

Table des matières

Introduction générale.....	1
1 Supervision des systèmes industriels.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Rôle et définition d'un système de supervision en ligne.....	5
1.3 Etapes de réalisation d'un système de surveillance.....	8
1.4 Tolérance aux fautes.....	11
1.5 Surveillance dans le processus de supervision.....	12
1.5.1 Introduction.....	12
1.5.2 Système de surveillance dans une procédure de supervision.....	13
1.5.3 Méthodes de surveillance en ligne.....	15
1.5.4 Approche par redondance analytique.....	17
1.5.5 Approche structurale.....	20
1.5.6 Pourquoi les Bond Graphs pour la surveillance ?.....	21
1.5.7 Étapes de réalisation du système de surveillance.....	23
1.6 Conclusion sur l'état de l'art de la FDI.....	24
1.7 Tolérance aux fautes (FTC) dans un système de supervision.....	26
1.7.1 Terminologie.....	26
1.7.2 Classification des méthodes de FTC.....	27
1.7.3 Conclusion sur la FTC.....	37
1.8 Commentaire sur les travaux de supervision.....	37
2 Surveillance des systèmes par bond graph.....	39
2.1 Surveillance par bond graph.....	39
2.1.1 Intérêt du modèle bond graph pour la surveillance.....	39
2.1.2 Un bref état d'art sur l'utilisation du bond graph.....	40
2.1.3 Bond graph pour la surveillance.....	41
2.2 Surveillance robuste des processus industriels par BG.....	51
2.2.1 Surveillance des systèmes incertains.....	51
2.2.2 Intérêt des BGs pour la surveillance des systèmes incertains.....	55
2.2.3 Modélisation LFT des éléments bond graphs.....	56
2.2.4 Surveillance robuste par bond graph	59
2.3 Conclusion	65
3 Modélisation des systèmes dynamiques hybrides.....	66

3.1 Introduction.....	66
3.2 Les dynamiques des systèmes.....	67
3.2.1 La dynamique continue.....	67
3.2.2 La dynamique discrète	68
3.2.3 La dynamique hybride	70
3.3 Modélisation des systèmes hybrides	72
3.3.1 Approche de modélisation continue.....	72
3.3.2 Approche de modélisation événementielle	73
3.3.3 Approche de modélisation mixte	73
3.4 onclusion.....	82
4 Supervision des systèmes industriels par l’approche Automates Hybrides et bond graphs.....	83
4.1 Introduction	83
4.2 Contexte de l’approche	84
4.3 Apport de notre approche	85
4.4 L’approche de supervision proposée	86
4.4.1 Description du principe	86
4.4.2 Composants du système de supervision proposé	88
4.4.3 Conception du système de supervision	89
4.4.4 Fonctionnement du système de supervision	92
4.5 Cas d’étude : système de génération de vapeur à l’unité Kerma (Usine de fabrication du carton ondulé Maghreb-Emballage, Oran)	96
4.5.1 L’intérêt de la supervision de ce système	96
4.5.2 Description et principe de fonctionnement de l’installation de production de vapeur.....	97
4.5.3 Instrumentation de l’installation à vapeur étudiée	101
4.5.4 Modes de fonctionnement	102
4.5.5 Implémentation du modèle	102
4.5.6 Modèles BG-LFT pour une FDI robuste.....	104
4.5.7 Composition du brûleur	119
4.5.8 Supervision du brûleur	120
4.5.9 Principe de fonctionnement du brûleur	123
4.5.10 Modélisation du fonctionnement du brûleur	123
4.5.11 Modélisation du brûleur pour la surveillance.....	125
4.5.12 Tolérance aux fautes au niveau du brûleur.....	129
4.5.13 Implémentation logicielle	133
4.6 Conclusion	143

Conclusion générale.....	145
Annexe	150
Bibliographie	152

Liste des figures

1.1 Architecture d'un système de supervision.....	7
1.2 Étapes d'un système de surveillance à base de modèle.....	9
1.3 Schéma de principe de la supervision	11
1.4 Pyramide CIM	13
1.5 Types de défauts dans un système de supervision.....	15
1.6 Classification des méthodes de surveillance en ligne	17
1.7 Graphe orienté	18
1.8 Conception intégrée du système de surveillance par bond graph	22
1.9 Niveaux de conception du système de surveillance	24
1.10 Classification des méthodes de FTC	29
1.11 Approche par stabilisation simultanée	30
1.12 Structure générale d'un AFTCS	32
1.13 Principe général d'un système de commande adaptative	35
2.1 Représentation bond graph d'un système de surveillance	42
2.2 Exemple pédagogique de la surveillance à base de bond graph qualitatif	44
2.3 Principe de génération de résidus à base de modèle	53
2.4 (a) Élément R déterministe en causalité résistance. (b) Élément R déterministe en causalité conductance.....	57
2.5 (a) Modèle BG-LFT d'un élément R en causalité résistance avec incertitude multiplicative. (b) Modèle BG-LFT d'un élément R en causalité conductance avec incertitude multiplicative.....	58
2.6 (a) Schéma de la partie électrique d'un moteur à courant continu. (b) Son modèle bond graph en causalité intégrale	61
2.7 Modèle BG-LFT du système en causalité dérivée avec le capteur de flux dualisé	62
3.1 Comportement des variables d'état dans un système continu	68
3.2 Chronogramme représentant l'évolution de l'état d'une vanne	69
3.3 Exemple de réservoir	70
3.4 Modèle à événements discrets représentant le réservoir	71
3.5 Comportement des variables dans un SDH	71
3.6 Modèle RdP hybride d'un système de fabrication par lots	76
3.7 Commutation de modes dans un système à deux réservoirs par un clapet	78
3.8 La jonction contrôlée établit un comportement de changement de mode	78
3.9 Automate à états finis d'un clapet	79

3.10	Automate hybride général	80
3.11	Un exemple d'automate hybride	82
4.1	Méthodologie globale de supervision	87
4.2	Schéma synoptique du système de supervision	88
4.3	Fonctionnement normal du processus	93
4.4	Fonctionnement du processus en cas de défauts.....	94
4.5.	Fonctionnement du système de supervision	95
4.6.	Station complète de préparation de vapeur (Maghreb-Emballage)	98
4.7.	Vue d'ensemble et PID du processus	99
4.8	Coupes frontale et latérale d'une chaudière à tubes de fumées	100
4.9	Gestion des modes de fonctionnement	103
4.10	Graphe de gestion des OMs de la chaudière	104
4.11	Bond graph à mots du processus de génération de vapeur	105
4.12	(a) Conduite avec vanne (b) BG du sous-système (c) BG-LFT du sous-système (d) BG-LFT simplifié	106
4.13	(a) Bâche d'eau avec capteurs (b) BG-LFT simplifié	106
4.14	(a) Du réservoir d'eau vers la chaudière (b) BG-LFT du sous-système	107
4.15	(a) Chaudière avec sortie de vapeur (b) son BG-LFT	107
4.16	Modèle bond graph de diagnostic en mode de fonctionnement nominal	109
4.17	Valeur expérimentale des pertes thermiques du coefficient de transfert de chaleur	112
4.18	Générateur de modèles à base de graphes fonctionnels et de bond graphs	115
4.19	Analyse de la surveillabilité des modes de fonctionnement (a) nominal et (b) de démarrage	116
4.20	(a) Placement de capteurs additionnels (b) Analyse de la surveillabilité après ajout de capteurs	117
4.21	Réaction des résidus en mode de fonctionnement sain	118
4.22	Valeur détectable de la fuite du réservoir (a), défaut introduit (b) et réaction du résidu r1 (c)	118
4.23	Composants du brûleur Weishaupt	119
4.24	Brûleur gaz avec raccordements externes	120
4.25	PID de la rampe de gaz (avec Graphics Designer)	122
4.26	Principe de fonctionnement d'un brûleur à air soufflé	123
4.27	Extrait du modèle de gestion des modes de fonctionnement du brûleur	125
4.28	Partie considérée de la rampe de gaz	126
4.29	Partie considérée du circuit aéraulique	126
4.30	Schéma de principe du transformateur haute tension	126
4.31	BG à mots du brûleur	127
4.32	Modèle BG global du brûleur	128

4.33 BG-LFT de la rampe gaz en causalité dérivée	129
4.34 Système monoposte	135
4.35 Commande générale de la chaudière	138
4.36 Contrôle de niveau d'eau dans la chaudière	138
4.37 Régulation du niveau d'eau dans la chaudière	139
4.38 Régulation de la conductivité de la chaudière	139
4.39 Contrôle de fonctionnement du brûleur	140
4.40 Commande de la mise en/hors service du brûleur	140
4.41 Régulation du brûleur	141
4.42 Régulation de la puissance du brûleur	141
4.43 Extrait du programme principal	142
4.44 Visualisation du déroulement du programme principal	143
A.1. Cycle de fonctionnement gaz avec allumage pilote	150
A.2. Légende pour les cycles de fonctionnement	151
A.3. Plage de fonctionnement du brûleur	151

Introduction générale

Dans le cas des procédés industriels, de nombreuses pannes et une diminution de la production sont généralement le résultat de défauts qui n'ont pas été corrigés à temps. Actuellement, il existe plusieurs intérêts, non seulement économiques, mais également de sécurité pour le bon fonctionnement de ces processus.

Si un défaut est détecté dans les premiers stades de son apparition, de grands dégâts, voire des catastrophes peuvent être évités. La détection et la localisation des défauts de ces processus industriels sont donc d'un intérêt capital. Une maîtrise importante de ces techniques est nécessaire et leur intégration dans toute ligne de production est devenue indispensable, de nos jours.

De plus, le besoin de disposer de moyens nous permettant d'agir sur le procédé, afin de réduire au maximum voire même supprimer les effets des défauts apparus, le plus rapidement possible, est devenu également une urgence pour les industriels. Nous parlons ici de tolérance aux fautes (FTC: Fault Tolerant Control).

La complexité des systèmes industriels qui ne cesse de croître avec l'augmentation de l'automatisation et la compétitivité entre les entreprises, en termes de coût de production, de disponibilité des équipements, de sûreté de fonctionnement et de sécurité d'exploitation des installations, ont accentué fortement ces besoins en surveillance et en contrôle des procédés. Tenir compte du temps réel, après l'apparition de défauts devient un enjeu économique primordial. Ces deux principaux aspects de surveillance et de tolérance aux fautes en ligne, se regroupent sous l'appellation de supervision industrielle.

C'est dans ce contexte, que de nombreux chercheurs ont orienté leurs efforts, ces dernières années vers l'amélioration de cette fonction complexe, en traitant pour la plupart, l'un de ses aspects à la fois.

En effet, la supervision est un ensemble d'outils et de méthodes permettant le contrôle des processus industriels en fonctionnement normal ainsi que dans des situations de défauts.

La tâche de supervision se base essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts (FDI: Fault Detection & Isolation). L'objectif principal devant être atteint, est de fournir aux opérateurs des alarmes synthétiques et pertinentes, en cas d'apparition de défauts. Le principe de ces algorithmes FDI consiste à comparer le comportement réel du système avec des comportements de référence représentant le

fonctionnement nominal du système surveillé (pour la détection des fautes), ou les différents défauts pris en considération lors de la conception du système de surveillance (pour la localisation des fautes). Le manque d'efficacité des algorithmes FDI revient souvent à la connaissance imprécise des valeurs des paramètres des modèles et à leurs variations aléatoires.

De nombreux travaux de recherche dans la littérature, se sont intéressés au développement de méthodes de surveillance robustes. En considérant la forme d'information disponible pour la description du comportement du système, nous pouvons distinguer deux principaux types d'approches : les approches qualitatives et les approches quantitatives.

La méthode utilisée pour la surveillance dans ce mémoire appartient à la seconde classe des méthodes, elle repose sur l'utilisation des modèles bond graph sous la forme LFT, pour la génération des indicateurs de fautes robustes aux incertitudes paramétriques. L'énergie apportée par ces incertitudes aux résidus, est utilisée pour le calcul des seuils adaptatifs de fonctionnement normal. Le choix du modèle bond-graph sera justifié par son universalité de représentation des systèmes physiques et thermodynamiques, car basé sur la circulation du flux énergétique dans le système, auquel seront greffés des outils d'analyse en ligne des propriétés structurelles du modèle (la surveillabilité dans notre cas).

