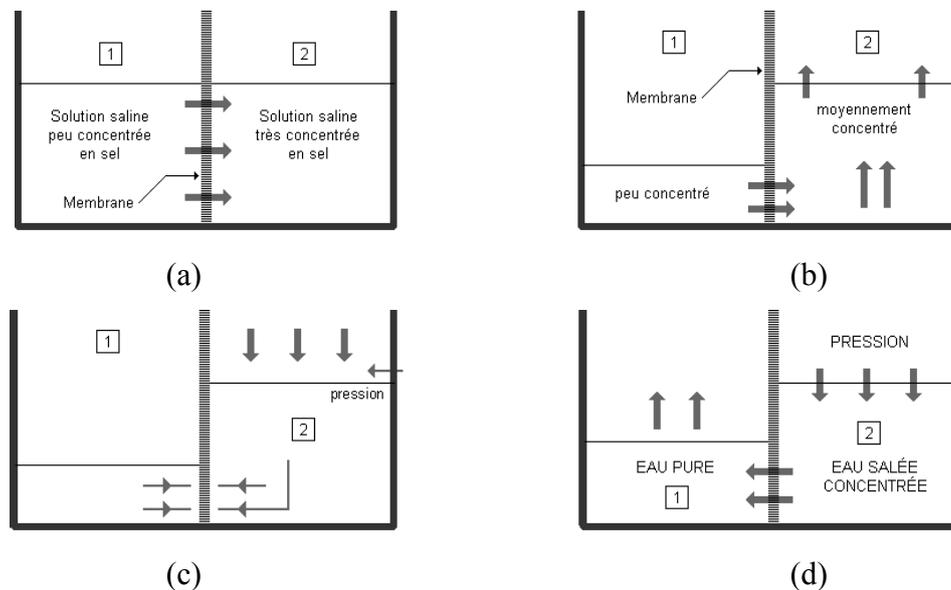


Figure 6.2 : Le processus de l'Osмосe Inverse.

6.4 Description d'une installation osmose inverse

D'une manière générale, une installation de dessalement d'eau par osmose inverse comporte quatre étapes principales : Une étape de la prise d'eau, une étape du prétraitement, une unité d'osmose inverse et une étape de post-traitement ou re-minéralisation.

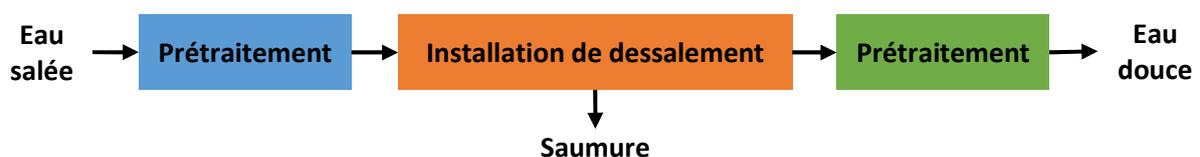


Figure 6.3 : Schéma général d'une installation osmose inverse.

a) Prise d'eau : Cette étape doit permettre d'obtenir une eau de la meilleure qualité possible, (selon la localisation géographique (eau de surface, mer, forage,...), notamment du point de vue matières en suspension.

b) Prétraitement : Le prétraitement de l'eau est une étape essentielle. L'objectif du prétraitement est d'éviter le colmatage des membranes osmose inverse par les matières en suspension et de donner à l'eau des caractéristiques qui soient compatibles avec la nature des membranes et de cette manière prolonger sa durée de vie. Le procédé de prétraitement peut être divisé en deux étapes : un traitement physique par un système de filtre à sable et un système de filtre à cartouches, et un traitement chimique par opérations de chloration, opération préventive d'entartrage et une opération de dé-chloration.

c) Unité osmose inverse : L'unité d'osmose inverse (RO : *Reverse Osmosis*) est principalement composée d'une pompe haute pression et des modules constitués d'une série de membranes. Une membrane peut être définie comme étant une couche mince de matière, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert (Tamas, 2004). Les membranes d'osmose inverse sont composées d'une couche mince de faible épaisseur comprise entre $0,1\mu\text{m}$ et $1,5\mu\text{m}$, composant des micropores. Cette couche active est supportée par une ou plusieurs couches, à la fois plus poreuses et mécaniquement plus résistantes (Metaiche, 2006).

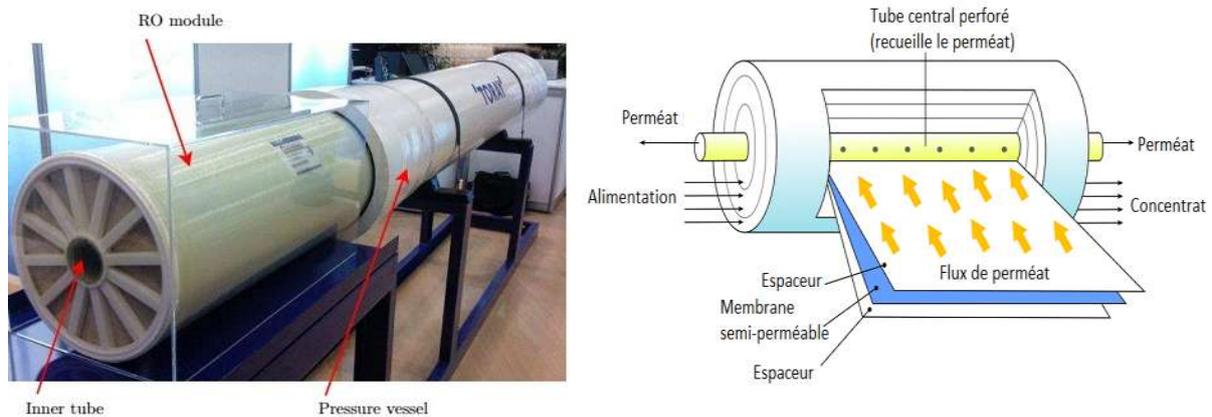


Figure 6.4 : Membrane osmose inverse.

d) Post-traitement : Cette étape vise principalement à reminéraliser l'eau et ajuster sa salinité au degré de salinité acceptable pour la consommation conformément aux normes de qualité de l'eau de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Cette étape comporte deux phases principales qui sont : l'ajustement du pH et le Post-chloration (Gómez, 2014).

6.5 Automatismes dans une installation osmose inverse

La qualité de l'eau brute n'est pas un facteur relativement variable dans les installations de production d'eau potable, cependant la quantité d'eau à traiter, qui dépend de l'augmentation de la demande en eau potable, est une préoccupation majeure et donc l'automatisation de ces installations devient importante en raison du ratio de production à atteindre.

Cependant, aucune installation n'est complètement automatisée sans intervention humaine. Des interventions humaines sont nécessaires pour assurer la maintenance, certaines tâches de réglage et même d'établir des diagnostics des défauts apparaît.

Un grand nombre de fonctions automatiques sont déjà réalisés dans les installations de production d'eau potable. Les plus courants sont présentés dans le tableau suivant.

N°	Fonction automatisée	Paramètres de Référence
1	Refroidissement eau brute	Mesure de température
2	Prétraitement	Mesure de conductivité et pH
3	Stockage eau brute	Mesure de niveau et température
4	Pompage eau brute	Variation de la vitesse des pompes
5	Filtration sur sable	Mesure de pression, débit et pH
6	Lavage des filtres	Mesure de débit et pression
7	Microfiltration	Mesure de conductivité, de pression, débit et pH
		Mesure de potentiel RedOx
		Mesure de la turbidité
8	Pompage haute pression	Variation de la vitesse des pompes haute pression
9	Filtration par membranes R.O	Mesure de conductivité, pression, débit et pH
10	Stockage eau traité	Mesure de conductivité, chlore et pH
11	Drainage	Pompage eau saumâtre vers le rejet
12	Dosage des produits chimiques	Régulation automatique de dose (pompe doseuse)
13	Pompage eau traitée	Variation de la vitesse des pompes

Tableau 6.1 : Automatismes dans une installation osmose inverse.

6.6 Contrôle et supervision des procédés osmose inverse

Ces dernières années, l'automatisation seule est devenue insuffisante et la supervision est devenue une nécessité. Tous les systèmes industriels d'aujourd'hui, sont équipés de systèmes de supervision un peu avancés en fonction de la pertinence, de l'importance et de la portée du processus à superviser, mais aussi en fonction du budget alloué pour remplir cette fonction.

De façon générale, un système de supervision est composé d'un logiciel, auquel sont attachées les données provenant de l'équipement (automates). Grâce au logiciel de supervision, des visualisations sont créées pour fournir des informations en temps réel, permettant une prise de décision plus rapide sur les processus, aussi elle permet de détecter les défauts qui peuvent survenir pendant le fonctionnement. Ce logiciel assure aussi l'affichage, le traitement et l'archivage des données, ainsi la communication avec d'autres périphériques.

La supervision par le système SCADA est une forme avancée de dialogue homme-machine ; et elle présente de nombreux avantages pour les processus de production industrielle : elle permet à l'opérateur de surveiller plus facilement l'état de fonctionnement du processus ainsi que de le contrôler et de le diriger.

6.6.1 Automate Programmable Industriel

L'automate programmable est la pièce maîtresse du processus d'automatisation. Un automate programmable industriel (API) est défini comme un dispositif électronique programmable similaire à un ordinateur destiné à la commande des processus industriels et à l'automatisation. La fonction principale d'un automate est de commander les opérations d'une installation grâce à une analyse des informations fournies par des signaux de capteurs.

Le développement de l'automate a commencé dans les années soixante à partir du désir de remplacer les anciens contrôleurs analogiques par des contrôleurs numériques. L'automate est constitué principalement d'une alimentation, d'un processeur ou CPU (*Central Processing Unit*), des mémoires et des modules d'entrées-sorties.

Le fonctionnement d'un automate est résumé comme suit : l'automate reçoit les données via ses entrées (capteurs), puis elles sont traitées par un programme défini, et le résultat obtenu est délivré via ses sorties (pré-actionneurs). Ce cycle de traitement est toujours le

même, quel que soit le programme, mais le temps de cycle de l'automate varie en fonction de la puissance de l'automate et de la taille du programme. L'automate programmable est géré par le CPU qui reçoit, mémorise et traite les données entrantes et détermine l'état des données sortantes selon le programme établi.

6.6.1.1 Automate Schneider Premium TSX H57

Les processeurs des plates-formes d'automatisme Schneider Premium TSX H57 gèrent l'ensemble d'une station automate qui est constituée à partir de modules d'entrées-sorties numériques, de modules d'entrées-sorties analogiques et de modules métiers. Ils peuvent être répartis sur un ou plusieurs racks connectés au bus X ou au bus de terrain. Les processeurs Premium TSX H57 sont dédiés aux applications de redondance. Un système de redondance se compose de deux stations automates identiques répartis sur un ou plusieurs racks. L'un des deux automates sert d'automate primaire et l'autre d'automate redondant (Schneider).

6.6.1.2 Logiciel de programmation Unity Pro

Unity Pro est un logiciel permet de programmer les automates Télémécanique, M340, Premium, Quantum et Atrium et de développer les différentes tâches de l'automate en utilisant différents types de langage. Unity Pro est un logiciel multitâche qui offre les fonctionnalités suivantes : logiciel tout en un, librairie de blocs fonctions (FBD) intégrée et personnalisable, simulateur automate sur PC pour valider le programme avant installation, tests intégrés et diagnostic, large gamme de services en ligne et 5 langages de programmation.

Les trois langages graphiques sont : langage à contacts (LD), langage blocs fonctionnels (FBD) et langage diagramme fonctionnel en séquence (SFC) ou GRAFCET. Les deux langages textuels sont : langage littéral structuré (ST) et langage liste d'instructions (IL). L'écran ci-dessous présente l'interface utilisateur d'Unity Pro.

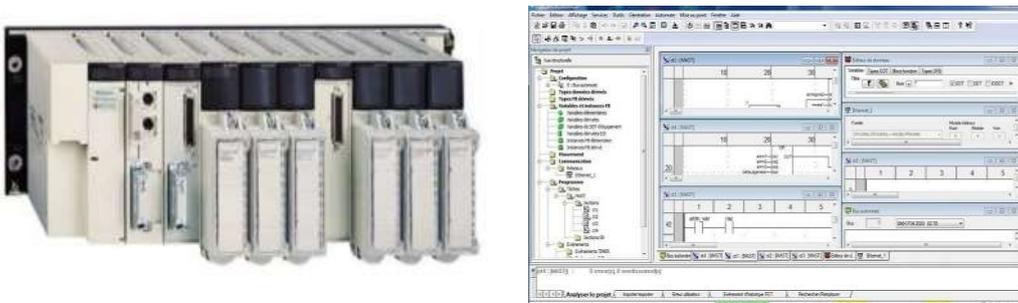


Figure 6.5 : L'automate *Schneider* et le logiciel *Unity Pro*.

6.7 Supervision dans un environnement SCADA

6.7.1 Définition de SCADA

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) est un acronyme qui signifie le contrôle, la supervision et l'acquisition de données, il s'agit d'un système de contrôle informatique industriel utilisé pour collecter et analyser les données en temps réel afin de suivre, surveiller et contrôler les équipements industriels dans différents types. La télégestion et la surveillance des équipements et la génération des alarmes sont les principaux avantages de ce système. Un système SCADA comporte de différents blocs, à savoir une interface homme-machine (HMI), un système de supervision, les unités terminales à distance (RTU), des API, l'infrastructure de communication.

6.7.2 Fonctionnalités d'un système SCADA

SCADA un système dans lequel les informations de différents paramètres dispersés sont concentrées en un seul endroit pour le traitement et en tant que critère pour exécuter une action de contrôle. Ce système comprend deux sous-ensembles fonctionnels : la surveillance et la commande des processus. Les actions de commande peuvent être classées comme suit :

- Manuel : L'utilisateur décide à 100% des actions à exécuter.
- Semi-automatique : Certaines activités sont effectuées automatiquement et certaines sont laissées à la discrétion de l'utilisateur.
- Automatique : Toutes les actions sont effectuées automatiquement.

6.7.3 Logiciel de supervision SCADA : Schneider-Vijeo Citect

Le logiciel de supervision *Vijeo Citect* est un éditeur de logiciels spécialisé dans les systèmes d'automatisation, de contrôle, de surveillance et d'acquisition des données. Ce programme permet de programmer, gérer et contrôler n'importe quel système industriel, car il contient toutes les fonctions de supervision modernes. L'architecture distribuée client-serveur de ce logiciel de supervision, peut se connecter sur plusieurs types et marques d'automates disponible. Sa flexibilité aussi, permet aux utilisateurs de construire la solution qui répond au plus près aux besoins de supervision de leurs installations.