D'un point de vue pratique, le développement d'un tel système de surveillance est réalisé en trois étapes : la première étape consiste à générer hors ligne les indicateurs de défauts, à savoir les relations de redondance analytiques (RRAs), en considérant les incertitudes des paramètres, ceci à l'aide du BG-LFT. Dans un deuxième temps, les RRAs sont utilisées pour une détection et une isolation robustes, en ligne des composants défectueux. La dernière étape consiste à afficher les informations FDI à l'opérateur via l'interface utilisateur graphique (GUI: Graphical User Interface).

Une fois le défaut détecté et isolé, l'objectif suivant consiste à fournir à l'opérateur des moyens de récupération du fonctionnement normal du procédé. Les systèmes de supervision industriels actuels se basent principalement sur la redondance matérielle des composants pour tolérer les défauts, en commutant vers le composant sain, lorsqu'un défaut survient.

Puisque le modèle bond-graph ne peut représenter que les aspects continus du système, l'introduction des transitions discrètes nous mène vers les automates hybrides pour réaliser la fonction de supervision. Les résultats de FDI conditionnent le passage entre les différents modes

L'intérêt global du présent mémoire est donc de proposer une méthodologie unifiée fournissant à l'opérateur dans sa tâche de supervision en ligne une détection et une

isolation robustes des défauts, et lui indiquant les différentes possibilités du maintien du fonctionnement du système, suite à l'occurrence des fautes. Le système de supervision développé permet également à l'opérateur d'agir sur le procédé, afin d'appliquer les différentes techniques de tolérance aux fautes citées dans ce travail.

Le mémoire est organisé de la manière suivante. Après une introduction générale qui décrit globalement les enjeux de sécurité dans les secteurs industriels, nous avons dédié le premier chapitre à l'établissement d'un état de l'art de la supervision industrielle. Dans ce chapitre, nous avons abordé ses deux aspects, à savoir, la détection et l'isolation des défauts ainsi que la tolérance aux fautes. Nous avons présenté sans exhaustivité, les différentes méthodes et approches développées dans la littérature dans ces deux domaines de recherche.

Le chapitre 2 a été consacré entièrement au modèle Bond Graph (BG), le principe de cette représentation graphique est décrit en détails, suivi d'un état de l'art sur l'évolution de l'utilisation de cet outil puissant, la méthodologie de surveillance robuste en ligne à base de BG a été expliquée minutieusement, en mettant en évidence les points positifs de cette approche. Ce qui justifie clairement la motivation de l'utilisation de ce modèle graphique dans la conception de notre système de supervision.

Le chapitre 3 a été réservé à la présentation des systèmes dynamiques hybrides (SDHs), classe de systèmes à laquelle nous nous sommes intéressés dans notre travail. Ces systèmes résultent de l'association des systèmes continus et des systèmes à événements discrets (SEDs). Les diverses méthodes de modélisation de ces systèmes hybrides ont été également décrites, en particulier, les automates hybrides, modèles que nous avons choisi pour le développement de notre approche de supervision.

Le chapitre 4 illustre le développement théorique par un cas d'étude industriel, dans le cadre d'une coopération du laboratoire R.I.I.R de l'Université d'Oran 1 avec l'Usine Maghreb Emballage (usine de fabrication de carton ondulé). En effet, nous avons, selon un cahier des charges, assuré la surveillance des différents éléments d'une installation de génération de vapeur, avec tolérance de certains défauts. Le système développé par l'outil WinCC de Siemens offre une aide à la décision à l'opérateur humain, afin d'agir en réponse à certaines fautes qui surviennent au niveau du procédé.

Enfin, une conclusion générale et quelques perspectives concluront le document.

L'annexe contient quelques spécifications techniques du processus.



Chapitre 1

Supervision des systèmes industriels

Ce chapitre présente l'état de l'art des différentes méthodes mises en œuvre dans le domaine de la supervision des systèmes, avec ses deux aspects ; détection et localisation de défauts (Fault Detection and Isolation) et commande tolérante aux fautes connue sous l'appellation Fault Tolerant Control.

Nous commençons tout d'abord par une introduction sur la supervision suivie d'un rappel de quelques termes les plus employés au sein de la communauté des chercheurs et des spécialistes de la supervision dans le monde industriel, nous exposons ensuite les diverses approches utilisées pour assurer la détection et la localisation des défauts au niveau d'un processus industriel. La seconde partie de ce chapitre est consacrée aux méthodes permettant à un processus de poursuivre son fonctionnement malgré l'apparition de défauts à son niveau ; on parle dans ce cas de la tolérance aux fautes.

Dans notre présent travail, nous nous intéressons aux deux niveaux de la supervision : la surveillance en termes de détection et de localisation des défauts, et la tolérance aux fautes ; raison pour laquelle ce chapitre inclut deux parties associées à ces deux aspects.

1.1 Introduction

L'automatisation d'aujourd'hui vise essentiellement à améliorer la disponibilité, la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des processus industriels mais surtout à augmenter la sécurité de ces systèmes technologiques. En effet, malgré l'énorme progrès accompli dans le domaine du contrôle en génie des procédés, de graves accidents ont eu lieu ces dernières années dans différentes régions du monde, nous pouvons citer par exemple l'accident de l'usine d'aluminium d'Ajka en Hongrie (2010), l'explosion dans la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon (2011), l'explosion de l'usine de fabrication d'engrais à West au Texas (2013), la série d'explosions en masse dans une usine de feux d'artifice en Italie (2014), le coup de grisou dans des mines de charbon en Chine (2015),

ou encore l'explosion d'une centrale électrique en Chine également (2016). Ces incidents ont provoqué des catastrophes importantes sur le plan économique, humain et industriel.

Etant donné que nous nous sommes intéressés dans ce travail à la supervision d'un processus de génération de vapeur industriel, nous allons citer en particulier les accidents relatifs à ce genre de procédés. Nous pouvons citer de façon non exhaustive quelques incidents récents tels que : l'explosion dans un générateur de vapeur dans une usine de Gaziantep en Turquie (2013), la déflagration causée par un incident sur une chaudière à vapeur dans une usine de fabrication de cosmétiques en Turquie également (2016), ou encore l'explosion d'une chaudière dans une centrale électrique en Inde (2017) [1].

Nous pouvons également mentionner un incident moins récent, mais très marquant dû à ce type de procédés ; il s'agit de l'explosion de la centrale thermique de Courbevoie en France en 1994 qui est restée gravée dans les mémoires des Français, dû à la lourdeur des conséquences et l'étendue des dommages causés dans une zone très urbanisée. De façon Générale, les dangers associés aux installations à combustion alimentées complètement ou partiellement en gaz (chaudières mixtes), se situent dans la gravité des effets résultant d'une explosion ou d'un incendie [1]. De part ce fait, les installations à vapeur ont toujours requis et continuent de nécessiter aujourd'hui un degré très élevé de supervision afin d'assurer un niveau suffisant de sécurité. Ce besoin s'est accru encore plus de nos jours vu la complexité croissante des procédés actuels, et la nécessité d'avoir des installations qui fonctionnent efficacement et qui satisfont par la même occasion les demandes des utilisateurs.

Bien que la commande et la régulation automatique soient amplement saisies par le monde industriel, la supervision en ligne manque encore de développement. Ceci est dû à une ambiguïté dans sa définition, qui la décrit bien souvent comme une opération de seuillage de variables et de déclenchement d'alarmes lorsqu'une des limites inférieure ou supérieure est franchie. Alors que l'accroissement de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, et de la sécurité du personnel se base principalement sur les algorithmes de détection et d'isolation de défauts en ligne.

1.2 Rôle et définition d'un système de supervision en ligne

Il n'y a pas réellement d'unanimité sur la définition et le rôle de la supervision. Les industriels assimilent souvent cette opération à un suivi des variables (dit monitoring) avec un déclenchement d'alarmes par seuils avec des logiciels dédiés (Panorama, Intouch, Labview, Dspace...). Ces logiciels sont dédiés au contrôle de processus et à la collecte d'informations en temps réel depuis des sites distants, en vue de maîtriser des équipements. Dans les processus industriels, le système de supervision est connu sous l'appellation de SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [2] qui inclut des

composants matériels (collecte des données) et logiciels qui traitent ces données (surveillent les conditions de fonctionnement anormal et génèrent des alarmes) et en donne une représentation graphique réactualisée périodiquement. Son rôle est donc de fournir à l'opérateur humain une assistance dans ses tâches urgentes de gestion des situations d'alarmes pour l'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement du processus, la protection de l'environnement et des opérateurs. D'un point de vue académique, les communautés du continu et à événements discrets définissent différemment la supervision.

Pour la communauté des systèmes à événements discrets (SED), la supervision a pour but de contrôler l'exécution d'une opération effectuée par le système de commande sans rentrer dans les détails de cette exécution [3], [4]. La supervision a lieu dans une structure hiérarchique (au moins avec deux niveaux), et recouvre l'aspect du fonctionnement normal et anormal: les défauts étant modélisés à base d'évènements ou d'états binaires. Les outils de surveillance des SED sont décrits dans [3] et [4]. Les systèmes industriels concernés dans ces articles, où on ne s'intéresse qu'à des instants particuliers (atelier flexible manufacturier, chaînes de production...) sont décrits par des modèles de type grafcet ou réseaux de pétri avec deux états : étape-transition et contrôlés par des automates programmables industriels (APIs) [5].

Du point de vue de la communauté du continu, la supervision est définie comme l'ensemble des outils et méthodes permettant de conduire en ligne les installations industrielles tant en fonctionnement normal qu'en présence de défaillances. Les défauts sont décrits par des modèles (quantitatifs et/ou qualitatifs) continus dans le temps [6]. Les systèmes industriels concernés sont les processus continus (colonne de distillation dans une raffinerie, moteur électrique,...), décrits par des modèles de type équations différentielles et ou algébriques où l'état du système est connu à chaque instant et contrôlé par des régulateurs industriels de type PID.

Les principales activités concernées par la supervision d'un système continu (schématisées dans Fig.1.1) sont la détection et la localisation des défauts et la commande tolérante aux fautes ainsi que les moyens de reconfiguration en présence de ces fautes. Ces deux activités en ligne sont connues en anglais sous les appellations Fault Detection and isolation (FDI) et Fault Tolerant Control (FTC). Dans les systèmes flexibles de production (SFP), la communauté SED définit la reconfiguration comme un processus de réorganisation matérielle et/ou logicielle du système pour pouvoir assurer la production dans des délais compatibles avec le cahier des charges [4].

Les définitions suivantes seront adoptées dans la suite de ce document.

La détection consiste en l'identification en ligne des changements de comportement d'une variable détectés par comparaison à des valeurs de références (en fonctionnement normal),

ce qui se traduit par la génération d'une ou d'un ensemble d'alarmes brutes. Les algorithmes de détection se basent sur des variables connues issues du système de contrôle (u_i) et des capteurs (mesures y_j), ils fournissent des alarmes brutes avec un minimum de fausses alarmes et de non détections.

Notons que cette définition est aussi adoptée par la communauté SED [4].

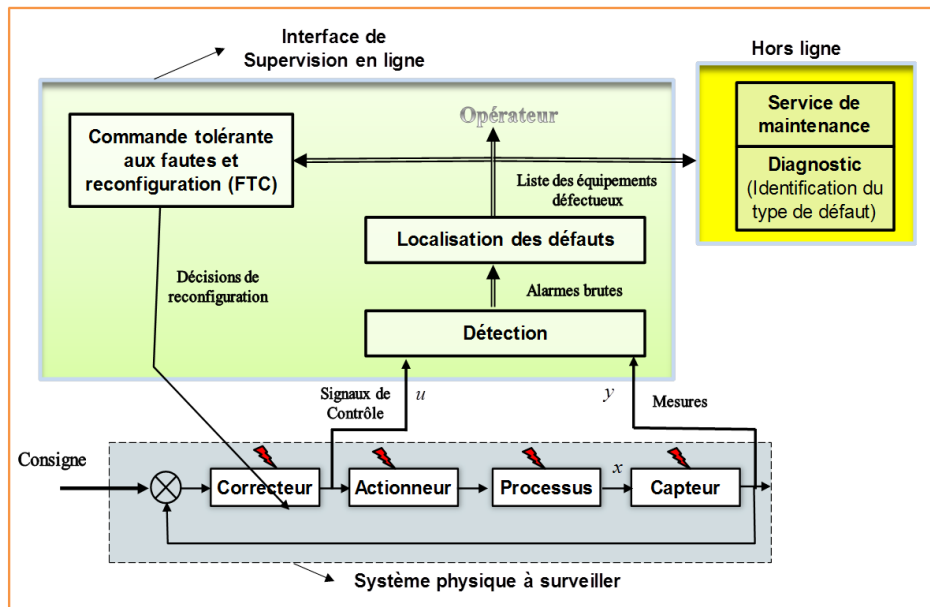


Fig.1.1. Architecture d'un système de supervision

La localisation consiste alors à déterminer en ligne l'origine qui a pu engendrer le symptôme détecté à partir de l'ensemble des alarmes générées. Dans l'industrie on appelle souvent cette étape « filtrage d'alarmes ».