6.8 Supervision d'un procédé industriel : une station de déminéralisation

6.8.1 Présentation de la station de déminéralisation

La station de déminéralisation concernée par cette étude est une station de déminéralisation par osmose inverse, qui sert à alimenter en eau potable plus de 200.000 habitants de la ville de Touggourt, au sud-est de l'Algérie. La station fonctionne en continu (24 heures sur 24) et comprend trois lignes d'osmose inverse qui fonctionnent indépendamment. L'eau brute d'alimentation provient des quatre forages géothermales de 1700 m de profondeur, dont la salinité moyenne est de 2,2 g/l et la température dépasse 55 °C. La station de dessalement peut traiter (46080 m³/jour) pour produire (34560 m³/jour) de l'eau traitée ayant une salinité inférieure à 0,6 g/l.

L'eau brute provenant de différents forages (plus de 1700 m du profond) passe sur quatre tours de refroidissement pour diminuer la température de 55°C à 30°C. Le débit total de l'eau brute entrant est de égale 1920 m³/h. Après le refroidissement, l'eau est stockée dans un réservoir de stockage d'eau brute d'une capacité de 5000 m³.

Une procédure de pré-chloration est prévue qui sera mise en service en cas de besoin pour faire un traitement de choc en cas de nécessité pour désinfecter l'installation. L'injection se fait par une pompe doseuse à partir d'une station de dosage de chlore. Aussi, l'acide sulfurique et un produit chimique antitartre sont ajoutés pour régler le *pH* et éviter l'entartrage sur les membranes d'osmose inverse, respectivement. Au début, l'eau brute est prétraitée pour éviter le colmatage des membranes. Ensuite, il sera repris du réservoir d'eau brute par trois pompes de gavage qui alimentent les trois lignes d'osmose inverse. Ces pompes refoulent l'eau brute depuis le réservoir d'eau brute jusqu'aux filtres à sable. Ces filtres sont destinés à éliminer les matières en suspension de l'eau. Chaque ligne de production dispose de quatre filtres à cartouche. L'étape de prétraitement de l'eau brute avant son passage dans les modules d'osmose inverse est nécessaire pour donner à l'eau brute des caractéristiques physico-chimiques compatibles avec le type de membrane utilisée, et ainsi prolonger sa durée de vie.

Suite au processus d'osmose inverse, l'eau est séparée en deux courants : le perméat pénètre à travers les membranes, où la concentration résiduelle des ions des sels est d'approximatif 2% de la concentration initiale; et le concentrat (le rejet) ou la concentration des

ions des sels est très élevée qui constitue la saumure à rejeter. L'eau potable s'écoule directement dans un réservoir de stockage après une étape de reminéralisation et une autre de post-traitement. La saumure (à haute pression) est éliminée (figure 6.6).

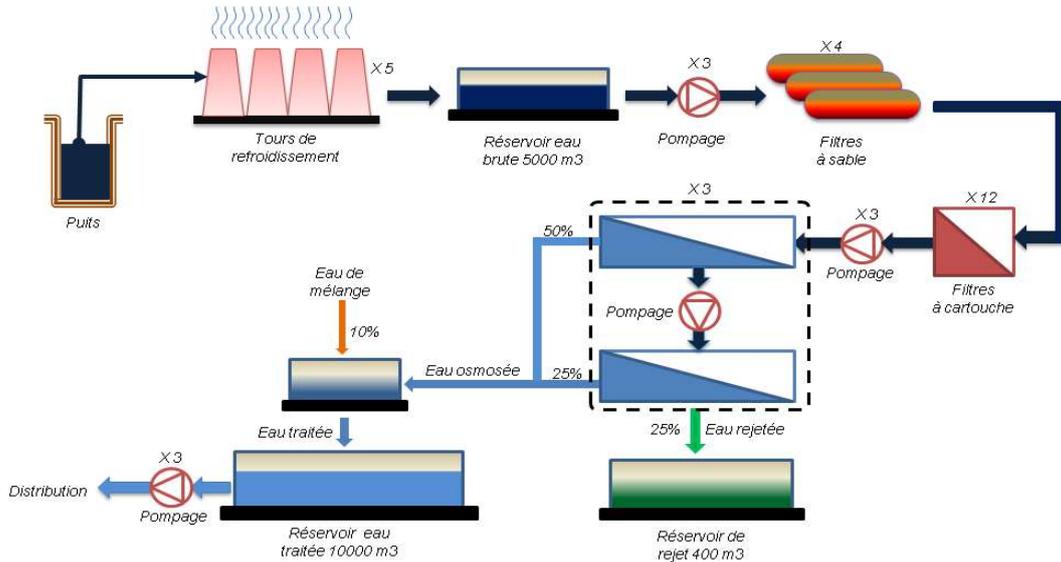


Figure 6.6 : Schéma synoptique simplifié de la station de déminéralisation de Touggourt.

6.8.2 Modélisation simplifiée de la station de déminéralisation

Cette section décrit un modèle simplifié de la station de déminéralisation, qui est utilisé pour la procédure de modélisation et de diagnostic des défauts. La figure (6.7) montre un schéma synoptique simplifié de la station osmose inverse et les variables principales du système. La station est composée de trois réservoirs T_1 , T_2 et T_3 avec chacun un niveau h_1 , h_2 et h_3 respectivement; Q_1 est le débit d'eau brute entrant au réservoir d'eau brute, Q_2 est le débit d'eau d'alimentation fourni par la pompe d'alimentation P_1 , Q_3 est le débit de perméat fourni par la pompe haute pression P_3 , Q_4 est le débit de rejet, Q_5 est l'eau rajoutée pour la reminéralisation, Q_6 est l'eau de drainage fournie par la pompe de rejet P_6 et Q_7 est la demande en eau fournie par la pompe à eau traitée P_7 . Le niveau d'eau des réservoirs peut être calculé par un bilan massique de l'eau de chaque réservoir, comme suit :

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{S_1} (Q_1 - E_2 \cdot Q_2) \quad (6.1)$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{S_2} (E_3 \cdot Q_3 + Q_5 - E_7 \cdot Q_7) \quad (6.2)$$

$$\dot{h}_3 = \frac{1}{S_3} (Q_4 - E_6 \cdot Q_6) \quad (6.3)$$

Où, h_i est le niveau d'eau du réservoir i , S_i est la section transversale de chaque réservoir, E_i l'état de la pompe ($ON = 1$; $OFF = 0$).

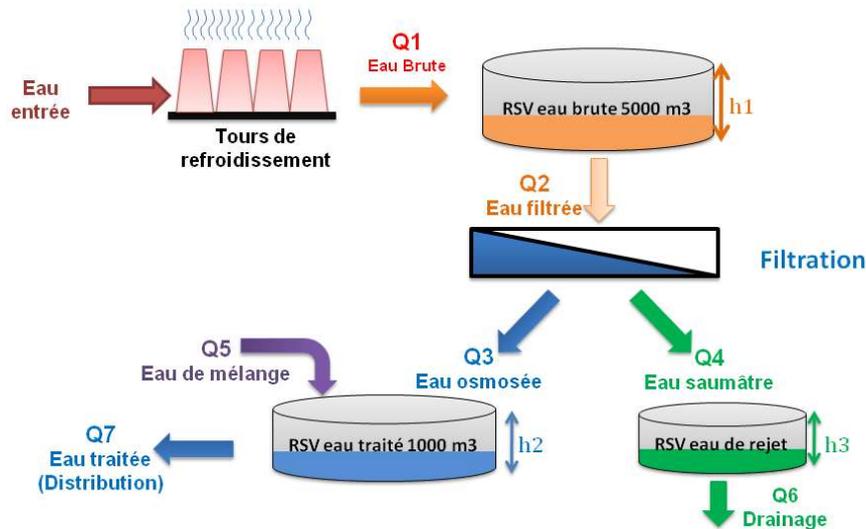


Figure 6.7 : Schéma synoptique simplifié de la station osmose inverse

6.8.3 Modes de fonctionnement normal du système

De manière générale, le fonctionnement de la station osmose inverse étudié peut se résumer en quatre modes :

- Mode 1 (Production): Dans ce mode, les réservoirs T_1 , T_2 et T_3 doivent être remplis, respectivement, jusqu'à h_{1max} , h_{2max} et h_{3max} .
- Mode 2 (Production + Drainage): Les réservoirs T_1 et T_2 doivent être remplis à h_{1max} et h_{2max} , respectivement, et le réservoir T_3 doit être vidé à h_{3min} .
- Mode 3 (Production + Drainage + Distribution): Le réservoir T_1 doit être rempli à h_{1max} , le réservoir T_3 doit être vidé à h_{3min} et le réservoir T_2 doit être rempli / vidé à h_{2max} / h_{2min} en fonction du débit transféré Q_5 .
- Mode 4 (Production + Distribution): Le réservoir T_1 doit être rempli à h_{1max} et le réservoir T_2 doit être rempli à $h_{2max} /$ vidé à h_{2min} en fonction du débit transféré Q_7 .

L'ensemble de réservoirs est alimenté par l'eau provenant des forages. Le procédé global constitue un système dynamique hybride ; le débit d'eau représente la grandeur continue alors que les états (ouvertures et fermetures) des pompes et des vannes sont les variables discrètes. Les événements d'ouverture et de fermeture des pompes sont contrôlables car l'utilisateur peut contrôler leurs instants d'occurrence. Les différentes variables d'état de ce système peuvent être les différents débits et les niveaux d'eau dans les réservoirs.

Tout dysfonctionnement peut affecter négativement la rentabilité du système, ainsi qu'un changement dans les quantités de production et de consommation peut être l'origine de

nombreux problèmes. De plus, les anciens systèmes d'exploitation installés ne peuvent fournir que des informations sur la détection des défauts, de sorte que la tentative d'intégration d'un système de diagnostic intelligent permet non seulement de détecter les défauts, mais également les localiser avec plus de précision..

6.8.4 Développement d'un système de diagnostic des défauts

En termes de production d'eau, le problème majeur de ce type de système est que l'on doit garantir un certain niveau d'eau dans les réservoirs, à différents moments de la journée, afin de satisfaire les besoins en consommation. D'où l'intérêt d'installer un système de diagnostic, qui permet d'assurer des quantités d'eau suffisantes pour le fonctionnement permanent de la station, ainsi que la distribution régulière d'eau.

La méthodologie proposée consiste à développer un système de diagnostic composé de deux modules. La génération des résidus fournit des indicateurs de défauts issus de l'aspect continu, et de l'aspect discret. Les deux types de résidus utilisés sont générés à base d'un modèle de bon fonctionnement. Par contre, le bloc de détection et de localisation des défauts permet d'évaluer les résidus générés..

A. Développement du modèle de bon fonctionnement

A.1. Modélisation de la partie continue à base modèle ANFIS

La modélisation de la station est réalisée en choisissant huit variables d'entrée-sortie; ces modèles permettent d'approcher le comportement de ce système par un ensemble de modèles ANFIS. Ces derniers ont une capacité représentative très importante. En effet, le nombre de règles nécessaires pour aborder un système avec un certain degré de précision est généralement réduit :

$$\hat{h}_1 = ANFIS_1(Q_1, Q_2, h_1) \quad (6.4)$$

$$\hat{h}_2 = ANFIS_2(Q_3, Q_5, Q_7, h_2) \quad (6.5)$$

$$\hat{h}_3 = ANFIS_3(Q_4, Q_6, h_3) \quad (6.6)$$

Pour chaque variable de système étudié, une série de données ont été utilisées pour son modélisation, obtenue à partir des données de mesures réelles. Par exemple, pour la variable de débit au niveau du réservoir d'eau T_1 , le modèle de réseau ANFIS utilisé est composé de

trois entrées et d'une sortie, et chaque entrée est représentée par trois ensembles flous de type gaussien.

A.2. Modélisation de la partie discrète à base d'automate à états finis

D'un point de vue général et informel, un automate à états finis apparaît comme un automate à état fini pilotant un ensemble d'équations différentielles modélisant la dynamique continue du système. La figure suivante montre l'automate à états finis qui représente la partie discrète.

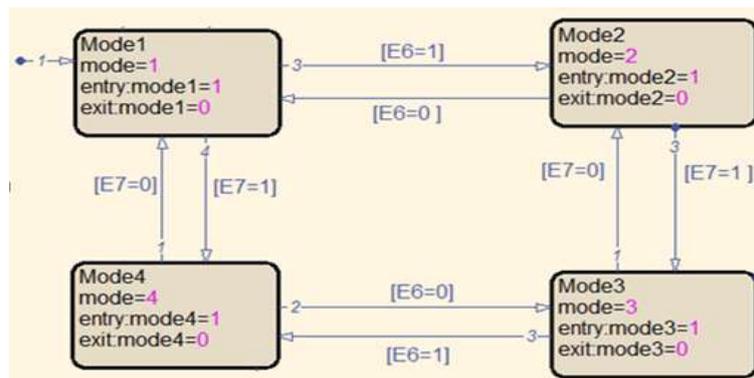


Figure 6.8 : Automate à états finis créée par *Stateflow*.

La modélisation du système permet donc, de générer les résidus, et l'étape suivante consiste à évaluer les résidus. A cet effet, une classe de défauts est suggérée puis testée afin de vérifier la fiabilité du système de diagnostic.

6.8.4.2 Diagnostic des défauts de la station de déminéralisation

Suivant l'historique de fonctionnement de la station de déminéralisation, beaucoup de défauts peuvent potentiellement apparaître dont leurs conséquences peuvent être, dans les meilleurs des cas, des pertes de performance du système. Dans le pire des cas, elles peuvent être des pannes ou dysfonctionnements de composants impliquant de sérieux dégâts au tant pour l'intégrité du système en lui-même que pour son environnement.

Parmi les défauts on peut citer : le blocage des vannes, les défauts de mesure des capteurs (débit, pression, pH,...), les défauts pompes (échec de démarrage, échec d'arrêt, perte de performance,...) ou les fuites (perte de performance des vannes, fissures, usure d'un joint,...).

a) Défauts actionneurs : Pour les défauts de blocages des électrovannes, plusieurs types de blocages peuvent être observés selon que la partie mécanique ou électronique est en cause :

- les blocages lorsque l'électrovanne est totalement ouverte ou totalement fermée.
- les blocages à n'importe quel angle d'ouverture,
- les blocages dus à une défaillance de la partie électronique.

b) Défauts système : Une fuite dans la tuyauterie représente une ouverture vers l'extérieur. Elle peut être due soit à une usure d'un joint, soit à une surpression dans la ligne causée par un fonctionnement à trop haut régime, ou encore soit à une rupture de la tuyauterie, causée par un choc externe par exemple. Une fuite dans un réservoir est représentée par une perte de performance d'une vanne de vidange, par exemple, ou une fuite dans le corps du réservoir.

c) Défauts capteurs : Un défaut de capteur est généralement lié à une rupture provoquant une chute de la mesure à nulle ou une perte de performance de mesure. La rupture du capteur est un défaut apparaissant de manière brusque, à un moment aléatoire ou pouvant dépendre d'un événement, et dont la durée de présence est permanente.

A. Génération et évaluation des résidus

La génération de résidus consiste à comparer les mesures issues du système avec leurs estimations. Les équations suivantes représentent les résidus de la partie continue, qui sont générés par le calcul de l'écart entre les sorties du système et celles des modèles Neuro-Flou.

$$r_1 = h_1 - \hat{h}_1 \quad (6.7)$$

$$r_2 = h_2 - \hat{h}_2 \quad (6.8)$$

$$r_3 = h_3 - \hat{h}_3 \quad (6.9)$$

Les résidus de la partie discrète sont donnés par les deux équations suivantes :

$$r_4 = E_6 - \hat{E}_6 \quad (6.10)$$

$$r_5 = E_7 - \hat{E}_7 \quad (6.11)$$

Où, $\hat{E}_i = \begin{cases} 1 & \text{si la pompe doit être à l'état Marche} \\ 0 & \text{si la pompe doit être à l'état Arrêt} \end{cases}$

Pour évaluer les résidus, nous avons utilisé un automate à états finis pour détecter et isoler les défauts susceptible d'affecter la station. Le principe est basé sur l'état de l'automate qui change instantanément à l'apparition d'un événement discret lors de la validation d'une

condition logique spécifiée sur la valeur de la variable continue. Nous avons présenté chaque défaut par un mode dans l'automate à états finis. Ce nouveau mode est considéré un mode défaillant. Les transitions de ces modes défaillants sont calculées à partir des seuils bien définis précédemment.

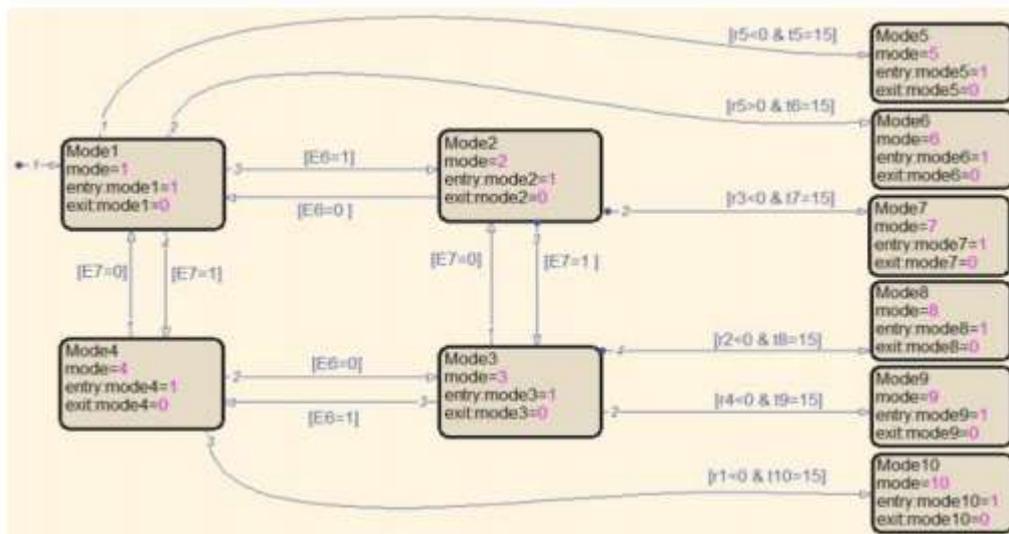


Figure 6.9 : Evaluation des résidus à base d'un Automate à états finis.

6.8.4.3 Résultats d'application

Afin de tester l'efficacité de l'approche de diagnostic proposée, nous allons considérer des défauts de manière aléatoire. Dans un premier temps, le système est affecté par six défauts de différents types comme le montre le tableau 6.2.

N°	Equipement défaillant	Description du défaut	Type de défaut	Intervalle d'appariation (s)
1	Pompe P_6	Echec de démarrage	Discret	[200,600]
2	Réservoir	Fuite	Continu	[700,1200]
3	Pompe P_3	Perte d'efficacité	Continu	[1400,1800]
4	Pompe P_6	Echec d'arrêt	Discret	[1000,2000]
5	Vanne V_3	Echec de fermeture	Discret	[2500,3500]
6	Clapet anti-retour	Blocage	Continu	[3000,4000]

Tableau 6.2 : Listes des équipements défaillants.

Défauts continus : ces défauts perturbent la dynamique continue c.-à-d. les équations d'état.

- Perte de l'efficacité de la pompe,
- Blocage du clapet anti-retour,
- Fuite réservoir : Ce défaut est représenté par une fuite au niveau du réservoir ou un défaut sur la vanne de vidange.

Défauts discrets : Ces défauts affectent la transition entre les différents modes.

- Echec du démarrage de la pompe : la pompe en état arrêt; alors qu'elle devrait fonctionner.
- Echec d'arrêt de la pompe : la pompe en état marche; alors qu'elle devrait s'arrêter.
- Echec de fermeture de la vanne : la vanne bloquée ouverte lorsqu'un événement d'ouverture se produit.

Le contrôle de la station de déminéralisation est simulé avec les boîtes à outils *MATLAB Stateflow* et *Simulink*. Il utilise spécifiquement le formalisme des graphiques d'état hybrides et fournit un élément constitutif qui peut être inclus dans un modèle *Simulink*. La figure (6.10) présente les résidus générés et les décisions appropriées.

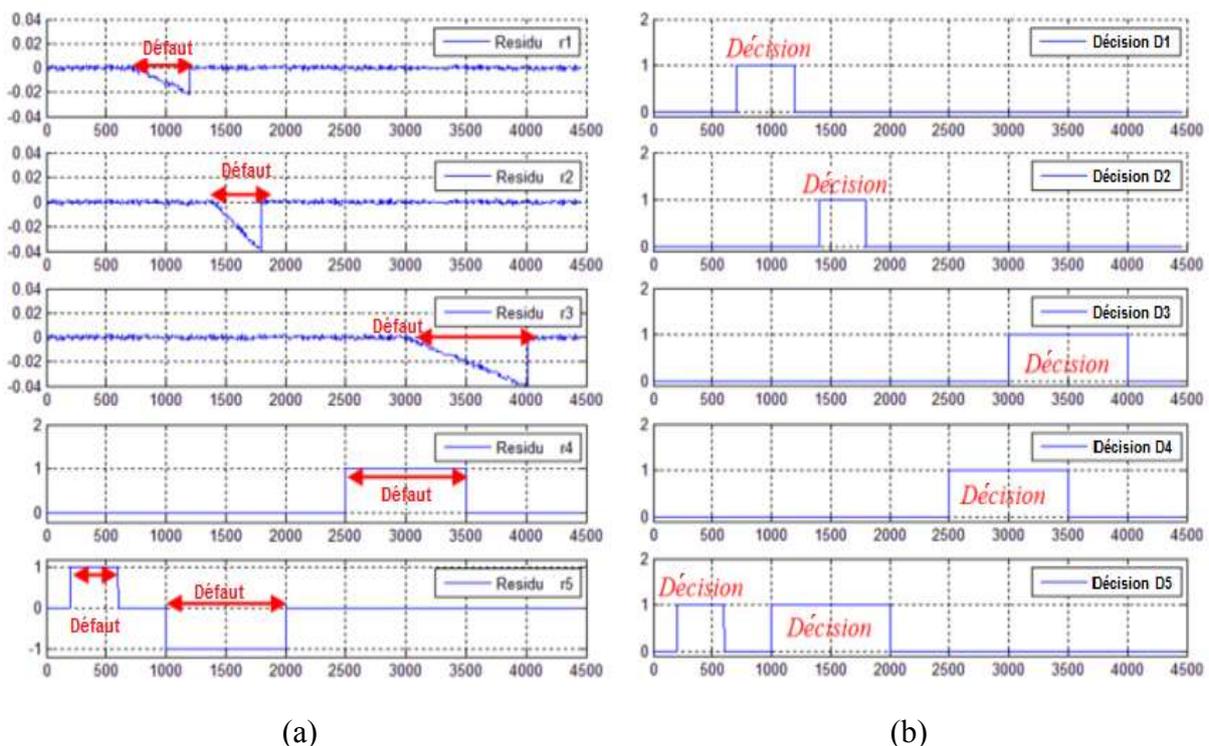


Figure 6.10 : (a) Les résidus, (b) Les décisions.

Les résultats présentés montrent l'efficacité du système de diagnostic proposé en termes de détection et de prise de décision. D'après la figure 6.10, on observe clairement la sensibilité de l'approche proposée où l'évolution des résidus dépend seulement de l'effet des défaillances produites sur le système. Le traitement de ces résidus permet ensuite d'identifier l'ensemble des défauts, quel que soit le type, sa taille et l'instant d'apparition.

6.9 Réalisation d'une nouvelle philosophie de supervision d'une installation industrielle

Les installations de production d'eau potable sont devenues largement utilisées dans le monde entier et à des fins diverses dans le domaine industriel. Par conséquent, le développement de ce type de systèmes est nécessaire pour assurer l'approvisionnement continu en eau de haute qualité. Ainsi, l'utilisation d'un système de supervision intelligent pour contrôler ces installations est la solution appropriée, où ces installations peuvent être surveillées à l'aide d'un centre de contrôle équipé par des logiciels et des ordinateurs spécialisés.

La diversité des marques et des logiciels est un bon facteur dans le processus de sélection des systèmes de contrôle et de supervision, mais le lien entre ces différentes marques représente un obstacle majeur pour les utilisateurs, en raison du manque de normalisation des mécanismes de la langue de communication. Le besoin de normaliser les protocoles et les systèmes de communication utilisés dans l'automatisation industrielle est donc, une nécessité critique. Par conséquent, des normes de contrôle du processus nommées OPC (*Open Platform Communications*) ont émergé et ont été développées sur la base d'une architecture client-serveur pour la communication avec divers contrôleurs. L'OPC est un standard d'interopérabilité et de communication industrielle, permettant la communication entre plusieurs applications et l'interopérabilité entre les différents fabricants de logiciels et de matériels.

L'objectif de cette application était de développer une nouvelle stratégie de supervision pour la station de déminéralisation d'eau, qui pourrait aider les opérateurs à résoudre certains problèmes de contrôle et de surveillance. Au début, nous avons essayé d'établir une connexion entre les différents automates programmables industriels APIs, SCADA et MATLAB. Cette connexion permet, ensuite, d'intégrer en temps réel les nouvelles philosophies de surveillance et de contrôle requises.

6.9.1 Philosophie de fonctionnement des dysfonctionnements

Le système de contrôle programmé des procédés industriels est très précis; en effet, les installations de traitements des eaux sont très sensibles et coûteuses ce qui fait enregistrer un défaut, même simple, un problème conduit à arrêter immédiatement la production.

Afin de surmonter ces obstacles, nous avons décidé de mettre à jour le système de supervision de la station de déminéralisation en essayant d'éviter les arrêts de production lors de l'apparition de défauts pouvant être évités facilement, par exemple : des niveaux élevés de réservoirs secondaires ou une diminution de la concentration de produits chimiques dans l'eau. Nous pouvons diviser les défauts enregistrés en trois dysfonctionnements critiques :

- Le système s'est arrêté brusquement sans l'identification de l'emplacement des défauts. Donc, la gestion des alarmes dans cette station de déminéralisation nécessite quelques ajustements. Pour cela, essayons d'ajouter des instructions et des alarmes intelligentes, pour éviter les arrêts indésirables du système.
- La détermination des paramètres de consigne de fonctionnement de certains équipements pose également un problème majeur. Alors, la création d'un simulateur du système permet de tester l'influence des nouvelles paramètres seront ajoutées afin d'éviter l'occurrence des accidents qui pourraient se produire.

6.9.2 Implantation en temps réel des contrôleurs flous

L'interruption de production due à un défaut technique simple ou une alarme temporaire a un effet négatif sur le rendement productif et enregistre ainsi la discontinuité du programme quotidien de distribution d'eau potable.

Pour assurer le fonctionnement continu de la station et après avoir étudié les différentes raisons menant à l'interruption des débits de production, des nouveaux contrôleurs intelligents sont installés pour améliorer la stratégie de surveillance. Notre objectif est l'utilisation des contrôleurs intelligents, basé sur les techniques d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, logique floue), afin d'aboutir à une supervision intelligente, (par exemple : en changeant les contrôleurs PID classiques par des contrôleurs flous).

La conception classique du contrôleur PID nécessite une connaissance précise du modèle de système à contrôler. Les valeurs d'entrée doivent être mesurées avec précision pour éviter les erreurs. La stratégie classique de contrôle repose sur l'ajustement manuel des points de consigne qui modifient les valeurs mesurées requises.

Cette stratégie classique conduit souvent à de mauvaises situations voire à des pannes et des accidents. De ce fait, dans cette application, nous réalisons une nouvelle méthode de contrôle basée sur l'utilisation des contrôleurs flous. Pour un contrôleur flou, la connaissance du modèle mathématique du processus n'est pas nécessaire. C'est l'expérience des opérateurs du processus ou la connaissance des experts, qui est prise en compte pour établir la commande floue. Les algorithmes de réglage conventionnels sont alors remplacés par une série de règles linguistiques.

6.9.2.1 La commande floue

La commande floue a pour but de traiter des problèmes de commande de processus basés sur l'utilisation des connaissances de comportement au lieu que les spécialistes du processus doivent formuler sous une forme linguistique (floue). Donc, il n'est pas nécessaire de connaître les différentes fonctions de transferts. La commande par logique floue peut fonctionner lorsque les processus à contrôler sont inconnus ou difficiles à décrire avec précision, ou lorsque les variables sont évaluées subjectivement et exprimées en langage naturel.

Un système flou ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise plutôt des inférences avec de nombreuses règles basées sur des variables linguistiques. Il apprécie de façon approximative les variables d'entrées (min, max, bas, haut), fait de même avec les variables de sortie et émet un ensemble de règles qui permettent de sélectionner les sorties en fonction des entrées.

6.9.2.2 Structure du contrôleur flou (FLC)

Les contrôleurs flous (FLC : *Fuzzy Logic Controller*) fonctionnent sur des variables linguistiques au lieu de variables numériques, ils fournissent un algorithme pour convertir une stratégie de contrôle linguistique basée sur l'expertise humaine en une stratégie de contrôle automatique. La structure conventionnelle d'un contrôleur flou est généralement constituée de quatre blocs différents :

- La fuzzification des entrées et sorties,
- Une base de connaissance,
- Les inférences floues selon une base des règles,
- La défuzzification des sorties.