La liste des défauts localisés est envoyée au service de maintenance pour réparation mais aussi pour diagnostic. Cette opération se fait hors ligne (c.à.d. pas en régime d'exploitation).

Dans plusieurs ouvrages, l'étape de localisation est appelée diagnostic [3], dans d'autres c'est l'ensemble des étapes de détection et de localisation [4].

Dans le présent travail, le diagnostic est défini comme une opération supplémentaire à celle de la surveillance qui est réalisée hors ligne et qui consiste à identifier les causes du défaut. À titre d'exemple, la surveillance en ligne identifie la vanne comme origine du défaut signalé, alors que la procédure de diagnostic permet d'identifier les causes (encrassement, dépôt de sédiments...) ayant engendré ce défaut. En présence de cette étape de diagnostic, cette activité est connue dans la communauté du continu sous l'appellation de Fault Detection and isolation and Diagnosis (FDID), en anglais.

D'autre part, l'équipement défectueux étant identifié, la reconfiguration consiste alors à apporter une action de commande corrective pour ramener le système à un mode de

fonctionnement normal (ou dégradé c.à.d. toléré par le système). La reconfiguration (matérielle ou logicielle) ou l'accommodation des lois de contrôle permet d'assurer la continuité du fonctionnement du processus. Si le défaut est conditionnellement tolérable (une pompe est défaillante mais il est possible d'utiliser une autre pompe installée en parallèle), alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée. La question qui se pose en effet de façon cruciale dans l'industrie est : que faire quand on a détecté et localisé un défaut. Les solutions vont être extrêmement variées selon les situations possibles. Derrière le terme d'accommodation aux défauts (souvent limité aux actionneurs et aux capteurs), les stratégies mises en place sont efficaces pour une simple boucle de régulation mais en aucun cas pour un procédé complexe, ou pour des défauts majeurs qui nécessitent plutôt une reconfiguration du procédé et de sa commande. C'est un domaine très nouveau dans lequel tout reste à faire. Cette partie est traitée par les méthodes de tolérance aux fautes. Les lecteurs intéressés par la théorie de la commande tolérante aux fautes peuvent consulter l'ouvrage [7].

La surveillance est définie comme l'opération qui traite les informations disponibles en ligne, afin d'obtenir l'état de fonctionnement du système à surveiller, et qui permet de détecter un défaut et de localiser son origine. La surveillabilité est l'aptitude du système à détecter et à localiser un défaut.

Finalement, La surveillance en ligne (constitué des étapes détection et localisation de défauts) regroupe les fonctions informationnelles permettant de fournir de l'information pertinente qui sert de base aux décisions prises par la supervision qui a donc un rôle principalement décisionnel.

1.3 Étapes de réalisation d'un système de surveillance

La principale difficulté dans le domaine de la surveillance est son application en ligne, dans le contexte d'une installation industrielle. Il existe actuellement dans la littérature de nombreuses méthodes de détection de défauts, mais elles n'ont en général été validées que sur des expériences de laboratoire très simples ou de simulation. Contrairement aux technologies de contrôle PID qui sont complètement adoptées par les industriels depuis leur apparition, les systèmes de surveillance et les outils d'aide à la décision sont principalement gérés par l'expertise de l'opérateur humain qui reste encore au centre du système de supervision. Fig.1.2 présente le principe de fonctionnement et les étapes de détection et de localisation de défauts en ligne.

1.3.1 Cahier des charges

Le cahier des charges dans un système de surveillance consiste à spécifier les équipements pertinents à surveiller, tout en minimisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection, en tenant compte évidemment des

contraintes de ressources disponibles en termes de mémoire des ordinateurs, des données disponibles et des coûts. Il y a toujours un compromis entre le nombre de défauts (ou équipements) à surveiller et les performances (en terme de détectabilité et isolabilité). Les équipements pertinents à surveiller peuvent être déterminés hors ligne par l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités) [8].

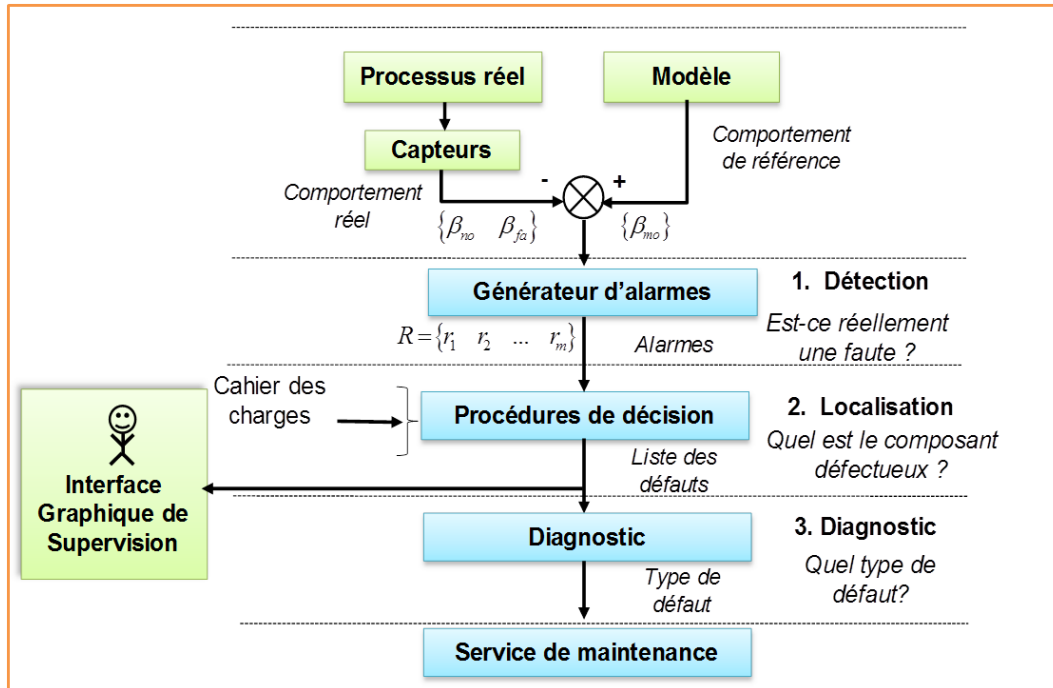


Fig.1.2. Étapes d'un système de surveillance à base de modèle

Tous les systèmes de surveillance à base de modèle reposent sur la comparaison entre le fonctionnement réel fourni par des capteurs et le comportement nominal théorique fourni par un modèle et sont réalisés en trois étapes (Fig.1.2). Deux entre elles en ligne.

1- Détection

Elle consiste à décider entre deux hypothèses H_0 (le système est en mode de fonctionnement normal) et H_1 (le système est en mode de fonctionnement défectueux). Elle est donc obtenue en testant la cohérence entre un ensemble de mesures en mode nominal β_{no} et défectueux β_{fa} $\{\beta_{no}, \beta_{fa}\}$ fourni par des capteurs avec un fonctionnement de référence fourni par un modèle $\{\beta_{mo}\}$. Cela implique donc que l'on dispose d'un modèle du fonctionnement normal obtenu par apprentissage, d'une manière analytique, par expertise ou tout simplement par des courbes. Si le comportement théorique $\{\beta_{mo}\}$ n'est pas consistant avec le mode courant observé β_{no} ($\beta_{no} \notin \beta_{mo}$), Il y a alors occurrence au moins d'une faute : un ensemble d'alarmes R :

$$\beta_{mo} - \beta_{no} = R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \quad (1.1)$$

appelées *résidus* ou *indicateurs de fautes* est alors fourni par le générateur d'alarmes suivant les algorithmes appropriés implémentés. La détection de défaut est une opération délicate puisqu'il faut, dans un contexte soumis aux aléas de fonctionnement du système et aux perturbations de l'environnement, décider d'une façon binaire et avec certitude s'il y a défaut ou non et distinguer les perturbations, les incertitudes de mesure et paramétriques des défauts. La non détection ou une détection trop tardive entraîne des conséquences catastrophiques sur le processus alors que les fausses alarmes provoquent des arrêts inutiles de l'unité de production et introduisent ainsi une perte de confiance de l'opérateur au superviseur. Théoriquement le système est en fonctionnement normal si le résidu R est égal à zéro. Mais en pratique, R n'est jamais nul et est à l'intérieur d'un seuil ε en raison de la présence des incertitudes de modélisation et de mesures. Le choix de ε ne doit être ni trop grand, pour éviter les non détection ni trop petit, pour limiter les fausses alarmes. Dans le cas le plus simple, on choisit un seuil égal à deux ou trois fois l'écart quadratique moyen du résidu en fonctionnement normal. Des tests statistiques tels que les sommes cumulées (CUSUM) sur une fenêtre d'observation sont utilisés pour détecter un changement de valeur d'un paramètre dans la densité d'une suite d'observations indépendantes [9]. Dans le présent travail; un calcul du seuil adaptatif en fonction des incertitudes paramétriques sera développé plus loin.

L'étape de détection teste chaque résidu r_i autour du seuil fixe ou adaptatif, ε_i pour générer le vecteur de cohérence C . Les éléments de C , $c_i (i=1, \dots, n)$ sont déterminés comme suit :

$$\begin{cases} 1 & \text{si } r_i \leq |\varepsilon_i| \\ 0 & \text{sin on} \end{cases} \quad (1.2)$$

Une faute est détectable si $C \neq [0 \ 0 \dots \ 0]$, ce qui signifie qu'un résidu au moins a franchi le seuil. Les indicateurs de fautes obtenus servent de base pour l'étape de localisation.

2- Localisation

La localisation consiste en un filtrage des alarmes pour retrouver l'origine du défaut et isoler le composant ou le phénomène défectueux. À la différence de la détection où un seul résidu est nécessaire, la procédure de localisation nécessite un ensemble de résidus (signatures).

Soit F l'ensemble des défauts fixé par le cahier des charges. Si les observations ne sont pas consistantes avec le modèle ($\beta_{no} \notin \beta_{mo}$), il y a alors génération d'une alarme signalant l'occurrence d'une faute f (appelée faute candidate). Toutefois, en réalité le résultat de la surveillance est généralement un ensemble de fautes candidates F_c parmi l'ensemble des fautes $F_c \subseteq F$. Afin de localiser l'équipement défectueux, on fait appel alors à des signatures de fautes répertoriées basées sur une reconnaissance de formes ou un raisonnement logique en utilisant la Matrice de Signatures de Fautes (MSF).

1.4 Tolérance aux fautes

Une fois qu'un défaut est détecté et isolé, on doit décider de l'intervention nécessaire pour maintenir le fonctionnement du processus suite à l'apparition du défaut. Cela est possible grâce à l'application des techniques d'accommodation de fautes et de reconfiguration [10], [11]. On parle alors de tolérance aux fautes. Le principe de la FDI et de la FTC est résumé en Fig.1.3.

Le plan de reconfiguration permet de gérer le passage d'un mode de fonctionnement vers un autre en suivant la disponibilité des fonctions [12], [13].

L'accommodation aux défauts comprend des stratégies en mesure de conserver au mieux les performances nominales souhaitées du système [14] ou du moins maintenir ce système à un niveau de rendement acceptable, particulièrement en présence de défauts. Quand les objectifs fixés peuvent être préservés, le terme reconfiguration est utilisé, sinon une stratégie de restructuration est implémentée pour réduire au minimum la dégradation des performances [15]. La reconfiguration est ainsi une stratégie pour corriger les défauts en rectifiant les lois de commande ou en agissant par compensation pour atteindre les objectifs de production fixés.