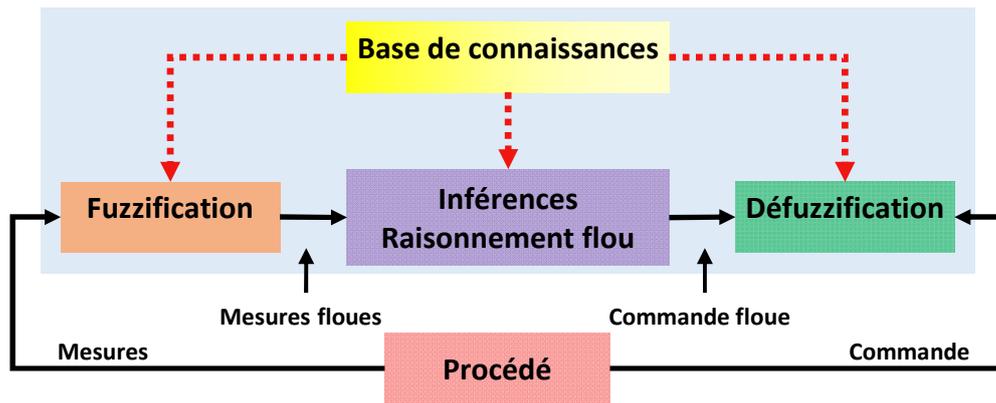


Figure 6. 11 : Structure de base d'un système flou.

6.9.2.3 Recommandations d'implémentation des contrôleurs flous

Nous tenons compte les descriptions générales et les recommandations, ainsi que les instructions sur la façon de créer des contrôleurs flous. En outre, le processus de conception et la mise en œuvre de contrôleurs flous sont les parties les plus excitantes du développement.

Le moyen le plus simple et le plus courant d'implémenter un contrôleur flou est de le faire comme un programme exécuté par un processeur. Cependant, de nombreuses applications de contrôle flou nécessitent un traitement des données en temps réel pour faire évoluer le périphérique externe. Les conditions d'implémentation matérielle sont :

- Rapidité : exécution à grande vitesse (Réponse du contrôleur flou),
- Faible complexité,
- La fuzzification et la défuzzification doivent être très simples et nécessiter l'allocation d'un espace mémoire réduit.
- Flexibilité élevée.

Ces conditions s'opposent l'une contre l'autre. Ce rend la tâche difficile, c'est pour cela il faut faire un compromis entre ces facteurs, comme le coût de fabrication ou le coût de conception (important en recherche et développement).

6.9.2.4 Serveur OPC

OPC (*Open Platform Communications*) est nommée comme protocole de contrôle de processus ouvert. Il s'agit d'une norme d'interopérabilité pour l'échange fiable et sécurisé de données dans le domaine de l'automatisation industrielle et dans d'autres industries. Aujourd'hui, l'OPC a connu une grande importance dans le domaine de l'automatisation industrielle. Il est devenu le service de choix dans un environnement de contrôle de processus.

Un serveur OPC peut exécuter des fonctions telles que l'enregistrement de données dans une base de données ou la fourniture d'un lien vers l'API et le système SCADA. Cette méthode proposée permet de réaliser un traitement des données et un contrôle avancés dans le domaine industriel, pour améliorer la qualité du contrôle.

De façon générale, il existe un grand nombre de serveurs OPC permettant la connectivité avec différents automates programmables industriels, PC industriels, etc. Très souvent, les fabricants d'équipements d'automatisation proposent une suite logicielle OPC compatible avec leur gamme de produits. Cela permet alors aux éditeurs de logiciels de surveillance de créer des applications client OPC pour accéder facilement aux données en temps réel d'un processus de fabrication, d'un système, d'une machine, etc.

Le serveur OPC est basé sur l'architecture client/serveur. Il peut fonctionner comme un serveur en fournissant des données et qui agit comme un client en utilisant ses données. En effet, c'est une norme de communication industrielle largement acceptée qui permet l'échange de données entre les appareils et les applications de contrôle construites par les différents fournisseurs sans aucune restriction propriétaire. Même lorsque l'équipement et les logiciels proviennent de fournisseurs différents, un serveur OPC peut communiquer des données en continu et en temps réel entre les automates programmables, les terminaux à distance RTU, les HMI et les applications logicielles.

a) Avantages du serveur OPC : Les avantages d'un serveur OPC sont nombreux : il offre une totale indépendance vis-à-vis des équipementiers et éditeurs de logiciels. Cette normalisation réalisée, permet alors, de créer une communication entre les instruments de différents protocoles et les logiciels externes en utilisant une seule passerelle (Vardar et al., 2018).

b) Architecture client-serveur OPC : Les serveurs OPC traditionnels utilisent l'infrastructure Microsoft Windows comme outil d'échange de données. Cela signifie qu'ils doivent s'exécuter sur le système d'exploitation Microsoft Windows. Un serveur OPC peut prendre en charge la communication avec plusieurs clients OPC simultanément. Une fonction clé du serveur OPC est de convertir les données spécifiques à la source de données dans un format OPC conforme à une ou plusieurs spécifications OPC.

Les fonctions de configuration OPC définissent la partie OPC des communications du serveur OPC; ainsi, l'efficacité et la qualité des traductions Local-OPC et OPC-Local

dépendent entièrement de la mise en œuvre du serveur OPC de chaque fournisseur. Les serveurs OPC communiquent avec les contrôleurs, les applications et les sources de données.

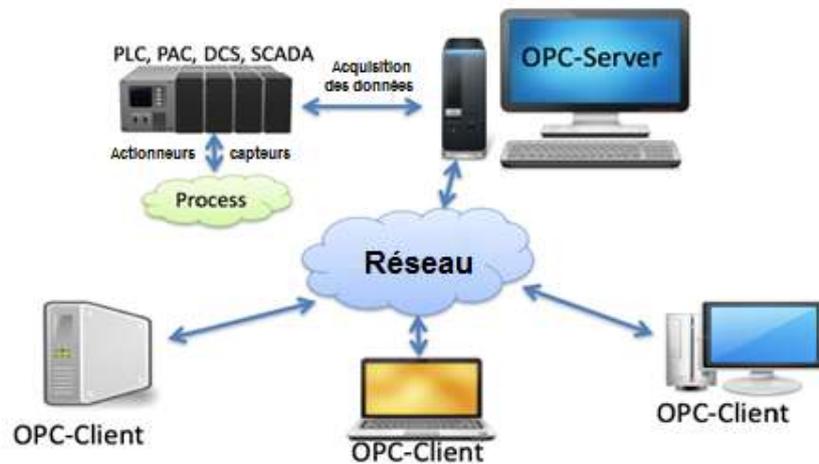


Figure 6.12 : Architecture de serveur *OPC*.

c) Communication API et MATLAB : OPCtoolbox pour MATLAB et Simulink fournit un accès instantané et direct aux données OPC de manière rétroactive. Les données OPC peuvent être lues, écrites et enregistrées à partir d'appareils tels que les automates, les systèmes de contrôle distribués, et les systèmes d'acquisition de données. Dans notre communication OPC, MATLAB joue le rôle du client. Il existe trois méthodes pour créer et manipuler ce client :

- **Depuis MATLAB :** Ce dernier nous permet de définir et manipuler le client OPC, ses groupes et ses éléments par des fonctions et des classes prédéfinies dans MATLAB avec OPCtoolbox (comme lire, écrire, se connecter...).
- **Depuis OPCtool :** OPCtool est un outil permettant de manipuler OPC graphiquement; il permet de définir un client, des groupes et des éléments et d'exporter la configuration vers MATLAB ou SIMULINK.
- **Depuis Simulink :** A l'aide de la boîte à outils OPC de Simulink, vous pouvez configurer une connexion OPC et créer un client et lire/écrire à partir d'éléments OPC.

6.9.3 Conception et implémentation

Dans un projet industriel, il est toujours nécessaire de faciliter le contrôle des différents sites de l'installation et ceci en introduisant des interfaces de communication et de supervision

par le moyen des ordinateurs ou des écrans tactiles programmés par des logiciels d'interface homme machine.

La station de déminéralisation de Touggourt est destinée pour garantir la production d'eau potable, et de transférer l'eau produit au complexe hydraulique qui comporte deux réservoirs de stockage d'eau traitée, une station de pompage, et un château d'eau. Malheureusement, la station de pompage ne comporte pas un système automatisé afin d'être superviser et fonctionner d'une façon automatique avec la production de la station de déminéralisation.

	Station de déminéralisation	Station de pompage + Distribution
Commande	Automatique (APIs)	Manuelle
Supervision	SCADA	Indisponible
Système de télégestion	Disponible	Indisponible (distance 3Km)

Tableau 6.3 : Situation globale actuelle du système.

Pour élaborer la plateforme de supervision qui permet de contrôler et de commander globalement le système, nous avons essayé de :

- créer une nouvelle philosophie d'automatisation et de supervision,
- proposer une commande intelligente des équipements.

6.9.3.1 Equipements et méthodes

Toutes les expérimentations ont été réalisées dans la station de déminéralisation-Touggourt, qui dispose de tous les types d'équipements nécessaires à la simulation du système conçu.

- Des automates Schneider pour piloter les systèmes de contrôle.
- Un système SCADA a été connecté aux APIs Schneider, ce qui permet de superviser le procédé et de modifier les valeurs de divers paramètres. Pour concevoir et mettre en œuvre les programmes de contrôle dans les APIs et le système SCADA, un ordinateur a été connecté via le protocole TCP/IP.
- Un système de télégestion par un module GSM a été installé avec les APIs et le système SCADA afin de gérer les équipements à distance.
- Des pompes équipées de variateurs de fréquence. Ceux-ci sont utilisés pour contrôler la vitesse des pompes et ajuster le débit.
- Des vannes de type Tout Ou Rien.

La figure suivante montre le schéma fonctionnel de la structure matérielle du système.

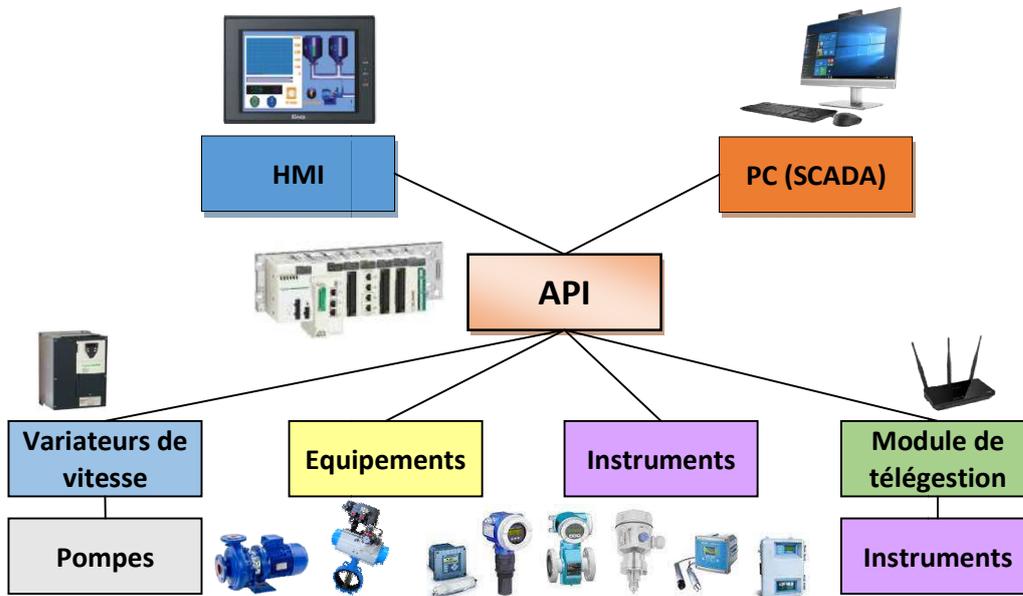


Figure 6.13 : Schéma fonctionnel de la structure matérielle du système.

6.9.3.2 Description des logiciels

Des différents logiciels ont été utilisés pour programmer le système. La tâche importante était de développer la communication entre l'automate Schneider, SCADA et MATLAB/Simulink.

- a) **Logiciel Unity Pro** : Unity Pro est un logiciel développé par Schneider, pour la programmation de ses automates. Il est utilisé pour la conception et le développement de programmes de contrôle de processus.
- b) **Logiciel Vijeo Citect** : L'interface SCADA a été implémentée via le logiciel Vijeo Citect développé par Schneider.
- c) **MATLAB/Simulink** : Dans MATLAB/Simulink, les blocs « OPC Read » et « OPC Write », envoient des données au serveur OPC. Les blocs incluent un gestionnaire de clients pour identifier et gérer le serveur OPC, sélectionner les éléments et définir les temps d'échantillonnage.

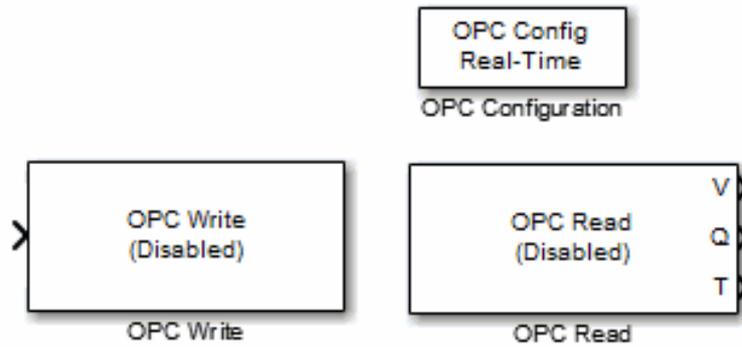


Figure 6.14 : Blocs Serveur OPC de MATLAB.

Dans ce projet, le contrôle en temps réel a été réalisé en utilisant le système de communication MATLAB-API basé sur le serveur OPC. Pour implémenter la communication entre le serveur OPC et MATLAB, une passerelle a été implémentée. Les automates programmables développés par Schneider possèdent plusieurs fonctionnalités puissantes et peuvent aussi servir une large gamme d'applications. Les données étaient accessibles depuis Unity Pro via le serveur OPC.

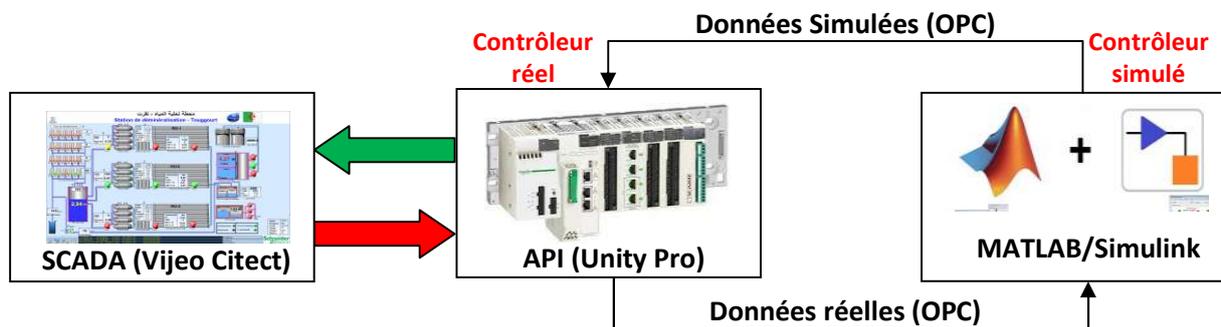


Figure 6.15 : API, SCADA, MATLAB et serveur OPC.

6.9.3.3 Traitement du système

À tout moment, l'automate reçoit des informations des transmetteurs de niveau, l'état des vannes et des pompes, etc. Toutes ces données sont ensuite envoyées aux MATLAB via le serveur OPC. Deux contrôleurs flous conçus dans MATLAB sont utilisés pour contrôler le système. Ces contrôleurs flous traitent les données et les renvoient à l'API pour prendre les commandes et les ordres requis.

- a) Le premier contrôleur flou a été conçu pour contrôler les équipements de réservoir de stockage et la vanne intermédiaire en fonction des limites supérieure et inférieure du niveau d'eau du réservoir et du château d'eau.

b) Le deuxième contrôleur flou permet de gérer les équipements de château d'eau et de régler le débit en fonction de la vitesse des pompes. Pour tester le fonctionnement du deuxième contrôleur, la valeur du point de consigne a été modifiée dans une période de temps différente.

- Au début si le niveau d'eau du réservoir de stockage est inférieur à la limite supérieure, la vanne intermédiaire s'ouvrira.
- Lorsque le niveau d'eau franchit la limite supérieure, la vanne intermédiaire se ferme jusqu'à ce que l'eau atteigne la limite inférieure. Lorsque le niveau d'eau descend à la limite inférieure, la vanne intermédiaire s'ouvre à nouveau.
- Dans le cas d'un contrôleur de niveau de château d'eau, l'API obtient des informations du transmetteur de niveau d'eau dans le château d'eau via le système de communication GSM et reçoit également des informations d'entrée de point de consigne de SCADA et les envoie au contrôleur flou.
- Le contrôleur flou traite les données et les renvoie à l'API pour prendre les commandes et les ordres nécessaires.
- Si le niveau d'eau dans le château d'eau est bas, le contrôleur augmente la vitesse des pompes pour atteindre le niveau de point de consigne.
- Si le niveau d'eau est élevé, le contrôleur ralentira la vitesse.
- Lorsque la consigne et le niveau d'eau sont tous les deux au même endroit, la vitesse des deux pompes devient régulière.

La figure suivante représente la communication entre l'API, SCADA et MATLAB/Simulink.

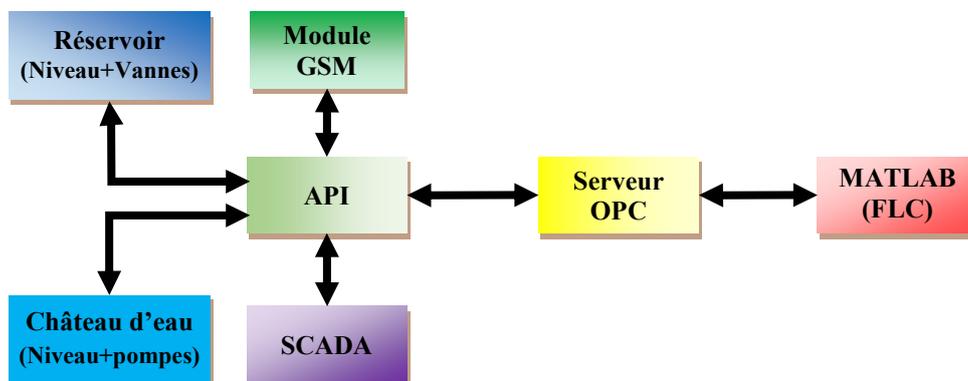


Figure 6.16 : Schéma fonctionnel pour le traitement des données.

6.9.3.4 Conception du contrôleur 1

La première étape pour concevoir un contrôleur flou est l'éditeur FIS. Le Contrôleur flou nommé "Réservoir" a deux variables d'entrée floues "Niveau" et "Taux" et une sortie "Vanne". L'éditeur FIS est illustré à la figure ci-dessous.

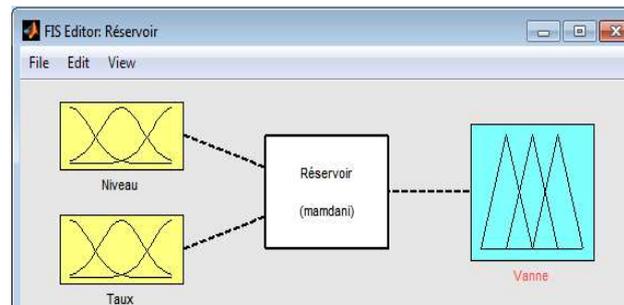


Figure 6.17 : Éditeur FIS pour le contrôleur de vanne de réservoir avec deux entrées.

a) Éditeur des fonctions d'appartenance : Définissez les ensembles flous pour caractériser les variables d'entrée et de sortie définies dans l'éditeur FIS, comme illustré à la Fig.6.17.

b) Ensembles flous caractérisant les entrées : Les deux variables d'entrée pour le premier contrôleur flou nommé "Réservoir" ont trois fonctions triangulaires qui sont déterminées sur la plage de 0 à 6 pour le "Niveau" et de -1 à 1 pour le "Taux".

- Les fonctions d'appartenance pour le variable d'entrée "Niveau" sont : "Bas", "Moyen" et "Haut" avec les plages $[-2,4 \ 0 \ 2,4]$, $[0,6 \ 3 \ 5,4]$ et $[4,5 \ 6 \ 8,4]$, respectivement.
- De même, les fonctions d'appartenance pour le variable d'entrée "Taux" sont : "Négatif", "Aucun" et "Positif" avec les plages $[-1,706 \ -1 \ -0,2936]$, $[-0,7064 \ 0 \ 0,7064]$ et $[0,2936 \ 1 \ 1,706]$, respectivement.

c) Ensembles flous caractérisant les sorties :

- La variable de sortie pour le premier contrôleur flou nommé « Réservoir » a cinq fonctions d'appartenance triangulaires sur la plage de -1 à 1.
- Les fonctions pour la variable de sortie "Vanne" sont : "Partiellement fermée", "fermée", "pas de changement", "Partiellement ouverte" et "ouverte" avec des plages $[-1 \ à \ -0,8]$, $[-0,6 \ à \ -0,4]$, $[-0,1 \ à \ 0,1]$, $[0,2 \ à \ 0,4]$ et $[0,8 \ à \ 1]$, respectivement.

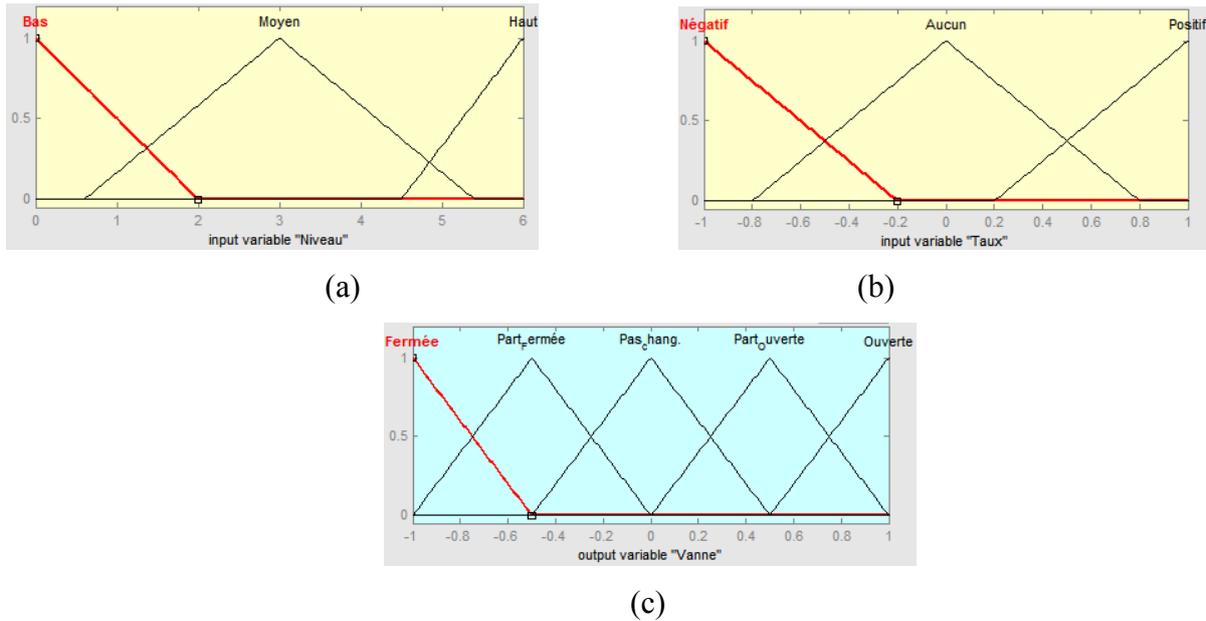


Figure 6.18 : Fonctions d'appartenance (a). Variable d'entrée "Niveau" (b). Variable d'entrée "Taux" (c). Variable de sortie "Vanne".

d) Règles floues

Les règles floues pour le premier contrôleur flou nommé « Réservoir » sont données ci-dessous.

1. Si (Niveau est Bas) alors (Vanne est Ouverte),
2. Si (Niveau est Haut) alors (Vanne est Fermée),
3. Si (Niveau est Moyen) et (Taux est Positif) alors (Vanne est Partiellement fermée),
4. Si (Niveau est Moyen) et (Taux est Négatif) alors (Vanne est Partiellement ouverte),
5. Si (Niveau est Moyen) alors (Vanne est Pas de changement).

6.9.3.5 Conception du contrôleur 2

Dans ce contrôleur, il y a deux variables d'entrée floues ('Niveau' et 'erreur') et deux sorties 'Distribution' et 'Vitesse de pompe'. L'éditeur FIS est illustré à la figure 6.19.

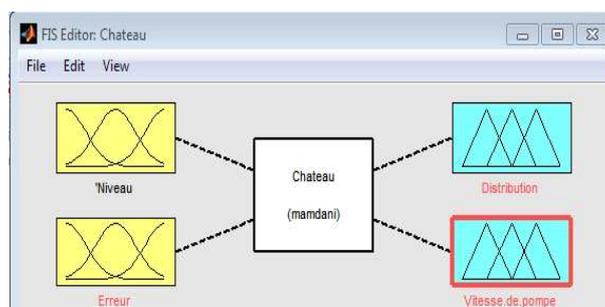


Figure 6.19 : Éditeur FIS pour le régulateur de vitesse des pompes avec deux entrées.

a) **Éditeur de fonction de membre :** La figure 6.19 montre l'éditeur de fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie.

b) **Ensemble flou de caractérisation de l'entrée :** Les variables d'entrée ont des fonctions d'appartenance qui sont déterminées sur la plage de 0 à 4 pour « Niveau » et de -1 à 1 pour « Erreur ».

- Les fonctions d'appartenance pour le premier variable d'entrée sont "Bas", "Moyen" et "Haut" et leurs plages sont $[-1.6 \ 0 \ 1.6]$, $[0.4 \ 2 \ 3.6]$ et $[2.4 \ 4 \ 5.6]$, respectivement.
- La deuxième variable d'entrée a sept fonctions d'appartenance et leurs plages sont "NB", "NM", "NS", "Z", "PS", "PM" et "PB" et leurs plages sont $[-1.333 \ -1 \ -0.6666]$, $[-1 \ -0,6666 \ -0,3334]$, $[-0,6666 \ -0,3334 \ 0]$, $[-0,3334 \ 0 \ 0,3334]$, $[0 \ 0,3334 \ 0,6664]$, $[0,3334 \ 0,6664 \ 1]$ et $[0,6664 \ 1 \ 1,334]$, respectivement.

c) **Ensemble flou caractérisant la sortie :** Les variables de première sortie nommée « Distribution » ont trois fonctions d'appartenance triangulaires sur la plage de 0 à 4.

- Les fonctions d'appartenance sont : "Bas", "Moyen" et "Haut", leurs plages sont : $[-0,4 \ 0 \ 0,4]$, $[0,1 \ 0,5 \ 0,9]$ et $[0,6 \ 1 \ 1,4]$.
- Les variables de deuxième sortie nommée "Vitesse de pompe" ont cinq fonctions d'appartenance triangulaires sur la plage de 0 à 1. Les fonctions d'appartenance sont : "LLS", "LS", "MS", "FS" et "FFS", leurs plages sont : $[-0,25 \ 0 \ 0,25]$, $[0 \ 0,25 \ 0,5]$, $[0,25 \ 0,5 \ 0,75]$, $[0,5 \ 0,75 \ 1]$ et $[0,75 \ 1 \ 1,25]$.

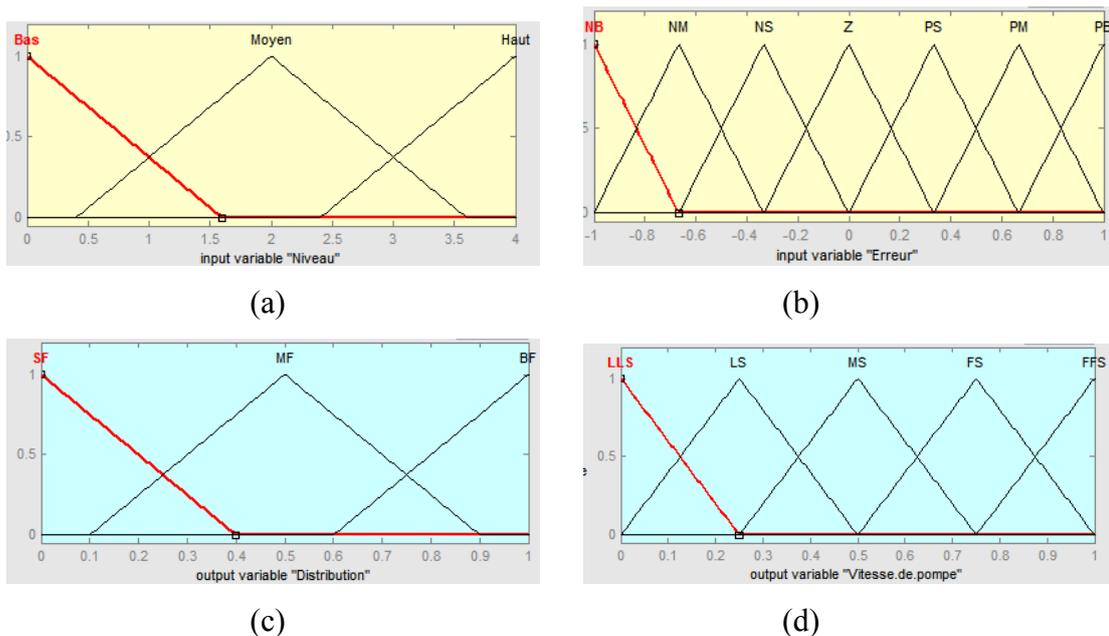


Figure 6.20 : Fonctions d'appartenance (a). Variable d'entrée "Niveau" (b). Variable d'entrée "Erreur" (c). Variable de sortie "Niveau" (d). Variable de sortie "Vitesse de pompe".

d) Règle floue.