Nous pouvons distinguer deux types d'accommodation [14], [15] sous la dénomination suivante: passive et active.

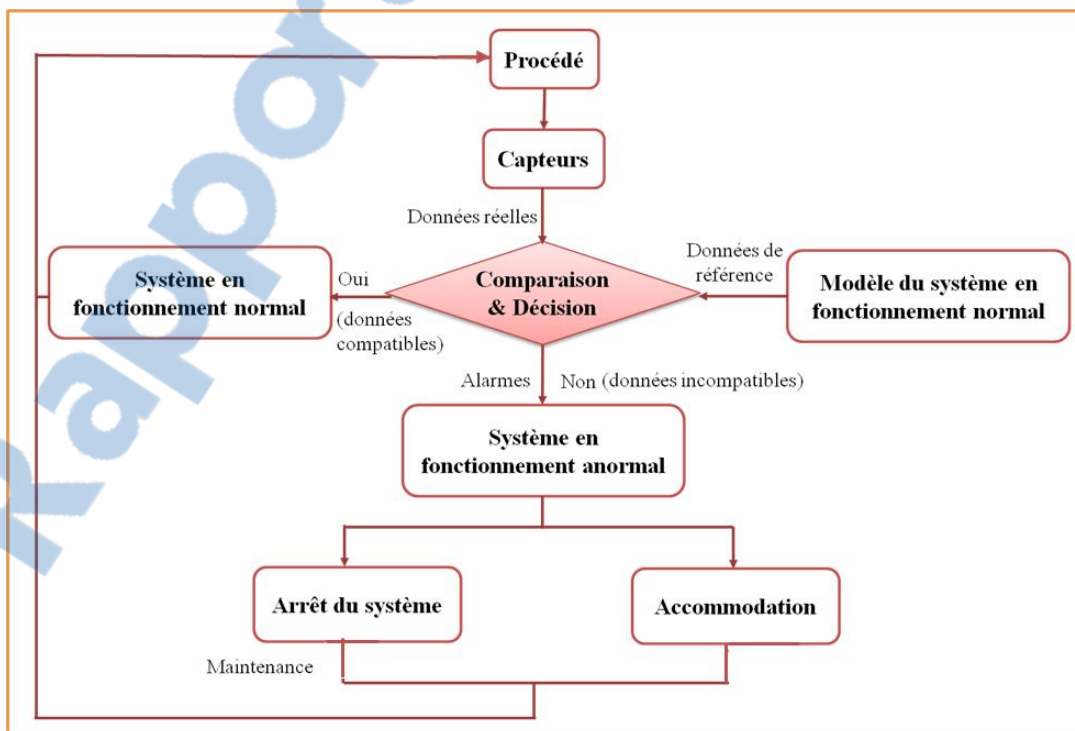


Fig.1.3. Schéma de principe de la supervision

- L'accommodation est dite passive si la définition d'un régulateur fixe est suffisante pour réagir à l'apparition des défauts ; l'une des méthodes utilisées pour concevoir un régulateur permettant de réaliser une telle accommodation est la commande robuste ; en fait, cette méthode permet de réaliser un régulateur insensible aux fautes, pour les systèmes contrôlés en boucle fermée [16]. Les données provenant des algorithmes de FDI sur les défauts ne sont pas exploitées dans ce cas et aucun changement n'est apporté à la structure du système.
- L'accommodation est considérée active si elle trace une stratégie de commande éliminant ou réduisant les effets des défauts sur le système de trois façons possibles :
 - en préservant la structure du contrôleur : dans ce cas une commande adaptative peut être appliquée ;
 - en modifiant la structure du régulateur : dans cette seconde approche, une reconfiguration est recommandée ;
 - en modifiant aussi les objectifs : dans cette dernière alternative, uniquement une restructuration est quelquefois possible en fonction des défauts.

La reconfiguration apporte des modifications en temps réel sur la structure de la loi de commande dans le cas où le défaut est accommodable en minimisant la détérioration des performances nominales du système. Quant à la restructuration, elle permet de conserver au mieux les performances souhaitées tout en changeant les objectifs. L'un des exemples de restructuration consiste en la décision de garder certaines sorties prioritaires aux dépens des autres.

Ce type d'accommodation utilise les informations résultantes du module FDI en temps réel pour ajuster le système à son nouvel état lorsque des défaillances surviennent [17].

Après la description des deux principales activités mises en œuvre par la supervision pour assurer le bon fonctionnement des systèmes industriels, nous entamons la première partie qui est consacrée à un état de l'art sur la surveillance des processus industriels par les deux approches : classique et bond graph.

1.5 Surveillance dans le processus de supervision

1.5.1 Introduction

Ces dernières années, une large communauté de chercheurs s'est focalisée sur la thématique de surveillance qui était jusqu'ici peu connue. Ceci revient à l'augmentation de la compétitivité entre les différentes entreprises du secteur industriel et aux contraintes de sûreté de fonctionnement qui doivent être respectées lors de la production. S'ajoute à ces raisons le facteur protection de l'environnement qui doit être assuré. La surveillance a

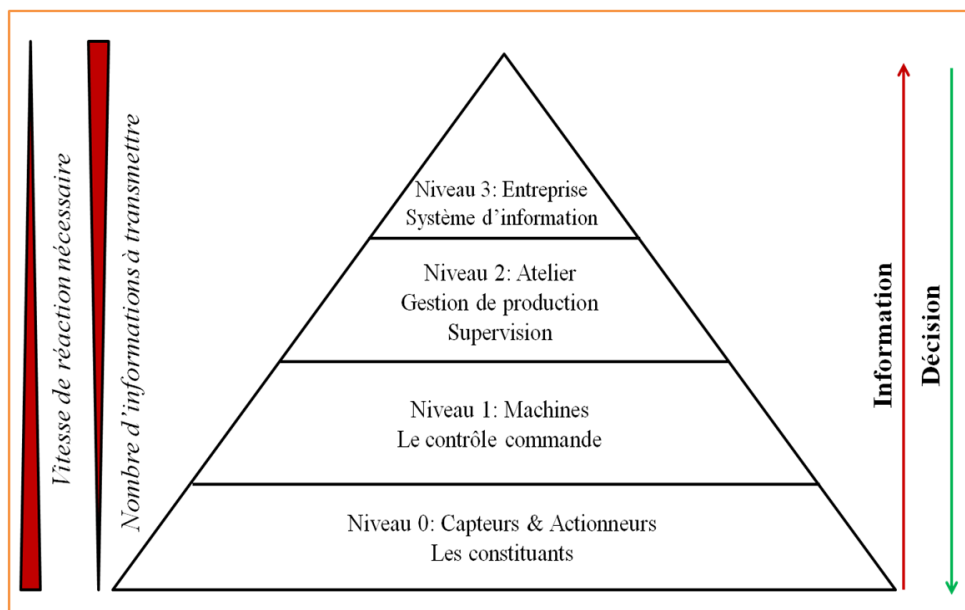
réellement gagné une place importante dans divers systèmes de production, en particulier au niveau des processus en génie des procédés (processus chimiques, nucléaires, etc.) dû aux différents risques encourus au sein de ce type de systèmes.

1.5.2 Système de surveillance dans une procédure de supervision

La supervision se situe au niveau 2 de la pyramide industrielle, qui est appelée également pyramide du CIM (Computer Integrated Manufacturing). Cette dernière est une représentation conceptuelle, constituée de 4 niveaux auxquels correspondent des niveaux de décision [18], et où chaque niveau supérieur décide ce qui doit être exécuté par le niveau inférieur et ce dernier rend compte de ce qui a été effectivement réalisé. Le schéma de la figure 1.4 représente l'organisation pyramidale industrielle allant du niveau opérationnel jusqu'au niveau de décisions stratégiques.

La qualité de la sûreté de fonctionnement des processus technologiques dépend fortement de la fonction surveillance. Cette dernière représente une interface entre l'installation physique et les opérateurs (hommes ou automatismes), elle les informe sur l'état de fonctionnement du processus surveillé (correct ou défectueux). La surveillance permet également de valider les données provenant des capteurs et de localiser les composants défectueux [19].

Le système de surveillance représente une part importante du système d'information des processus automatisés de production sûrs de fonctionnement. Les algorithmes de surveillance traitent les données brutes constituées de variables de commande et de variables mesurées pour fournir des données validées et enrichies [20].



Tous les algorithmes de surveillance reposent sur la notion de redondance des sources d'information. Leur principe consiste à déterminer les valeurs des variables par diverses façons et de vérifier la cohérence des résultats obtenus [17].

Il existe deux sortes de redondance :

- *Redondance matérielle (physique)*: ce type de redondance est spécifique à la surveillance des dispositifs de mesure [21], [22]. La procédure de surveillance dans ce cas repose sur la mesure d'une même grandeur caractéristique du processus par plusieurs capteurs identiques [22], [23]. Ces capteurs indiquent à peu près la même valeur, en fonctionnement normal du système, avec une légère différence qui revient aux bruits et aux incertitudes de mesure. En revanche, lorsqu'un défaut affecte l'un de ces capteurs, les valeurs indiquées diffèrent.

Afin d'assurer la détection des défauts simples il suffit de doubler les capteurs. Cependant, pour la localisation il est nécessaire d'avoir au moins trois capteurs, on procédera alors à un vote majoritaire afin de déterminer les composants défectueux dans le processus à surveiller. Ce type de redondance a été très utilisé dans le milieu industriel, en particulier dans le domaine de l'aéronautique et du nucléaire où la sûreté de fonctionnement est primordiale pour la sécurité des êtres et de l'environnement, ceci en raison de sa fiabilité et de la simplicité de sa mise en œuvre. Cependant, il présente plusieurs inconvénients tels que le coût prohibitif résultant de la multiplication des composants et la lourdeur qu'il apporte à des installations déjà très complexes. Ce qui rend la réalisation de la redondance des capteurs très difficile voire même impossible dans certains cas. De plus, son champ d'application se limite aux seuls défauts de capteurs.

- *Redondance analytique* : Cette redondance est complémentaire à la redondance matérielle. Elle est obtenue par la comparaison des données réelles provenant du processus par le biais des capteurs et celles théoriques fournies par une certaine connaissance préalable sur le système [17]. Elle consiste à utiliser les contraintes liant les différentes variables du système pour obtenir des relations ne faisant intervenir que des variables connues (entrées et sorties). Ces relations sont appelées « Relations de Redondance Analytique (RRAs) ». Beaucoup de travaux leur ont été dédiés, on peut citer les synthèses trouvées dans [23], [24] et le livre pédagogique Maquin & Ragot (2000) [25] pour les systèmes linéaires.

1.5.2.1 Types de défauts

Le terme défaut (ou faute) définit généralement un éloignement de la valeur d'une variable observée ou d'un paramètre calculé de sa valeur déterminée dans les spécifications prévues du processus lui-même, des capteurs, des actionneurs ou d'un autre équipement. Un défaut peut rester invisible pendant un certain temps avant de conduire à une défaillance [26].

Il existe différents types de défauts classés selon leur sévérité, du moins sévère au plus critique, en défauts [27] : naissant, passager, permanent et catastrophique. Les défauts (voir Fig.1.5) peuvent être également classés suivant leur origine en :

- *Défauts de capteurs* : ils se définissent comme un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. On peut distinguer les défauts suivants : biais, dérive, changement du gain de mesure, valeurs erronées, blocage du capteur à une valeur donnée ou une coupure électrique du capteur.
- *Défauts d'actionneurs* : ils se traduisent par une inconsistance des commandes et la sortie de l'actionneur (par exemple, la pompe délivre un débit incompatible avec sa caractéristique hydraulique).
- *Défauts du processus physique* : ces défauts sont dues à des changements dans la structure (fuite, rupture d'un organe,...) ou des paramètres du modèle (encrassement d'un tube d'un four, obstruction partielle d'une conduite, ..).