Le premier variable de sortie du contrôleur 2 a trois fonctions d'appartenance. Donc, le nombre de règles est égale $(3)^2=9$ règles. Le deuxième variable de sortie du contrôleur 2 comporte aussi sept fonctions d'appartenance. Ce qui rend le nombre de règles pour la deuxième sortie égale $(7)^2=49$ règles.

6.9.3.6 Résultats et discussion

Au cours de la simulation, la réponse des deux contrôleurs a été testée en modifiant les valeurs d'entrée à différentes étapes. Pour les tests à différents points de consigne, les valeurs des paramètres de point de consigne ont changé, ce qui a permis d'aboutir à de bons résultats.

6.10 Conclusion

OPC est d'une grande importance dans le domaine de l'automatisation industrielle. Le logiciel serveur OPC peut exécuter des fonctions telles que l'enregistrement des données de terrain sur des serveurs OPC, puis l'enregistrement dans une base de données ou l'association avec le logiciel SCADA. La norme OPC a permis un système d'automatisation intégré et un flux d'informations du plus bas au plus haut niveau. Les applications développées à l'aide des normes OPC se multiplient également. La méthode proposée est le traitement des données et le contrôle avancé dans le domaine industriel pour améliorer la qualité du contrôle.

Conclusion générale

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est de proposer une démarche générale de surveillance et de commande tolérante aux défauts des systèmes dynamiques hybrides. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé une approche basée sur la combinaison entre les modèles Neuro-Flou et les automates (à états finis + hybrides). Le choix de ces méthodes proposé est la complémentarité de ces deux modèles : D'une part les modèles Neuro-Flou pour modéliser la dynamique continue des systèmes dynamiques hybrides. Ces modèles ont la capacité de modéliser les processus non linéaires et de manipuler la connaissance numérique et symbolique d'un système. Les modèles Neuro-Flou sont nés de l'association des deux techniques d'intelligence artificielle, les réseaux de neurones et la logique floue, afin de tirer profit de ces deux techniques. D'autre part, les automates sont utilisés pour la représentation dynamique discrète et continue du système. Le choix du formalisme d'automate comme outil pertinent de modélisation des SDH est choisi pour sa simplicité et sa capacité à représenter une large classe de systèmes hybrides.

Les travaux présentés dans cette thèse se concentrent sur la surveillance et la conception de la commande tolérante aux défauts pour les systèmes dynamiques hybrides. La démarche de surveillance et de commande tolérante aux défauts développée dans ce mémoire propose :

- Une procédure de diagnostic Neuro-Flou appliquée à un système à deux réservoirs. L'idée est de modéliser le système à base d'un modèle Neuro-Flou et de considérer la prise de décision à base d'un modèle Flou (Achbi et al., 2020). Cette procédure confirme l'efficacité du modèle Neuro-Flou pour le diagnostic des systèmes dynamiques hybrides.
- Une autre procédure de diagnostic Neuro-Flou appliquée à un système de trois réservoirs (Achbi et al., 2021). L'idée est de combiner le modèle Neuro-Flou et l'automate à états finis pour modéliser le système dynamique hybride puis d'implémenter un modèle Flou pour la prise de décision.
- Le travail présenté dans (Achbi et Kechida, 2020b) détaille la mise en œuvre d'une commande tolérante Neuro-Flou appliquée à un système hydraulique. Dans cet article, nous avons présenté une version améliorée de la modélisation des SDH (déjà présenté dans le premier travail) en ajoutant un automate à états finis pour représenter la partie discrète), puis nous avons proposé une stratégie de commande tolérante aux défauts appliqués sur le système deux réservoirs.

La mise en œuvre réelle de ces techniques dans le domaine industriel est également un défi pour nous. Pour cela, deux travaux ont été proposés :

- Une application de diagnostic Neuro-Flou introduite sur une Station de déminéralisation. L'idée est de modéliser la partie continue du système à base d'un modèle Neuro-Flou, de structurer un automate à états finis pour modéliser la partie discrète du système et un autre pour la prise de décision (Achbi et Kechida, 2020).
- Une dernière application réelle basée sur l'utilisation des contrôleurs flous. L'objectif est de développer un nouvel système de supervision pour une station de déminéralisation par osmose inverse, qui pourrait aider les opérateurs à résoudre certains problèmes de contrôle et de surveillance. Une connexion entre les automates programmables industriels API et MATLAB a été réalisée avec succès.

Les avantages et les inconvénients des travaux proposés permettent d'identifier plusieurs perspectives qui constituent des pistes intéressantes et prometteuses pour des travaux de recherche à venir. Ces pistes concernent :

- L'implantation réelle d'un système de supervision et d'aide à la décision dans la station de déminéralisation et d'améliorer la philosophie de contrôle utilisée.
- La conception d'un modèle capable d'assurer la phase de pronostic de défaillances et les anticiper.
- La proposition d'autres méthodes de surveillance et de commande tolérante aux défauts (imprévus).

Bibliographie

- Achbi, M.S., 2012. *Commande Tolérante Aux Défauts En Utilisant Les Réseaux De Neurones Artificiels Et Les Systèmes D'inférence Floue* (Phd Thesis). Université Mohamed Khider-Biskra.
- Achbi, M.S., Kechida, S., 2020. Methodology For Monitoring And Diagnosing Faults Of Hybrid Dynamic Systems: A Case Study On A Desalination Plant. *Diagnostyka* 21, 1641–6414.
- Achbi, M.S., Kechida, S., Mhamdi, L., Dhouibi, H., 2021. A Neural-Fuzzy Approach For Fault Diagnosis Of Hybrid Dynamical Systems: Demonstration On Three-Tank System. *Acta Mech. Autom.* 8.
- Achbi, M.S., Mhamdi, L., Kechida, S., Dhouibi, H., 2020. Methodology To Knowledge Discovery For Fault Diagnosis Of Hybrid Dynamical Systems: Demonstration On Two Tanks System. *Diagnostyka* 21, 115–123.
- Afnor, M., 2010. *Concepts Et Définitions Des Activités De Maintenance*. Norme Nf X 60–010.
- Akhenak, A., Bako, L., Duviella, E., Pekpe, K.M., Lecoeuche, S., 2008. Fault Diagnosis For Switching System Using Observer Kalman Filter Identification. *Ifac Proc. Vol., 17th Ifac World Congress* 41, 10142–10147. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-Kr-1001.01716>
- Alur, R., Courcoubetis, C., Halbwachs, N., Henzinger, T.A., Ho, P.-H., Nicollin, X., Olivero, A., Sifakis, J., Yovine, S., 1995. The Algorithmic Analysis Of Hybrid Systems. *Theor. Comput. Sci.* 138, 3–34.
- Alur, R., Courcoubetis, C., Henzinger, T., Ho, P., 1993. *Hybrid Automata: An Algorithmic Approach To The Specification And Analysis Of Hybrid Systems*, Hybrid Systems, Lncs 736. Springer-Verlag.
- Andry, A.N., Shapiro, E.Y., Chung, J.C., 1983. Eigenstructure Assignment For Linear Systems. *Ieee Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 711–729.
- Antsaklis, P.J., Koutsoukos, X.D., 2003. Hybrid Systems: Review And Recent Progress. *Softw.-Enabled Control Inf. Technol. Dyn. Syst.* 273–298.
- Antsaklis, P.J., Lemmon, M., Stiver, J.A., 1993. Hybrid System Modeling And Event Identification. *Isis* 93, 002.
- Azua, H.M., Zamaï, É., Descotes-Genon, B., 2005. Quality, Productivity, Security And Ecological Criteria For Synthesis Of Monitoring Laws. *Qual. Eng.* 17.
- Balluchi, A., Benvenuti, L., Di Benedetto, M.D., Sangiovanni-Vincentelli, A.L., 2002. Design Of Observers For Hybrid Systems, In: *International Workshop On Hybrid Systems: Computation And Control*. Springer, Pp. 76–89.
- Basseville, M., 1998. On-Board Component Fault Detection And Isolation Using The Statistical Local Approach. *Automatica* 34, 1391–1415.
- Batis, S., 2013. *Commande D'une Classe De Systèmes Hybrides Par Automates Hybrides Rectangulaires* (Phd Thesis). Grenoble.
- Belkhiat, D.E.C., 2011. *Diagnostic D'une Classe De Systèmes Linéaires A Commutations : Approche A Base D'observateurs Robustes* (These De Doctorat). Reims.
- Beltran, G., Daniel, C., 2004. *Outils Pour L'aide A La Supervision De Procédés Dans Une Architecture Multiagent*, [Http://www.theses.fr](http://www.theses.fr). Grenoble Inpg.
- Bhowal, P., Sarkar, D., Mukhopadhyay, S., Basu, A., 2007. Fault Diagnosis In Discrete Time Hybrid Systems—A Case Study. *Inf. Sci.* 177, 1290–1308.

- Biswas, G., Simon, G., Mahadevan, N., Narasimhan, S., Ramirez, J., Karsai, G., 2003. A Robust Method For Hybrid Diagnosis Of Complex Systems, In: Proceedings Of The 5th Symposium On Fault Detection, Supervision And Safety For Technical Processes. Pp. 1125–1131.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., Schröder, J., 2006. Diagnosis And Fault-Tolerant Control. Springer.
- Bonneval, A. De, 1993. Mécanismes De Reprise Dans Les Systèmes De Commande A Evénements Discrets (Phd Thesis). Toulouse 3.
- Bošković, J.D., Mehra, R.K., 2003. Failure Detection, Identification And Reconfiguration System For A Redundant Actuator Assembly. Ifac Proc. Vol. 36, 411–416.
- Bouamama, B.O., Medjaher, K., Samantaray, A., Staroswiecki, M., 2006. Supervision Of An Industrial Steam Generator. Part I: Bond Graph Modelling. Control Eng. Pract. 14, 71–83.
- Boukas, E.-K., 2007. Stochastic Switching Systems: Analysis And Design. Springer Science & Business Media.
- Bourdais, R., Hetel, L., Daafouz, J., Perruquetti, W., 2007. Stabilité Et Stabilisation D'une Classe De Systèmes Dynamiques Hybrides. J. Eur. Systèmes Autom. Jesa 41, 819–853.
- Boussaïd, B., 2011. Contribution A La Tolérance Active Aux Défauts Des Systèmes Dynamiques Par Gestion Des Références (Phd Thesis). Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- Branicky, M., 1995. Studies In Hybrid Systems: Modeling, Analysis, And Control, Ph. D. Thesis. Massachusetts Inst. Technol. 2304.
- Breuker, J., Van De Velde, W., 1994. Commonkads Library For Expertise Modelling: Reusable Problem Solving Components. Ios Press.
- Buisson, J., Cormerais, H., 1998. Descriptor Systems For The Knowledge Modelling And Simulation Of Hybrid Physical Systems. J. Eur. Systèmes Autom. 32, 1047–1072.
- Cassandras, C.G., Lafortune, S., 2008. Introduction To Discrete Event Systems (Springer).
- Cassandras, C.G., Lafortune, S., 1999. Discrete Event Systems: The State Of The Art And New Directions, In: Applied And Computational Control, Signals, And Circuits. Springer, Pp. 1–65.
- Champagnat, R., 1998. Supervision Des Systèmes Discontinus: Définition D'un Modèle Hybride Et Pilotage En Temps-Réel (Phd Thesis). Toulouse 3.
- Charbonnier, F., 1996. Commande Supervisée Des Systèmes A Evénements Discrets (Phd Thesis). Grenoble Inpg.
- Chatti, N., 2013. Contribution A La Supervision Des Systèmes Dynamiques A Base Des Bond Graphs Signés (Phd Thesis).
- Christophe, C., Cocquempot, V., Jiang, B., 2004. Link Between High-Gain Observer-Based And Parity Space Residuals For Fdi. Trans. Inst. Meas. Control 26, 325–337. <https://doi.org/10.1191/0142331204tm125oa>
- Cocquempot, V., 2004. Contribution A La Surveillance Des Systèmes Industriels Complexes (Phd Thesis).
- Cocquempot, V., El Mezzyani, T., Staroswiecki, M., 2004. Fault Detection And Isolation For Hybrid Systems Using Structured Parity Residuals, In: 2004 5th Asian Control Conference (Ieee Cat. No. 04ex904). Ieee, Pp. 1204–1212.
- Combacau, M., 1991. Commande Et Surveillance Des Systèmes A Evénements Discrets Complexes: Application Aux Ateliers Flexibles (Phd Thesis). Toulouse 3.
- Combacau, M., Berruet, P., Charbonnaud, F., Khatab, A., 2000a. Réflexions Sur La Terminologie: Surveillance–Supervision. Group. Pour Rech. En Prod. Systèmes Prod. Sûrs Fonct.
- Combacau, M., Berruet, P., Zamai, E., Charbonnaud, P., Khatab, A., 2000b. Supervision And Monitoring Of Production Systems. Ifac Proc. Vol. 33, 849–854.

- Daigle, M.J., 2008. A Qualitative Event-Based Approach To Fault Diagnosis Of Hybrid Systems (Phd Thesis).
- Darabi, H., Jafari, M.A., Buczak, A.L., 2003. A Control Switching Theory For Supervisory Control Of Discrete Event Systems. *Ieee Trans. Robot. Autom.* 19, 131–137.
- David, R., Alla, H., 2005. *Discrete, Continuous, And Hybrid Petri Nets*. Springer.
- David, R., Alla, H., 1994. Petri Nets For Modeling Of Dynamic Systems: A Survey. *Automatica* 30, 175–202.
- De Larminat, P., 1993. *Automatique: Commande Des Systèmes Linéaires*. Hermes Paris.
- Debibi, R., 2016. Développement D'un Système De Supervision, D'acquisition... -
- Derbel, H., 2009. Diagnostic A Base De Modèles Des Systèmes Temporisés Et D'une Sous-Classe De Systèmes Dynamiques Hybrides. *Autom. Robot. Univ. Joseph-Fourier - Grenoble 2009 Français*. Tel-00445949.
- Dionísio, R.V., Mosca, E., Lemos, J.M., Shirley, P.O., 2003. Adaptive Fault Tolerant Control With Adaptive Residual Generation. *Ifac Proc. Vol. 36*, 275–280.
- Domlan, E.A., Maquin, D., Ragot, J., 2004. Diagnostic Des Systèmes A Commutation, Approche Par La Méthode De L'espace De Parité, In: *Conférence Internationale Francophone D'automatique, Cifa*. Pp. 22–24.
- Du, D., Jiang, B., Shi, P., 2015. *Fault Tolerant Control For Switched Linear Systems*. Springer.
- Dubuisson, B., 2001. *Automatique Et Statistiques Pour Le Diagnostic*. Hermes Sci. Eur. Ltd.
- Dumitrescu, E., Girault, A., Marchand, H., Rutten, E., 2007. Optimal Discrete Controller Synthesis For The Modeling Of Fault-Tolerant Distributed Systems.
- El Mezyani, T., 2005. *Méthodologie De Surveillance Des Systèmes Dynamiques Hybrides (Phd Thesis)*. Lille 1.
- El-Dessouky, H.T., Ettouney, H.M., 2002. *Fundamentals Of Salt Water Desalination*. Elsevier.
- Eryurek, E., Upadhyaya, B.R., 1995. An Integrated Fault Tolerant Control And Diagnostics System For Nuclear Power Plants, In: *Proceedings Of The Topical Meeting On Computer Based Human Support Systems: Technology, Methods And Future*. Pp. 267–274.
- Fabre, F., 2009. *Conduite Orientée Ordonnancement D'un Simulateur Dynamique Hybride: Application Aux Procédés Discontinus (Phd Thesis)*.
- Fakhfakh, O., 2015. *Surveillance Et Diagnostic Par Le Flux D'ATELIERS De Production Cyclique (Phd Thesis)*.
- Gao, Z., Antsaklis, P.J., 1992. Reconfigurable Control System Design Via Perfect Model Following. *Int. J. Control* 56, 783–798.
- Garcia-Beltran, C., 2004. *Outils Pour L'aide A La Supervision De Procédés Dans Une Architecture Multiagent (Phd Thesis)*.
- Gentil, S., Montmain, J., Combastel, C., 2004. Combining Fdi And Ai Approaches Within Causal-Model-Based Diagnosis. *Ieee Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern.* 34, 2207–2221. <https://doi.org/10.1109/Tsmcb.2004.833335>
- Gertler, J., Luo, Q., Anderson, K., Fang, X., 1990. Diagnosis Of Plant Failures Using Orthogonal Parity Equations. *Ifac Proc. Vol., 11th Ifac World Congress On Automatic Control, Tallinn, 1990 - Volume 4, Tallinn, Finland* 23, 361–366. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)51850-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)51850-9)
- Ghomri, L., 2012. *Synthèse De Contrôleur De Systèmes Hybrides A Flux Continu Par Réseaux De Petri Hybrides (Phd Thesis)*.
- Gomaa, M.M.M., 1997. *Représentation Et Supervision Des Systèmes Hybrides Par Réseaux De Pétri (Phd Thesis)*. Grenoble Inpg.
- Gómez P., L., 2014. *Modelling, Simulation And Advanced Control Of Small-Scale Reverse Osmosis Desalination Plants*.

- Gopinathan, M., Mehra, R.K., Runkle, J.C., 1999. A Model Predictive Fault-Tolerant Temperature Control Scheme For Hot Isostatic Pressing Furnaces, In: Proceedings Of The 1999 American Control Conference (Cat. No. 99ch36251). Ieee, Pp. 637–641.
- Gueguen, H., Lefebvre, M.-A., 2001. A Comparison Of Mixed Specification Formalisms. *J. Eur. Systèmes Autom.* 35, 381–394.
- Guenab, F., 2007. Contribution Aux Systèmes Tolérants Aux Défauts: Synthèse D'une Méthode De Reconfiguration Et/Ou De Restructuration Intégrant La Fiabilité Des Composants (Phd Thesis). Université Henri Poincaré-Nancy I.
- Haar, S., Benveniste, A., Fabre, E., Jard, C., 2003. Partial Order Diagnosability Of Discrete Event Systems Using Petri Net Unfoldings, In: 42nd Ieee International Conference On Decision And Control (Ieee Cat. No. 03ch37475). Ieee, Pp. 3748–3753.
- Haddad, W.M., Chellaboina, V.S., Nersesov, S., 2006. Impulsive And Hybrid Dynamical Systems. Princeton Series In Applied Mathematics. Princeton University Press, Princeton, Nj.
- Hamdi, F., 2010. Contribution A La Synthèse D'observateurs Pour Les Systèmes Hybrides (Phd Thesis). Université De Batna 2.
- Hamdi, F., Manamanni, N., Messai, N., Benmahammed, K., 2009. Hybrid Observer Design For Linear Switched System Via Differential Petri Nets. *Nonlinear Anal. Hybrid Syst.* 3, 310–322.
- Henzinger, T.A., Ho, P.-H., Wong-Toi, H., 1998. Algorithmic Analysis Of Nonlinear Hybrid Systems. *Ieee Trans. Autom. Control* 43, 540–554.
- Huang, C.Y., Stengel, R.F., 1990. Restructurable Control Using Proportional-Integral Implicit Model Following. *J. Guid. Control Dyn.* 13, 303–309.
- Ioradache, M.V., Antsaklis, P.J., 2004. Resilience To Failures And Reconfigurations In The Supervision Based On Place Invariants, In: Proceedings Of The 2004 American Control Conference. Ieee, Pp. 4477–4482.
- Isermann, R., Ballé, P., 2000. Applied Terminology Of Fault Detection, Supervision And Safety For Technical Processes, In: Ifac Symposium On Fault Detection Supervision And Safety For Technical Process.
- Isermann, R., Balle, P., 1997. Trends In The Application Of Model-Based Fault Detection And Diagnosis Of Technical Processes. *Control Eng. Pract.* 5, 709–719.
- Isidori, A., 1995. Nonlinear Control Systems, 3rd Ed, Communications And Control Engineering, Nonlinear Control Systems. Springer-Verlag, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-615-5>
- Jain, A.K., Duin, R.P.W., Mao, J., 2000. Statistical Pattern Recognition: A Review. *Ieee Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22, 4–37.
- Jain, T., Yamé, J.J., Sauter, D., 2018. Active Fault-Tolerant Control Systems.
- Jamouli, H., 2003. Génération De Résidus Directionnels Pour Le Diagnostic Des Systèmes Linéaires Stochastiques Et La Commande Tolérante Aux Défauts (Phd Thesis). Thèse De L'université Henri Poincaré, Nancy I.
- Janan, Z., 2001. Systèmes Dynamiques Hybrides [Livre]. Paris Hermes Sci.
- Jang, J.-S., 1993. Anfis: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *Ieee Trans. Syst. Man Cybern.* 23, 665–685.
- Jiang, B., Staroswiecki, M., Cocquempot, V., 2003. Active Fault Tolerant Control For A Class Of Nonlinear Systems. *Ifac Proc. Vol.* 36, 125–130.
- Jiang, J., Zhao, Q., 2000. Design Of Reliable Control Systems Possessing Actuator Redundancies. *J. Guid. Control Dyn.* 23, 709–718.
- Johansson, M.K.-J., 2003. Piecewise Linear Control Systems: A Computational Approach. Springer.
- Juloski, A., 2004. Observer Design And Identification Methods For Hybrid Systems.
- Kanev, S.K., 2004. Robust Fault-Tolerant Control. Febo-Druk.

- Karoui, M., 2011. Surveillance Des Processus Dynamiques Événementiels (Phd Thesis). Grenoble.
- Karsai, G., Abdelwahed, S., Biswas, G., 2003. Integrated Diagnosis And Control For Hybrid Dynamic Systems, In: Aiaa Guidance, Navigation, And Control Conference And Exhibit. P. 5673.
- Kerrigan, E.C., Maciejowski, J.M., 1999. Fault-Tolerant Control Of A Ship Propulsion System Using Model Predictive Control, In: 1999 European Control Conference (Ecc). Ieee, Pp. 4602–4607.
- Konstantopoulos, I., Antsaklis, P., 1996. An Eigenstructure Assignment Approach To Control Reconfiguration, In: Proceedings Of The 4th Ieee Mediterranean Symposium On Control Et Automation, Chania, Crete, Greece. Pp. 328–333.
- Kopke, P.W., 1996. The Theory Of Rectangular Hybrid Automata. Cornell University.
- Koutsoukos, X., Feng Zhao, Haussecker, H., Reich, J., Cheung, P., 2001. Fault Modeling For Monitoring And Diagnosis Of Sensor-Rich Hybrid Systems, In: Proceedings Of The 40th Ieee Conference On Decision And Control (Cat. No.01ch37228). Presented At The Proceedings Of The 40th Ieee Conference On Decision And Control (Cat. No.01ch37228), Pp. 793–801 Vol.1. <https://doi.org/10.1109/Cdc.2001.980203>
- Koutsoukos, X.D., He, K.X., Lemmon, M.D., Antsaklis, P.J., 1998. Timed Petri Nets In Hybrid Systems: Stability And Supervisory Control. *Discrete Event Dyn. Syst.* 8, 137–173.
- Kratz, F., Aubry, D., 2003. Finite Memory Observer For State Estimation Of Hybrid Systems, In: Proceedings Of Ifac Safeprocess. P. 44.
- Landau, I.D., 1999. From Robust Control To Adaptive Control. *Control Eng. Pract.* 7, 1113–1124.
- Liao, F., Wang, J.L., Yang, G.-H., 2002. Reliable Robust Flight Tracking Control: An Lmi Approach. *Ieee Trans. Control Syst. Technol.* 10, 76–89.
- Liu, B., 2014. An Efficient Approach For Diagnosability And Diagnosis Of Des Based On Labeled Petri Nets, Untimed And Timed Contexts (Phd Thesis).
- Liu, B., Ghazel, M., Toguyéni, A., 2017. On-The-Fly And Incremental Technique For Fault Diagnosis Of Discrete Event Systems Modeled By Labeled Petri Nets: On-The-Fly Fault Diagnosis Of Dess Modeled By Lpns. *Asian J. Control.* <https://doi.org/10.1002/Asjc.1508>
- Liu, B., Ghazel, M., Toguyéni, A., 2013. Evaluation A La Volée De La Diagnosticabilité Des Systèmes A Événements Discrets Temporisés. *J. Eur. Syst. Autom. Ed. Spéc. Msr* 13, 227–242.
- Liu, B., Ghazel, M., Toguyeni, A., 2012. K-Diagnosability Of Labeled Petri Nets.
- Liu, X.-F., Dexter, A., 2001. Fault-Tolerant Supervisory Control Of Vav Air-Conditioning Systems. *Energy Build.* 33, 379–389.
- Looze, D., Weiss, J.L., Eterno, J., Barrett, N., 1985. An Automatic Redesign Approach For Restructurable Control Systems. *Ieee Control Syst. Mag.* 5, 16–22.
- Lopez-Toribio, C.J., Patton, R.J., Daley, S., 2000. Takagi–Sugeno Fuzzy Fault-Tolerant Control Of An Induction Motor. *Neural Comput. Appl.* 9, 19–28.
- Lunze, J., 2006. Diagnosis Of Discretely Controlled Continuous Systems (Diagnose Ereignisgesteuerter Systeme). *-Autom.* 54, 385–395.
- Lunze, J., 2000. Diagnosis Of Quantized Systems Based On A Timed Discrete-Event Model. *Ieee Trans. Syst. Man Cybern.-Part Syst. Hum.* 30, 322–335.
- Lunze, J., Lamnabhi-Lagarrigue, F., 2009. Handbook Of Hybrid Systems Control: Theory, Tools, Applications. Cambridge University Press.
- Lygeros, J., Johansson, K.H., Simic, S.N., Zhang, J., Sastry, S.S., 2003. Dynamical Properties Of Hybrid Automata. *Ieee Trans. Autom. Control* 48, 2–17.
- Maciejowski, J., Jones, C., 2003. Mpc Fault-Tolerant Flight Control Case Study: Flight 1862.

- Maciejowski, J.M., 1997a. Modelling And Predictive Control: Enabling Technologies For Reconfiguration, In: Proceedings Of Ifac Symposium On System Structure And Control.
- Maciejowski, J.M., 1997b. Reconfigurable Control Using Constrained Optimization, In: Proceeding Of European Control Conference Ecc97, Brussels, Belgium. Pp. 107–130.
- Manders, E.-J., Narasimhan, S., Biswas, G., Mosterman, P.J., 2000. A Combined Qualitative/Quantitative Approach For Fault Isolation In Continuous Dynamic Systems. *Ifac Proc.* Vol. 33, 505–510.
- Maquin, D., Ragot, J., 2000. *Diagnostic Des Systèmes Linéaires*. Hermès Science Publications.
- Maybeck, P.S., Stevens, R.D., 1990. Reconfigurable Flight Control Via Multiple Model Adaptive Control Methods, In: 29th Ieee Conference On Decision And Control. Ieee, Pp. 3351–3356.
- Medjmadj, S., 2018. *Méthodes Et Outils D'aide A La Décision En Vue De La Commande Tolérante Aux Défauts Des Entraînements Electriques* (Phd Thesis).
- Metaiche, M., 2006. *Optimisation Des Systèmes De Dessalement Par Osmose Inverse: Conception, Paramètres De Fonctionnement Et Simulation Numérique* (Phd Thesis). Ecole Nationale Polytechnique D'alger.
- Methnani, S., 2012. *Diagnostic, Reconstruction Et Identification Des Défauts Capteurs Et Actionneurs: Application Aux Station D'épurations Des Eaux Usées* (Phd Thesis).
- M'halla, A., 2010. *Contribution A La Gestion Des Perturbations Dans Les Systèmes Manufacturiers A Contraintes De Temps* (Phd Thesis). Ecole Centrale De Lille; École Nationale D'ingénieurs De Tunis (Tunisie).
- Milne, R., 1987. Strategies For Diagnosis. *Ieee Trans. Syst. Man Cybern.* 17, 333–339.
- Mnassri, B., 2012. *Analyse De Données Multivariées Et Surveillance Des Processus Industriels Par Analyse En Composantes Principales* (Phd Thesis). Aix-Marseille.
- Moerder, D.D., Halyo, N., Broussard, J.R., Caglayan, A.K., 1989. Application Of Precomputed Control Laws In A Reconfigurable Aircraftflight Control System. *J. Guid. Control Dyn.* 12, 325–333.
- Montmain, J., 1992. *Interprétation Qualitative De Simulations Pour Le Diagnostic En Ligne De Procédés Continus* (Phd Thesis). Grenoble Inpg.
- Moor, T., Schmidt, K.W., 2017. The Controllability Prefix For Supervisory Control Under Partial Observation With An Application To Fault-Tolerant Control. *Ifac-Pap.* 50, 13642–13647.
- Morio, V., 2009. *Contribution Au Développement D'une Loi De Guidage Autonome Par Platitude. Application A Une Mission De Rentrée Atmosphérique*. (Phd Thesis).
- Mosterman, P.J., Biswas, G., 1999. Diagnosis Of Continuous Valued Systems In Transient Operating Regions. *Ieee Trans. Syst. Man Cybern.-Part Syst. Hum.* 29, 554–565.
- Mouchaweh, M.S., 2002. *Conception D'un Système De Diagnostic Adaptatif Et Prédicatif Basé Sur La Méthode Fuzzy Pattern Matching Pour La Surveillance En Ligne Des Systèmes Evolutifs* (Phd Thesis). Université De Reims-Champagne Ardenne.
- Mouchaweh, M.S., Phillipot, A., Ménétrier, V.C., 2005. Detectability And Diagnosability Of Discrete Event Systems - Application On Manufacturing Systems. Presented At The International Conference On Informatics In Control, Automation And Robotics, Scitepress, Pp. 149–154. <https://doi.org/10.5220/0001176201490154>
- Nett, C.N., Jacobson, C.A., Miller, A.T., 1988. An Integrated Approach To Controls And Diagnostics: The 4-Parameter Controller, In: 1988 American Control Conference. Ieee, Pp. 824–835.
- Niemann, H., Stoustrup, J., 2005. Passive Fault Tolerant Control Of A Double Inverted Pendulum—A Case Study. *Control Eng. Pract.* 13, 1047–1059.
- Nke, Y., Lunze, J., 2010. Fault-Tolerant Control Of Nondeterministic Input/Output Automata Subject To Actuator Faults. *Ifac Proc.* Vol. 43, 350–355.