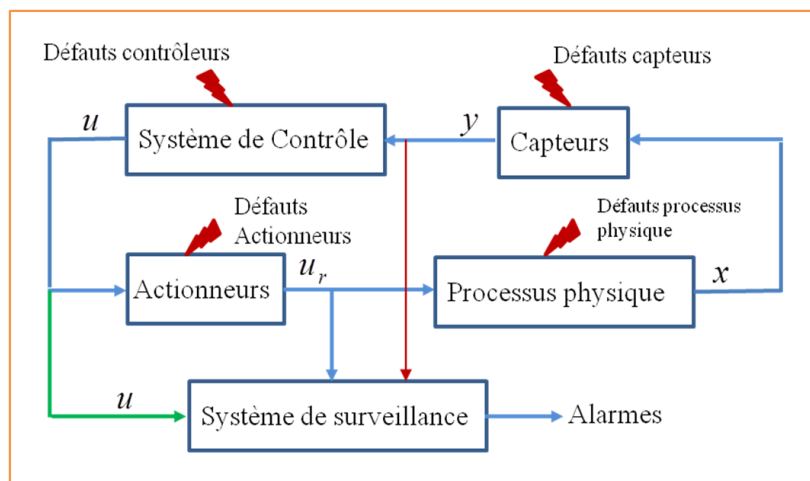


Fig.1.5. Types de défauts dans un système de supervision

- *Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande*: Ils se distinguent par une différence entre la valeur effective de la sortie du régulateur (selon l'algorithme mis en œuvre) et sa mesure.

1.5.3 Méthodes de surveillance en ligne

1.5.3.1 Classification

Dans l'industrie, les premières méthodes de surveillance furent basées sur la redondance des matériels jugés critiques pour le fonctionnement du système. Cette approche [13] est simple et facile à implanter, mais entraîne un coût important en instrumentation et se limite à la surveillance des défauts capteurs uniquement: les défauts

physiques ne peuvent pas être détectés. Les progrès réalisés dans le domaine des calculateurs permettent aujourd'hui la mise en œuvre des méthodes modernes de l'automatique et de l'intelligence artificielle. Ces nouvelles approches permettent d'éliminer en partie, voire même en totalité, la redondance matérielle pour la surveillance. Les premiers travaux proviennent des recherches dans le domaine médical par une application de systèmes experts. Shortliffe [28], dans le cadre d'une thèse de doctorat à Stanford University en 1974, expose un système de surveillance de maladies du sang où la connaissance représente l'expertise qu'a pu acquérir le médecin sur les relations qui existent entre les symptômes observés et les causes de dysfonctionnement du système à surveiller (le malade). De tels systèmes experts ont été plus tard exploités pour la supervision des hauts fourneaux de Sollac [14].

La stratégie de surveillance et la forme sous laquelle la connaissance est disponible conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance. On distingue deux types d'approches (Fig.1.6).

1.5.3.2 Méthodes à base de modèle

Ces méthodes, dites aussi *méthodes externes de surveillance*, utilisent des modèles opératoires construits à partir des lois physiques du processus. Les performances de ces approches dépendent fortement du modèle utilisé. Selon la méthode, deux types de modèles peuvent être utilisés : *les modèles qualitatifs*, déduits d'une abstraction graphique (bond graphs [29], graphes causaux [30], ou bipartis [31]) ou d'une base de connaissance (logique floue par exemple [32]) du système physique et les modèles quantitatifs (sous forme analytique). Une fois le modèle généré, les indicateurs de défauts peuvent être déduits à partir du modèle mathématique en mode normal et à défauts, sans aucun apprentissage. Ces indicateurs sont représentés par les Relations de Redondance Analytique (RRAs) ou les *résidus* (qui sont l'évaluation numérique des RRAs).

Bon nombre de travaux leur ont été consacrés, citons les synthèses trouvées dans l'article [33], ou l'ouvrage pédagogique de collection [34]. La génération des résidus à base de modèle analytique peut être réalisée par différentes approches : *L'approche par estimation d'état* à l'aide des observateurs dans le cas déterministe, ou par le filtre de Kalman dans le cas stochastique [35], qui génère un écart (résidu) entre les valeurs estimées ou reconstruites et les valeurs de référence mesurées. *L'approche par espace de parité* [34], qui conduit à une réécriture des équations d'état et de mesure, dans laquelle seules des variables connues (commandes et sorties) sont autorisées à figurer. Ces équations sont connues par les équations de parité dans le cas linéaire, et par les RRAs dans le cas le plus général.

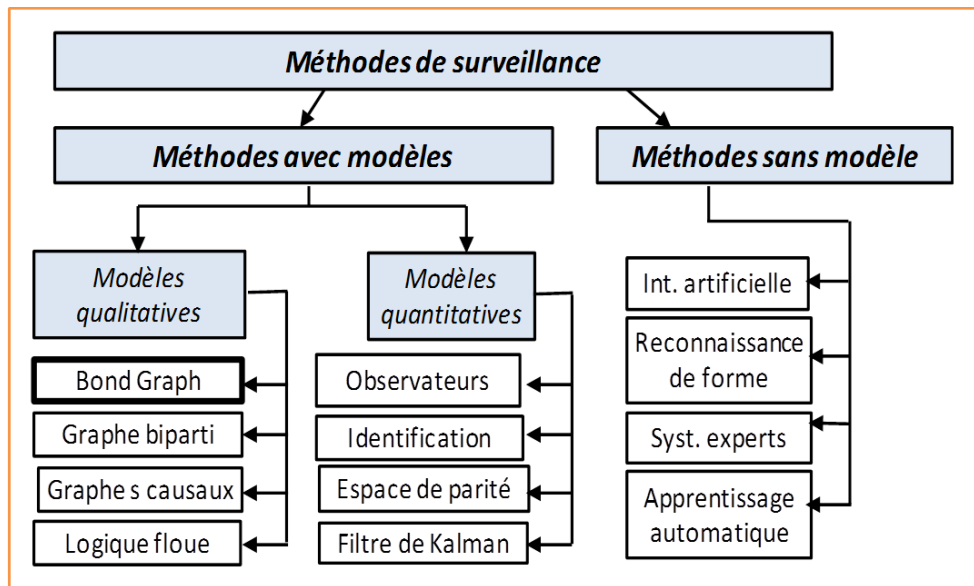


Fig.1.6. Classification des méthodes de surveillance en ligne

La mise en œuvre de ces méthodes nécessite une modélisation physique précise. Cependant, de nombreux travaux ont été menés pour assouplir cette contrainte (en tenant compte des incertitudes) comme développé dans le présent travail. Nous avons utilisé le modèle bond graph, qui possède des propriétés comportementales, graphiques et causales, nous permettant ainsi d'exploiter les avantages des deux types de modèles qualitatif et quantitatif pour assurer la surveillance robuste.

1.5.4 Approche par Redondance Analytique

1.5.4.1 Principe de surveillance à base de redondance analytique

La technique de redondance analytique permet une exploitation optimale de toutes les informations acquises dans le cadre d'une configuration d'instrumentation donnée. Elle vient en complément à la redondance matérielle et peut permettre d'en réduire le degré de redondance. La redondance analytique consiste à utiliser des informations supplémentaires issues de modèles générant des grandeurs homogènes à celles provenant de capteurs. L'utilisation des techniques de redondance analytique repose sur la disponibilité d'un modèle de connaissance ou de représentation ; elle augmente fortement l'ordre de la redondance et a pour conséquences d'augmenter la fiabilité et la sûreté d'un système de détection, de remplacer un capteur matériel par un "capteur mathématique" ou "capteur informationnel". Une Relation de Redondance Analytique est une expression où toutes les variables sont connues : elle exprime la différence entre les informations fournies par le système réel et celles fournies par le modèle en mode nominal.

La problématique de génération de ces expressions est alors un problème d'élimination de variables inconnues. Dans le cas le plus simple et à titre illustratif supposons que le système physique, est décrit par les équations d'état et de mesure non linéaires suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = C(x) \end{cases} \quad (1.3)$$

Où x est la variable d'état inconnue. y et u sont les variables de mesure et de commande respectivement, considérées connues. En supposant que la fonction $C(x)$ est inversible, la variable inconnue éliminée de l'équation de mesure $x = C^{-1}(y)$ est remplacée dans l'équation d'état pour obtenir hors ligne une *RRA* :

$$\frac{d(C^{-1}(y))}{dt} - f(C^{-1}(y), u) = RRA \quad (1.4)$$

L'ordre d'élimination de la variable inconnue est illustré par le **graphe orienté** de la figure 1.7.

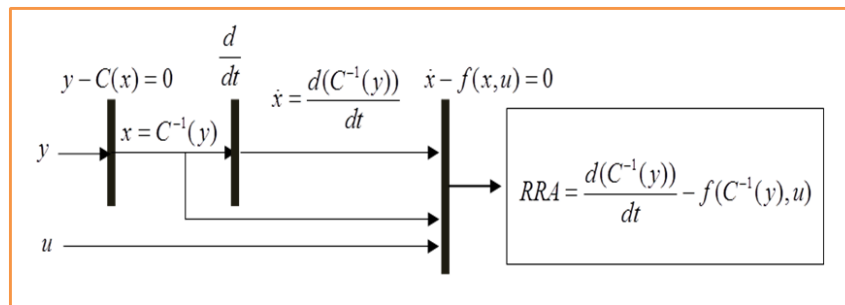


Fig1.7. Graphe orienté

L'évaluation des *RRA*s est réalisée en ligne pour produire les résidus :

$$r = Eval(RRA) \quad (1.5)$$

Il est aisé de remarquer que la *RRA* (Eq.1.4) est sous forme dérivée. Cette forme introduit les problèmes d'évaluation numérique en raison de la dérivée des bruits de mesure. Toutefois, la *RRA* obtenue en causalité intégrale, $(C^{-1}(y) - \int f(C^{-1}(y), u)dt + x(0) = RRA)$ ne peut pas être évaluée car les conditions initiales $x(0)$ ne sont pas connues dans les conditions industrielles de fonctionnement. Cela signifie tout simplement que dans le premier cas il y a redondance d'informations (système sur déterminé) car il y a plus de variables connues (u et y) que d'inconnues (x) alors que dans le deuxième cas le système est juste déterminé : le nombre de variables inconnues (x et $x(0)$) est égal à celles connues.

1.5.4.2 Indices de surveillabilité

1.5.4.2.1 Matrice des signatures de fautes

La structure des résidus $R = \{r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n\}$ forme une Matrice de Signature de Fautes (MSF) binaire ayant pour lignes l'ensemble des résidus et pour colonne l'ensemble des fautes $F = \{f_1 \ f_2 \ \dots \ f_m\}$. Les éléments booléens de la matrice $S_{ij} \in \{0,1\}$ (Tableau 1.1) nous renseignent sur la sensibilité des résidus aux défauts.

Notons que la sensibilité caractérise l'aptitude de la procédure à détecter des fautes d'une amplitude donnée. Elle dépend de la structure des équations des indicateurs de fautes et surtout de l'amplitude relative du bruit de mesure par rapport à celle du défaut à détecter. La MSF fournit la logique pour la localisation des défauts détectés durant le fonctionnement du système et est déduite hors ligne. Les éléments de la MSF sont définis comme suit:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ résidu } r_i \text{ est sensible au } j^{\text{ème}} \text{ défaut } f_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.6)$$

F/R	f_1	..	f_j	..	f_m
r_1	s_{11}	..	s_{1j}	..	s_{1m}
..
r_i	s_{i1}	..	s_{ij}	..	s_{im}
..
r_n	s_{n1}		s_{nj}	..	s_{nm}

Tableau 1.1. Matrice de signatures des fautes

L'aptitude du système de surveillance à détecter et à localiser les défauts est caractérisée par deux indices de surveillabilité : détectabilité et isolabilité.

1.5.4.2.2 Détectabilité

Soit donné F l'ensemble des m fautes candidates et R l'ensemble de n résidus. Chaque faute $f_j (j=1, m)$ est caractérisée par son *vecteur colonne de signature de faute* :

$V_j = [s_{1j} \ \dots \ s_{nj}]$. Désignons par $M_j (j=1, \dots, m)$ et $I_j (j=1, \dots, m)$ les indices de détectabilité et d'isolabilité de chaque faute.

La faute f_j est détectable ($M_j = 1$) si et seulement si $V_j \neq 0 : \forall j (j=1, m), \exists s_{ij} \in V_j \neq 0$.

Autrement dit, la faute f_j est détectable si et seulement si son vecteur colonne V_j est différent de zéro.

1.5.4.2.3 Isolabilité

L'isolabilité est l'aptitude de la procédure de détection à distinguer (c'est-à-dire à isoler) entre plusieurs fautes sous réserve que ces fautes soient détectables : cela signifie qu'il existe au moins un indicateur de faute r sensible à ces fautes.

La faute f_j est isolable ($I_j = 1$) si et seulement si son vecteur de signature V_j est différent de tous les autres vecteurs :

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{if } \forall l(l=1, m) V_j \neq V_l (j \neq l) \\ 0 & \text{sin on} \end{cases} \quad (1.7)$$

Deux fautes (f_i et f_j) pouvant affecter le système, seront distinguables (isolables) si et seulement si leurs vecteurs colonne V_i et V_j sont différents. Une faute f est distinguable de l'ensemble des fautes si son vecteur colonne V est unique (différent de l'ensemble des colonnes).

1.5.4.2.4 Distance de Hamming

Afin d'évaluer le degré de localisation des défauts, on calcule la distance de Hamming. Cette dernière est une distance au sens mathématique du terme. Elle permet de comparer deux vecteurs V_1 et V_2 binaires de même taille. Elle est égale à la somme des valeurs absolues des différences, composante par composante des deux vecteurs, c'est-à-dire au nombre de bits différents, ou en encore au cardinal de l'ensemble. Les distances entre les signatures reflètent la capacité de localisation entre différentes causes possibles.

1.5.5 Approche structurale

1.5.5.1 Les limites des modèles analytiques

Toutes les approches qui viennent d'être exposées se basent sur l'exploitation d'un modèle analytique de bonne qualité décrivant le système, ses actionneurs ainsi que ses instruments de mesures. L'obtention de tels modèles n'est pas toujours possible pour les grands systèmes complexes, dû à la présence de différents types de connaissances et de représentations permettant la description de ces systèmes [19]. Raison pour laquelle l'application des méthodes présentées précédemment n'est pas simple pour les grands systèmes.

De plus, ces approches nécessitent la connaissance des valeurs numériques des paramètres pour générer des résidus. Or, dans les processus complexes de grande taille (par exemple : unités pétrochimiques, centrales de production d'énergie) on fait souvent appel à des centaines de variables de différentes natures (binaires, qualitatives, ...) mais qui sont généralement pas numériques. Un désagrément supplémentaire réside dans la modélisation des perturbations qui peuvent conduire à un modèle erroné. En plus, les résidus ne garantissent pas la détection d'une classe de fautes qui n'a pas été modélisée

d'une manière précise. Et enfin, ces approches ne sont pas évolutives pour s'adapter aux changements du procédé.

1.5.5.2 Avantages de l'analyse structurelle

L'emploi de l'approche structurelle se révèle très intéressant au début de la conception d'un système de surveillance ou lorsqu'on veut créer des extensions sur un système déjà existant, ceci revient à la connaissance très pauvre qu'elle nécessite.

Les concepts structurels ont été peu utilisés dans le domaine de la surveillance, ils ont été employés pour construire des procédures de localisation qui représente la seconde étape (après la détection) de tout processus de surveillance [36]. Ces concepts permettent en général de concevoir une procédure de surveillance, de l'implémenter et enfin de l'évaluer en utilisant les relations de redondance analytique.

L'analyse structurelle consiste en l'analyse des propriétés structurelles du système, ces propriétés sont indépendantes des valeurs prises par les paramètres. L'analyse structurelle est donc valable pour tout système quelque soit sa nature (linéaire ou non linéaire). Elle n'exige aucune précision du modèle comportemental ; elle ne s'intéresse qu'à l'existence des liens entre les variables et les paramètres et permet une homogénéisation de la représentation de toutes les classes de modèles par le biais de la matrice d'incidence d'un graphe biparti [37].

Ces caractéristiques rendent cette analyse efficace pour les systèmes complexes. En dépit de la pauvreté des données disponibles; ces données constituent la quasi-totalité de la connaissance nécessaire à la conception d'un système de surveillance. L'analyse structurelle nous permet également de surmonter de nombreux problèmes rencontrés lors de cette conception, parmi lesquels on peut mentionner :

- L'analyse des redondances du système qui permettent d'indiquer les possibilités de surveillance.
- Le problème de placement des capteurs [38].
- La décision des séquences de calculs des résidus.
- L'analyse de la structure des résidus afin de déterminer les propriétés de détectabilité et d'isolabilité des défauts.
- L'utilisation des propriétés structurelles et causales des modèles bond graph pour générer des RRA formelles [20].

1.5.6 Pourquoi les Bond Graphs pour la surveillance ?

La démarche systématique de conception du système de surveillance dans ce cas, est basée sur les propriétés causales, structurelles et comportementales du bond graph. Sur

Fig.1.8 sont indiquées les différentes étapes pour la conception du système de surveillance. On distingue deux phases : une phase hors ligne qui permet, avant la conception industrielle, de générer les algorithmes de surveillance sur la base du modèle bond graph. Un placement de capteur peut être proposé pour satisfaire le cahier des charges. D'autre part grâce à l'aspect graphique du modèle, des éléments bond graphs peuvent être rajoutés pour améliorer la précision des modèles obtenus. Une fois les indicateurs de fautes (RRAs) obtenus, les algorithmes peuvent être implémentés pour la surveillance en ligne.

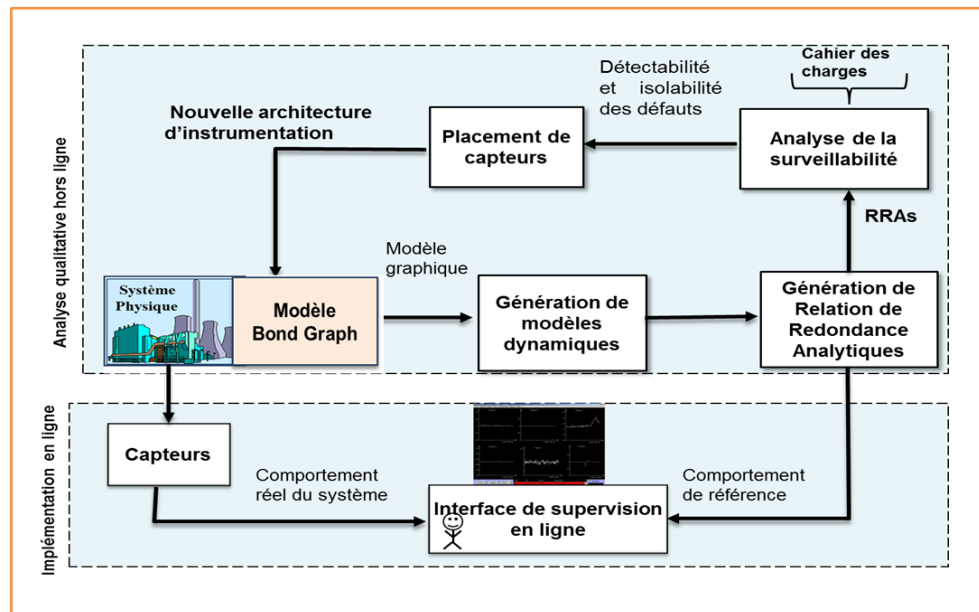


Fig.1.8. Conception intégrée du système de surveillance par bond graph

L'outil bond graph a été initialement utilisé pour la modélisation des systèmes physiques [32], [39]. L'idée d'utiliser une seule représentation (le bond graph) pour la modélisation, l'analyse et la synthèse des lois de commande en exploitant la causalité est récente. Au regard des travaux existants sur ce thème, la contribution de la présente démarche se situe à plusieurs niveaux :

- La démarche est une approche complète pour la conception intégrée d'un système de surveillance allant de la modélisation à la génération des algorithmes formels de surveillance à partir non pas des équations mathématiques mais du procédé physique à surveiller. La démarche est générique et flexible et n'utilise qu'une seule représentation.
- Grâce aux aspects graphiques et les propriétés structurelles et causales du bond graph, les modèles ainsi que les RRAs peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptés à une implémentation informatique en utilisant des logiciels dédiés [40].
- Le modèle est basé sur l'approche énergétique, ce qui signifie que l'architecture

- (topologique, physique et instrumentale) est affichée par le graphe. Grâce à l'aspect modulaire et fonctionnel du bond graph, les RRAs sont systématiquement associées aux défauts (capteurs, actionneurs et physiques) qui peuvent affecter le système.
- L'algorithme de génération des RRAs à partir du modèle bond graph n'est pas seulement limité à des formes particulières du modèle (polynomiale pour la théorie de l'élimination ou linéaire pour la méthode par projection dans le cas de l'espace de parité) mais aussi à des modèles donnés sous forme empiriques.
- Toutefois, certains inconvénients peuvent être cités : les propriétés sont structurelles, elles doivent alors être vérifiées numériquement, et les modèles sont à paramètres localisées.

1.5.7 Étapes de réalisation du système de surveillance. Automatisation des procédures de génération d'algorithmes de surveillance

1.5.7.1 Niveaux de conception du système de surveillance

D'un point de vue industriel, la conception d'un système de surveillance peut être réalisée en deux niveaux comme indiqué sur Fig.1.9. Le premier niveau est réalisé hors ligne pendant la conception et permet de déterminer la meilleure architecture d'instrumentation pour satisfaire le cahier des charges à partir du Plan des Instruments Détaillés (PI&D) du système. Une fois le meilleur placement de capteurs (assurant la surveillabilité structurelle en fonction du cahier des charges) fixé, on implémente en temps réel le système de surveillance. L'opérateur pourra alors vérifier si la MSF déterminée avant conception (dite théorique) correspond à celle réelle (dite pratique). Les RRAs sous forme symbolique sont générées hors ligne. Leur évaluation numérique (pour donner des résidus) est réalisée en ligne sur la base des mesures collectées par des cartes d'acquisition installées sur le procédé. Les logiciels de supervision en ligne (DSPACE, INTOUCH...) permettent alors de générer des alarmes (étape détection) puis par une procédure logique de décision (interprétation de la MSF) de fournir à l'opérateur la liste des défauts détectés et/ou isolés.

1.5.7.2 Automatisation des procédures

Les procédures d'analyse hors ligne des conditions de surveillabilité et la génération des RRAs sous forme symbolique du premier niveau peuvent être automatisées [40]. Des modèles sous formes génériques encapsulés dans une icône métier (reconnaisable par l'industriel) sont créés puis connectés pour former le modèle architectural global.

Ces modèles regroupés sous forme d'une bibliothèque sont réutilisables. La réalisation de ces modèles est basée sur les propriétés causales et fonctionnelles du bond graph. A

chaque composant appartenant à une classe de systèmes (dissipatifs, stockage, sources d'énergie, détecteurs ...) est associé un modèle bond graph avec une causalité dite

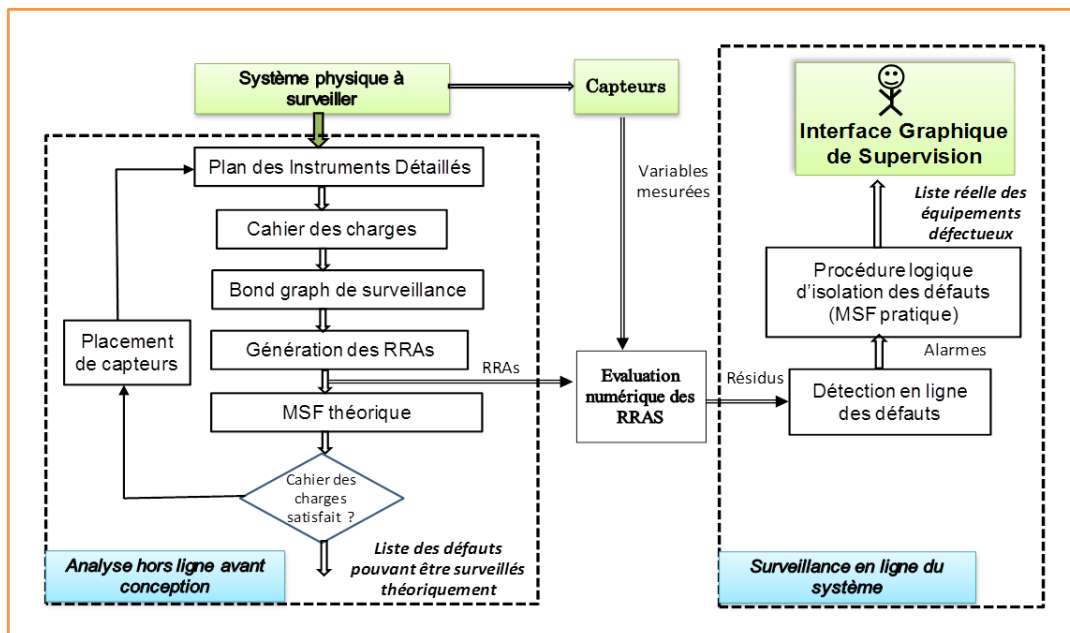


Fig.1.9. Niveaux de conception du système de surveillance

générique permettant leur connections à d'autres sous-systèmes selon des règles de connectivité fonctionnelle bien définies (on ne peut pas connecter deux réservoirs sans une conduite entre eux par exemple).