- Noura, H., Sauter, D., Hamelin, F., Theilliol, D., 2000. Fault-Tolerant Control In Dynamic Systems: Application To A Winding Machine. *Ieee Control Syst. Mag.* 20, 33–49. <https://doi.org/10.1109/37.823226>
- Olivier-Maget, N., Hetreux, G., Le Lann, J.M., Le Lann, M.V., 2009. Model-Based Fault Diagnosis For Hybrid Systems: Application On Chemical Processes. *Comput. Chem. Eng.* 33, 1617–1630.
- Oudghiri, M., 2008. *Commande Multi-Modèles Tolérante Aux Défauts: Application Au Contrôle De La Dynamique D'un Véhicule Automobile.* (Phd Thesis).
- Park, S.-J., Cho, K.-H., 2009. Supervisory Control For Fault-Tolerant Scheduling Of Real-Time Multiprocessor Systems With Aperiodic Tasks. *Int. J. Control* 82, 217–227.
- Patton, R.J., 1997. Fault-Tolerant Control: The 1997 Situation. *Ifac Proc.* Vol. 30, 1029–1051.
- Patton, R.J., Chen, J., 1997. Observer-Based Fault Detection And Isolation: Robustness And Applications. *Control Eng. Pract.* 5, 671–682.
- Pencolé, Y., 2004. Diagnosability Analysis Of Distributed Discrete Event Systems, In: *Ecai*. P. 43.
- Philippot, A., 2006. *Contribution Au Diagnostic Décentralisé Des Systèmes A Evénements Discrets: Application Aux Systèmes Manufacturiers.* Univ. Reims-Champagne Ardenne.
- Polycarpou, M.M., Helmicki, A.J., 1995. Automated Fault Detection And Accommodation: A Learning Systems Approach. *Ieee Trans. Syst. Man Cybern.* 25, 1447–1458.
- Prakash, J., Patwardhan, S.C., Shah, S.L., 2010. Design And Implementation Fault Tolerant Model Predictive Control Scheme On A Simulated Model Of A Three-Tank Hybrid System, In: *2010 Conference On Control And Fault-Tolerant Systems (Systol).* Ieee, Pp. 173–178.
- Rakotoson, M.P., Vercauter, C., Gentina, J.C., 1992. Analyse Des Systèmes De Production Dits «Continus-Discrets» Et Critères De Hiérarchisation Du Niveau Coordination/Supervision. *Autom. Procédés Mixte Contin. Séquentiels Process.* «Dis-Contin. Adpm 92, 11–22.
- Ramadge, P.J., Wonham, W., 1987. Modular Feedback Logic For Discrete Event Systems. *Siam J. Control Optim.* 25, 1202–1218.
- Rauch, H.E., 1995. Autonomous Control Reconfiguration. *Ieee Control Syst. Mag.* 15, 37–48.
- Rayhane, H., 2004. *Surveillance Des Systèmes De Production Automatisés: Détection Et Aide Au Diagnostic* (Phd Thesis).
- Rodrigues, M., Theilliol, D., Sauter, D., 2006. Fault Tolerant Control Design For Switched Systems, In: *Analysis And Design Of Hybrid Systems 2006.* Elsevier, Pp. 223–228.
- Roychoudhury, I., Daigle, M.J., Biswas, G., Koutsoukos, X., 2011. Efficient Simulation Of Hybrid Systems: A Hybrid Bond Graph Approach. *Simulation* 87, 467–498.
- Saadaoui, H., Djemai, M., Manamanni, N., Floquet, T., Barbot, J.-P., 2006. Exact Differentiation Via Sliding Mode Observer For Switched Systems, In: *Analysis And Design Of Hybrid Systems 2006.* Elsevier, Pp. 124–129.
- Sampath, M., Sengupta, R., Lafortune, S., Sinnamohideen, K., Teneketzis, D., 1995. Diagnosability Of Discrete-Event Systems. *Ieee Trans. Autom. Control* 40, 1555–1575. <https://doi.org/10.1109/9.412626>
- Sed - Surveillance Des Systèmes A Evénements Discrets Commandés: Conception Et Implémentation En Utilisant L'automate Programmable Industriel [Www Document], N.D. Url <https://tel.archives-ouvertes.fr/gipsa-sed/tel-00347788v1> (Accessed 6.6.20).
- Šiljak, D.D., 1980. Reliable Control Using Multiple Control Systems. *Int. J. Control* 31, 303–329.
- Staroswiecki, M., 2005. Fault Tolerant Control: The Pseudo-Inverse Method Revisited. *Ifac Proc.* Vol. 38, 418–423.
- Staroswiecki, M., Gehin, A.-L., 2001. From Control To Supervision. *Annu. Rev. Control* 25, 1–11.

- Steyer, J.-P., Genovesi, A., Harmand, J., 2001. Outils D'aide Au Diagnostic Et Détection De Pannes. Hermes Science.
- Su, R., Wonham, W.M., Kurien, J., Koutsoukos, X., 2002. Distributed Diagnosis For Qualitative Systems, In: Sixth International Workshop On Discrete Event Systems, 2002. Proceedings. Ieee, Pp. 169–174.
- Sun, Y., El-Farra, N.H., 2011. Robust Fault Detection And Reconfigurable Control Of Distributed Energy Generation Systems, In: Proceedings Of The 2011 American Control Conference. Ieee, Pp. 2671–2676.
- Tahiri, I., 2020. Contribution A La Conception D'une Commande Reconfigurable Et Tolérante Aux Fautes Pour Les Systèmes Automatisés De Production (Phd Thesis). Reims.
- Tamas, A.P., 2004. Etude Comparée Du Colmatage En Nanofiltration Et En Ultrafiltration D'eau De Surface.
- Theilliol, D., 2003. Contribution A L'étude Et Au Développement Des Systèmes Tolérants Aux Défauts: Diagnostic Et Accommodation A Base De Modèles Linéaires Et Au-Delà. Habilit. À Dir. Rech. Univ. Henri Poincaré-Nancy 1.
- Toguyeni, A.K.A., 1992. Surveillance Et Diagnostic En Ligne Dans Les Ateliers Flexibles De L'industrie Manufacturière (Phd Thesis). Lille 1.
- Touaf, S., 2005. Diagnostic Logique Des Systèmes Complexes Et Dynamiques Dans Un Contexte Multi-Agent. Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Travé-Massuyès, L., Milne, R., 1997. Gas-Turbine Condition Monitoring Using Qualitative Model-Based Diagnosis. Ieee Expert 12, 22–31.
- Tripakis, S., 2002. Fault Diagnosis For Timed Automata, In: Proceedings Of The 7th International Symposium On Formal Techniques In Real-Time And Fault-Tolerant Systems: Co-Sponsored By Ifip Wg 2.2, Ftrft '02. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Pp. 205–224.
- Tyler, M.L., Morari, M., 1994. Optimal And Robust Design Of Integrated Control And Diagnostic Modules, In: Proceedings Of 1994 American Control Conference-Acc'94. Ieee, Pp. 2060–2064.
- Vardar, E., Giraz, A.H., Örenbaş, H., Şahin, S., 2018. Opc Server Based And Real Time Motor Speed Control With Plc Communication System, In: 2018 26th Signal Processing And Communications Applications Conference (Siu). Ieee, Pp. 1–4.
- Veillette, R.J., 1995. Reliable Linear-Quadratic State-Feedback Control. Automatica 31, 137–143.
- Veillette, R.J., Medanic, J.V., Perkins, W.R., 1990. Design Of Reliable Control Systems, In: 29th Ieee Conference On Decision And Control. Ieee, Pp. 1131–1136.
- Vento, J., Sarrate, R., 2010. Fault Detection And Isolation Of Hybrid System Using Diagnosers That Combine Discrete And Continuous Dynamics, In: 2010 Conference On Control And Fault-Tolerant Systems (Systol). Ieee, Pp. 149–154.
- Vergé, M., Jaume, D., 2003. Modélisation Structurée Des Systèmes Avec Les Bond Graphs. Editions Technip.
- Vibert, D., Valentin-Roubinet, C., Niel, E., 1997. A Modelling Method To Take Into Account Fluctuations Of Continuous Variables In A Class Of Hybrid Systems, In: 1997 European Control Conference (Ecc). Ieee, Pp. 448–453.
- Victoria, C., Narvaez, I., 2007. Diagnostic Par Techniques D'apprentissage Floues: Conception D'une Méthode De Validation Et D'optimisation Des Partitions (Phd Thesis). Thèse Doctorat De L'université De Toulouse L'institut National Des Sciences
- Villemeur, A., 1988. Sûreté De Fonctionnement Des Systèmes Industriels: Fiabilité-Facteurs Humains, Informatisation.
- Wang, A.-P., Lin, S.-F., 2000. The Parametric Solutions Of Eigenstructure Assignment For Controllable And Uncontrollable Singular Systems. J. Math. Anal. Appl. 248, 549–571.

- Wang, Y., 2000. Supervisory Control Of Boolean Discrete-Event Systems (Phd Thesis). National Library Of Canada Bibliothèque Nationale Du Canada.
- Wen, Q., 2009. Fault-Tolerant Supervisory Control Of Discrete-Event Systems.
- Wen, Q., Kumar, R., Huang, J., Liu, H., 2008. A Framework For Fault-Tolerant Control Of Discrete Event Systems. *Ieee Trans. Autom. Control* 53, 1839–1849.
- Willsky, A.S., 1976. A Survey Of Design Methods For Failure Detection In Dynamic Systems. *Automatica* 12, 601–611. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(76\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(76)90041-8)
- Xie, D., Chen, X., 2008. Observer-Based Switched Control Design For Switched Linear Systems With Time Delay In Detection Of Switching Signal. *Iet Control Theory Appl.* 2, 437–445.
- Xu, J., Loh, A.P., Lum, K.Y., 2007. Observer-Based Fault Detection For Piecewise Linear Systems: Continuous-Time Cases, In: 2007 Ieee International Conference On Control Applications. Ieee, Pp. 379–384.
- Xue, F., Zheng, D.-Z., 2005. Fault Tolerant Supervisory For Discrete Event Systems Based On Event Observer, In: International Conference On Intelligent Computing. Springer, Pp. 655–664.
- Yang, G.-H., Lum, K.-Y., 2003. Fault-Tolerant Flight Tracking Control With Stuck Faults, In: Proceedings Of The 2003 American Control Conference, 2003. Ieee, Pp. 521–526.
- Yang, G.-H., Wang, J.L., Soh, Y.C., 2001. Reliable H_∞ Controller Design For Linear Systems. *Automatica* 37, 717–725.
- Yang, G.-H., Zhang, S.-Y., Lam, J., Wang, J., 1998. Reliable Control Using Redundant Controllers. *Ieee Trans. Autom. Control* 43, 1588–1593.
- Yang, H., Cocquempot, V., Jiang, B., 2007a. Fault Tolerant Strategy For Hybrid Longitudinal Control System Of Automated Vehicles, In: 2007 46th Ieee Conference On Decision And Control. Ieee, Pp. 3176–3181.
- Yang, H., Jiang, B., Cocquempot, V., 2009. Fault Tolerant Control In Hybrid Systems: A Brief Surve. *Ifac Proc. Vol. 42*, 229–234.
- Yang, H., Jiang, B., Staroswiecki, M., 2007b. Observer-Based Fault-Tolerant Control For A Class Of Switched Nonlinear Systems. *Iet Control Theory Appl.* 1, 1523–1532.
- Yang, Z., Izadi-Zamanabadi, R., Blanke, M., 2000. On-Line Multiple-Model Based Adaptive Control Reconfiguration For A Class Of Nonlinear Control Systems. Department Of Control Engineering, Aalborg University.
- Zad, S.H., Kwong, R.H., Wonham, W.M., 2003. Fault Diagnosis In Discrete-Event Systems: Framework And Model Reduction. *Ieee Trans. Autom. Control* 48, 1199–1212.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Inf. Control* 8, 338–353.
- Zemouri, R., 2003. Contribution A La Surveillance Des Systèmes De Production A L'aide Des Réseaux De Neurones Dynamiques: Application A La E-Maintenance (Phd Thesis). Université De Franche-Comté.
- Zhang, Y., Jiang, J., 2008. Bibliographical Review On Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems. *Annu. Rev. Control* 32, 229–252.
- Zhang, Y., Jiang, J., 2003. Bibliographical Review On Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems. *Ifac Proc. Vol. 36*, 257–268.
- Zhang, Y., Jiang, J., 2001. Integrated Active Fault-Tolerant Control Using Imm Approach. *Ieee Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 37, 1221–1235.
- Zhang, Y., Jiang, J., 2000. Design Of Proportional-Integral Reconfigurable Control Systems Via Eigenstructure Assignment, In: Proceedings Of The 2000 American Control Conference. Acc (Ieee Cat. No. 00ch36334). Ieee, Pp. 3732–3736.
- Zhang, Y., Jiang, J., 1999. Design Of Integrated Fault Detection, Diagnosis And Reconfigurable Control Systems, In: Proceedings Of The 38th Ieee Conference On Decision And Control (Cat. No. 99ch36304). Ieee, Pp. 3587–3592.
- Zwingelstein, G., 1995. Diagnostic Des Défaillances: Théorie Et Pratique Pour Les Systèmes Industriels. Hermès.