1.6 Conclusion sur l'état de l'art de la FDI

La réalisation d'un système de surveillance à base de modèle est une opération coûteuse nécessitant plusieurs étapes complexes. L'outil bond graph par ses propriétés causales et structurelles et grâce à son aspect graphique, comportemental, et par son architecture fonctionnelle est bien adapté pour la conception intégrée de tels systèmes allant de la modélisation, la détermination hors ligne des conditions et moyens de surveillabilité avant réalisation industrielle et finalement la génération d'algorithmes de surveillance robustes en ligne.

Afin d'améliorer la procédure de décision de génération des alarmes pour éviter des fausses alarmes et les non détections, des seuils adaptatifs tenant compte des incertitudes paramétriques (explicitement introduites sur le modèle bond graph) sont générés directement du modèle bond graph de surveillance.

D'un point de vue pratique, les champs d'applications de cette méthode sont très vastes grâce à l'aspect énergétique et multi physique des Bond Graphs, et à la forme LFT utilisée

pour modéliser l'influence des incertitudes sur le système. L'aspect graphique du bond graph a permis d'automatiser la génération des modèles et des indicateurs de fautes incertains diminuant ainsi le coût de la conception des systèmes de surveillance.

Partie 2 : État de l'art de la FTC

1.7 Tolérance aux fautes (FTC) dans un système de supervision

Quelles que soient les mesures employées, on ne peut jamais contourner complètement l'apparition des fautes (erreurs humaines, malveillances, usure du matériel, catastrophes naturelles, etc.) au niveau d'un système. Ceci ne doit pas nous empêcher de tenter de prévenir ou d'éliminer ces fautes, les démarches suivies ne peuvent cependant que diminuer la probabilité de leur occurrence.

Il est nécessaire alors de concevoir les systèmes de sorte à ce qu'ils continuent à fournir le service requis (service pouvant être dégradé) même lorsque des fautes surviennent à leur niveau.

Il n'y a aucune méthode de tolérance aux fautes applicable à tous les cas. Néanmoins, il y a des méthodes ajustées à des hypothèses spécifiques d'apparition de fautes. Ces hypothèses doivent donc être énoncées d'une façon claire et explicite, suite à une analyse approfondie.

La tolérance aux fautes est définie par le LAAS comme étant l'assemblage de toutes les approches et techniques permettant de préserver un service capable d'accomplir la ou les fonctions du système, malgré l'occurrence des fautes qui peuvent toucher ses composants, sa conception ou ses interactions avec des hommes ou d'autres systèmes.

La tolérance aux fautes est réalisée en mettant en place des moyens aptes à détecter les fautes susceptibles d'influer le système en fonctionnement. Suite à la détection et à la localisation de ces fautes, le système doit choisir un comportement sûr, soit par reprise, poursuite ou compensation d'erreur, soit par repli.

Les trois premiers types de comportements garantissent la poursuite de l'exécution de la fonction, généralement en mode dégradé. Les secteurs industriels (chimie ou autres) et du transport (automobile, ferroviaire ou aérien) les utilisent souvent. Quant au repli, il est utilisé dans le domaine de la sécurité des machines. Ce comportement permet de mettre le système dans un état sûr, par coupure (plus ou moins immédiate, selon les applications) de la puissance des actionneurs.

1.7.1 Terminologie

Nous citons ici sans exhaustivité quelques termes souvent employés dans le domaine de la tolérance aux fautes, avec leurs définitions.

Système tolérant aux fautes : c'est un système où une faute est recouverte avec ou sans dégradation de performances, mais aucune faute ne se développe en une défaillance au niveau de ce système.

Propriété de recouvrement : c'est la possibilité d'accommoder la faute ou de reconfigurer le système si une faute se produit.

Recouvrement de fautes : c'est le résultat d'une accommodation de fautes ou d'une reconfiguration du système réussies.

Accommodation de fautes : c'est l'action de changer la loi de contrôle en réponse à une faute, sans éteindre aucun composant du système. En accommodation de fautes, les composants défectueux sont maintenus en fonctionnement grâce à une loi de contrôle adaptée.

Reconfiguration d'objectif : c'est l'action de changer l'objectif du système de contrôle. La reconfiguration d'objectif est obligatoire quand des fautes irréparables (non recouvrables) pour l'objectif actuel se produisent.

Reconfiguration de système : c'est l'action d'éteindre (de mettre hors tension) les composants défectueux et par conséquent changer la loi de contrôle, en réponse à une faute. Dans la reconfiguration du système, les composants défectueux ne sont plus employés.

Système actif de contrôle tolérant aux fautes : c'est un système tolérant aux fautes où les fautes sont explicitement détectées et accommodées. À l'opposé du système passif tolérant aux fautes.

Système passif de contrôle tolérant aux fautes : c'est un système tolérant aux fautes où les fautes ne sont pas explicitement détectées et accommodées, mais le contrôleur est conçu pour être insensible à un certain ensemble restreint de fautes. Contrairement à un système actif tolérant aux fautes.

Action remède : c'est une action corrective (une reconfiguration ou un changement dans le fonctionnement d'un système) pour prévenir une certaine faute de se propager en effet final non désiré.

1.7.2 Classification des méthodes de FTC [41], [31]

La commande tolérante aux fautes (FTC) vise à établir un plan de commande permettant de restreindre, ou même de supprimer les effets d'une faute sur les performances du système tout en conservant des marges de stabilité adéquates. L'emploi d'une commande robuste peut être suffisant pour maintenir les performances nominales d'un système, dans le cas d'une légère faute : il s'agit alors d'accommodation passive de la faute. Cependant, lorsque des fautes critiques apparaissent, il devient essentiel de disposer d'un module de détection et de localisation de fautes pour pouvoir réaliser une stratégie active de tolérance aux fautes. On peut discerner dans ce cas l'accommodation et la reconfiguration selon la qualité des performances à la suite des fautes.

La commande tolérante aux fautes devient alors très importante pour améliorer la fiabilité et la sécurité d'un système. Les systèmes de commande tolérante aux fautes sont des systèmes capables de s'accommoder d'un défaut de composant et de maintenir la stabilité du système ainsi que des performances acceptables suite à l'occurrence de telles fautes.

La commande tolérante aux fautes a captivé l'intérêt de nombreux chercheurs et reste jusqu'à ce jour un sujet de publications très d'actualité [42], [43], [44]. Une classification générale de la commande tolérante aux défauts a été proposée dans [15], elle est représentée par le schéma de Fig.1.10, où deux principales catégories peuvent être distinguées : la commande tolérante passive (PFTC : Passive Fault Tolerant Control) et la commande tolérante active (AFTC : Active Fault Tolerant Control) aux défauts.

1.7.2.1 Méthode passive

La FTC dans cette approche doit tolérer un certain ensemble de défauts probables pris en considération pendant la conception du contrôleur (prédéfinis). La tolérance à ces défauts doit être réalisée sans aucune modification de la stratégie de commande ou des paramètres du contrôleur. Elle exploite les techniques de la commande robuste aux incertitudes structurées qui représentent les défauts (commande H_∞ , commande rejet de perturbations...). Parmi les travaux de recherches qui ont abordé ce domaine, on peut citer ceux présentés dans [45] et [46]. Dans la méthode passive, les performances du système commandé subissent souvent une dégradation en fonctionnement normal. En plus, ces approches passives sont limitées par la possibilité de ne s'occuper que des défaillances anticipées.

Dans la PFTC (Passive Fault Tolerant Control), nous pouvons distinguer deux approches :

a- La commande robuste

Cette commande est bien appropriée pour les systèmes qui contiennent des incertitudes paramétriques. Son objectif consiste à réduire un critère de dispersion des résultats pour toutes les valeurs potentielles des paramètres incertains, dans le

but d'assurer la stabilité des systèmes commandés et un niveau de performance acceptable en dépit de la présence d'incertitudes sur les paramètres et/ou la négligence de certaines dynamiques dans la modélisation du processus.

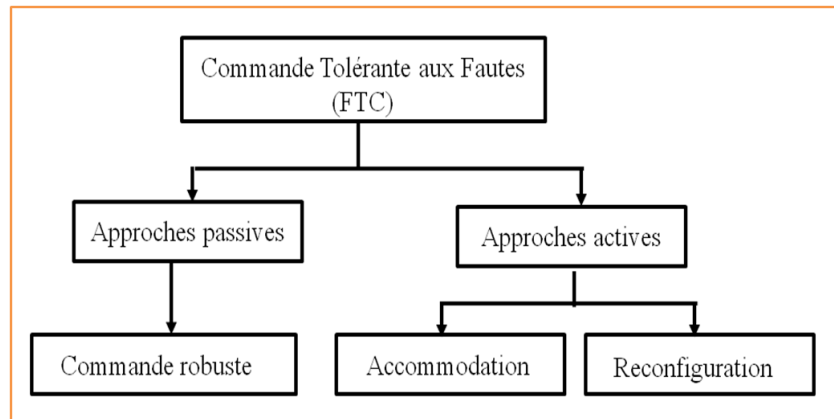


Fig.1.10. Classification des méthodes de FTC

Une brève classification de quelques approches robustes peut être effectuée, suivant le type d'incertitudes paramétriques considéré. Lorsque les incertitudes paramétriques sont structurées, les approches employées sont souvent la méthode QFT (Quantitative Feedback Theory) [47] et la commande CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) [48]. Quand ces incertitudes sont non structurées, il est possible d'utiliser des méthodes telles que l'optimisation à sensibilité mixte [49] et la synthèse H_∞ [50].

Des approches multi-modèles telles que le placement de valeurs et les vecteurs propres [51], et le placement de pôles avec calibrage des fonctions de sensibilité [52] peuvent être utilisées dans le but de prendre en compte tous les états paramétriques possibles.

La tolérance aux fautes de ces méthodes est assez restreinte, en boucle fermée, la loi de commande ne peut tolérer que certains types de défauts.

b- L'approche par stabilisation simultanée des systèmes

Cette approche repose sur le principe suivant : soient les systèmes représentés par les fonctions de transfert $T_0(s), T_1(s), \dots, T_n(s)$ où $T_0(s)$ décrit le fonctionnement nominal du système et $T_1(s), \dots, T_n(s)$ son fonctionnement en présence de $1, \dots, n$ défauts distincts, respectivement. Le problème consiste alors à trouver un seul régulateur K tel que le système $T_i(s)[I + K(s)T_i(s)]^{-1}$ (où $i = 1, \dots, n$) maintient sa stabilité suite à l'apparition d'un défaut. Fig.1.11 illustre le schéma de régulation de n systèmes.

Suite aux travaux de Youla et al. [53], de nombreux auteurs se sont intéressés aux problèmes de la stabilisation simultanée des systèmes. Nous pouvons citer les travaux de Saeks et Murray [54], de Vidyasagar et Viswanadham [55], de Ghosh et Byrnes [56], et enfin les travaux de Howitt et Luus [57] qui ont cherché à stabiliser d'une façon simultanée une famille de systèmes linéaires modélisés par des fonctions de transfert en utilisant un régulateur linéaire.

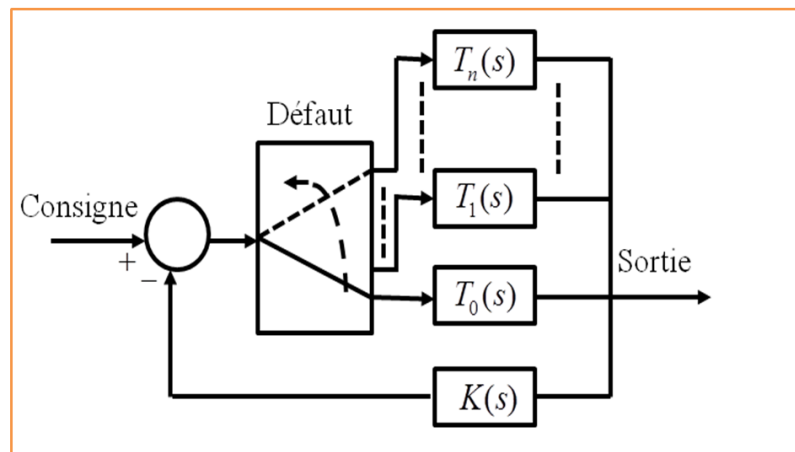


Fig.1.11. Approche par stabilisation simultanée

1.7.2.2 Méthode active

À l'opposé de l'approche passive, les méthodes actives appelées AFTC (Active Fault Tolerant Control) réagissent lorsqu'un ou plusieurs défauts surgissent. Ceci peut être réalisé en procédant à la reconfiguration en ligne de la loi de commande, ou du système ou des objectifs. Le principal objectif de ces méthodes est le maintien de la stabilité et des performances du système, en agissant sur la robustesse de la commande qui doit être améliorée à chaque détection de défaut. Dans certains cas et suivant l'application et l'importance du défaut, des performances dégradées doivent être acceptées [31], [58].

L'approche active comprend deux techniques : l'accommodation des défauts et la reconfiguration de la loi de commande ou de l'objective ou du système. Le choix entre ces stratégies est relatif aux informations provenant du module FDI. Les AFTCS (Active Fault Tolerant Control System) permettent de faire face à des défauts inconnus grâce à un module de détection et de localisation des fautes et une commande de la reconfiguration avec la possibilité d'atteindre des performances optimales. Ces raisons rendent la commande tolérante active plus utilisable en dépit de la complexité de sa mise en œuvre. Parmi les travaux les plus récents qui se sont intéressés à l'approche active de la tolérance aux fautes, nous pouvons citer le travail de Lurye et al. [59], dans lequel un algorithme a été présenté pour la conception automatisée d'un diagramme de reconfiguration en se basant sur l'analyse de l'arbre des défaillances des stratégies d'urgence, ce graphe d'état attribue à chaque défaut une commutation correspondante de la stratégie de commande.

Un autre travail récent est celui présenté dans [60], où une approche permettant de générer automatiquement des plans de reconfiguration a été développée. Cette approche vient compléter des travaux antérieurs visant à décider de l'état de reprise [61], [62], elle repose sur l'étude des contraintes structurelles et opérationnelles relatives aux composants du système, d'une part, et fait appel à des algorithmes de planification proposés dans le domaine de l'intelligence artificielle, d'autre part.

Le travail présenté dans [63], constitue également une contribution à la reconfiguration dynamique des systèmes manufacturiers. Le principe consiste à synthétiser les contrôleurs de commande en considérant les spécifications de l'utilisateur ainsi que les contraintes du système. La synthèse est réalisée en exploitant la théorie des régions revisitée par les travaux de A. Gaffari [64].

L'intérêt s'est porté dans [65], sur le développement de procédures efficaces pour la reprise suite à l'apparition d'erreurs physiques dans un système de production. Trois types d'Agents intelligents (agents de production, agents médiateurs et agents de recouvrement d'erreurs) ont été développés pour assurer la génération et l'application des plans de reprise suite à des erreurs attendues et inattendues.

En général, les AFTCS sont composés de quatre sous systèmes [66], comme illustré sur Fig.1.12 :

- Une commande reconfigurable (CR)
- Un module FDI, sensible aux fautes et robuste aux incertitudes du modèle, aux changements des conditions d'exploitation et aux perturbations externes. Ce module fonctionne en temps réel afin de fournir les informations sur le défaut et sur le modèle après l'apparition du défaut.
- Un mécanisme de reconfiguration du contrôleur, permettant le meilleur recouvrement possible des performances du système précédant l'apparition du défaut, en présence d'incertitudes et de retard des informations provenant du module FDI, tout en respectant les contraintes de la commande, du système et des limites de la sortie.
- Un générateur de consigne.

Ces sous systèmes fonctionnent séquentiellement : Quand un défaut survient au niveau du système, le module de surveillance est supposé fournir au module de reconfiguration de la commande des informations suffisantes sur le défaut survenu. La stratégie de reconfiguration de la commande avec le réajustement possible de la consigne d'entrée est ensuite envoyée au contrôleur pour son application.

Grâce à l'avancée technologique de l'informatique et à l'utilisation de la redondance analytique en tolérance active, l'implémentation logicielle des contrôleurs est devenue de plus en plus utilisée

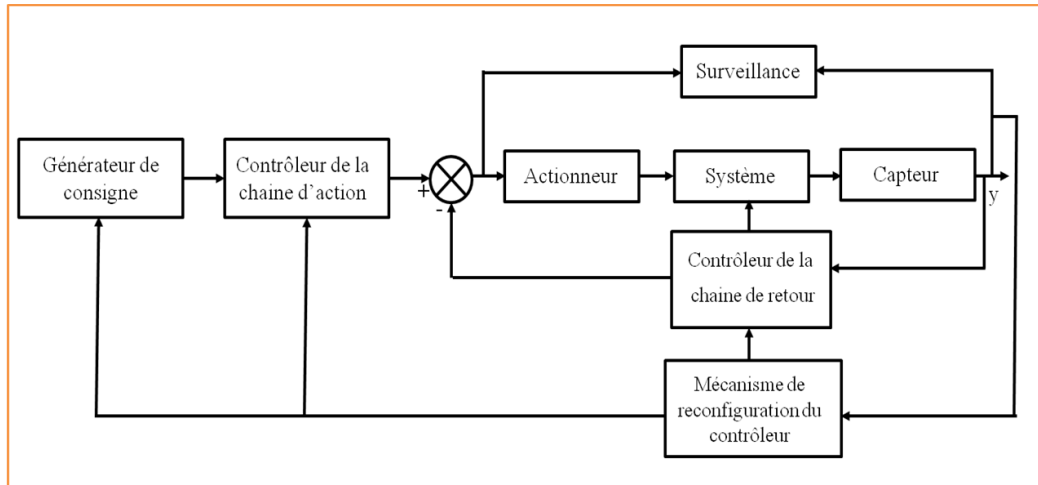


Fig.1.12. Structure générale d'un AFTCS

Lors de la réalisation d'un module AFTCS, il est nécessaire, de prendre en considération la cohérence entre les types d'information pouvant être fournis par le module FDI et ceux nécessaires à une stratégie de reconfiguration raisonnable. Le système global ne fonctionnera correctement que s'il y a une correspondance entre la demande et l'apport de ces deux sous-systèmes. Par exemple, un résultat erroné ou trop en retard de la FDI peut conduire à une perte de performance et peut même rendre le système instable. Il est également très important de mettre l'accent sur le fait que l'action de reconfiguration de la commande est réalisée dans un intervalle de temps restreint dont la durée dépend de l'application, des conditions de fonctionnement du système lors d'apparition du défaut et de la sévérité de la faute. En aérospace par exemple, cette durée est de quelques secondes seulement. Dans un système chimique par contre, le temps disponible pour la FDI et la CR est en général beaucoup plus long.

Les AFTCS se différencient des PFTCS principalement par la présence d'un module de surveillance et d'un contrôleur reconfigurable dans la structure globale du système.

La limite des AFTCS réside dans le temps disponible restreint pour la surveillance et la reconfiguration des contrôleurs. Pour préserver l'intégrité du système global, il est souhaitable que la détection et l'identification des défauts sur le système se fait d'une façon rapide et que l'action de correction d'un contrôleur soit entamée immédiatement. Il est également nécessaire de prendre en compte la stabilité, les performances du régime transitoire et permanent, la robustesse aux bruits, aux incertitudes et aux perturbations lorsque des défaillances surgissent au niveau du procédé.

Ce n'est qu'une dizaine d'années que des travaux de recherches s'intéressent à l'élaboration d'AFTCS en prenant en considération la FDI et le module de reconfiguration conjointement, parmi les articles traitant ce sujet, nous pouvons citer de façon non exhaustive [67], [68], [69]. Le lecteur intéressé pourra également se référer aux articles

[70], [46] et aux livres [71], [72] qui insistent surtout sur le diagnostic et la commande tolérante aux fautes.

Parmi les méthodes de commande appliquant l'approche active, nous pouvons mentionner :

a- Méthode de la pseudo inverse (PIM) [73] :

Plusieurs chercheurs se sont penchés dans leurs travaux ces dernières années sur la méthode de la pseudo inverse [74], [31]. Cette approche est employée pour les systèmes linéaires et repose sur la minimisation de la norme de Frobenius de l'écart entre le modèle en boucle fermée du système défectueux et le modèle de référence. Son principe est expliqué ci-dessous.

En fonctionnement normal, le système en boucle fermée est décrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + BK)x(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1.8)$$

Où $x(t) \in R^n$, $y(t) \in R^m$, avec $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{m \times n}$, $K \in R^{m \times n}$.

En cas de défauts, le système peut être modélisé par la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u_f(t) \\ y_f(t) = C_f x_f(t) \end{cases} \quad (1.9)$$

L'indice f dénote l'état en défaut du système, les dimensions des vecteurs et des matrices restent les mêmes. Cette approche implique le calcul d'une nouvelle matrice de gain K_f de façon à approcher l'égalité entre la dynamique du système défectueux en boucle fermée et celle du système nominal.

Une approximation telle que définie dans les moindres carrés est exprimée sous la forme :

$$K_f = B_f^+(A - A_f + BK) \quad (1.10)$$

Où B_f^+ est la matrice pseudo-inverse de la matrice B_f .

Une méthode de pseudo-inverse modifiée a été proposée dans [74], pour pallier le problème de la stabilité du système en boucle fermée.

Parmi les travaux utilisant la méthode de la pseudo-inverse, nous pouvons citer celui présenté dans [75], dans lequel l'approche proposée pour la synthèse de loi de commande

a été développée dans un contexte H_∞ / μ , elle ne s'applique donc qu'aux systèmes pouvant être représentés par des modèles linéaires à temps invariant (LTI), multivariables et incertains. Le travail présenté dans [76], s'intéresse également à la commande tolérante aux fautes d'un système LTI, mais avec plusieurs actionneurs, qui peuvent être affectés par de nombreuses fautes indépendantes supposées détectables et isolables.

La seconde méthode de reconfiguration et/ou de restructuration proposée dans les travaux [77], [78] repose également sur la PIM pour établir la synthèse des régulateurs, afin de déterminer la structure optimale du système, dans un cadre multicritères.

b- Commande prédictive (MPC)

La capacité de la commande prédictive à résoudre le problème de l'accommodation aux défauts, a été étalée dans [36]. Le MPC (*Model Predictive Control*) a pour objectif le calcul d'une séquence de commande sur un intervalle de temps fini, qui minimise au maximum une fonction de coût J . Cette fonction repose généralement sur l'erreur entre la sortie attendue du modèle et la trajectoire de référence souhaitée.

La reconfiguration par MPC permet de réajuster le correcteur lorsque des défauts apparaissent afin d'assurer la stabilité du système et de préserver des performances très voisines de celles du système nominal. Toutefois, la majorité de ces méthodes sont valides sous certaines hypothèses : le modèle des défauts (et leurs effets sur le système) doit être bien connu. Les défauts considérés doivent être de faible ampleur afin que les objectifs à réaliser par le système puissent rester les mêmes suite à l'apparition des défauts [36].

c- Commande adaptative (AC) [28]

Cette méthode utilise des techniques d'identification en ligne pour une évaluation régulière de la valeur des paramètres θ et la résolution du problème de commande pour les variations de θ .

Le système de commande adaptative repose sur le principe montré en Fig.1.13 :

Deux approches principales peuvent être discernées dans la commande adaptative :

Commande adaptative directe : l'ajustement des paramètres du régulateur se fait directement et en temps réel en comparant entre les performances réelles et celles souhaitées. Parmi les travaux exploitant cette méthode on peut citer [79], [28].

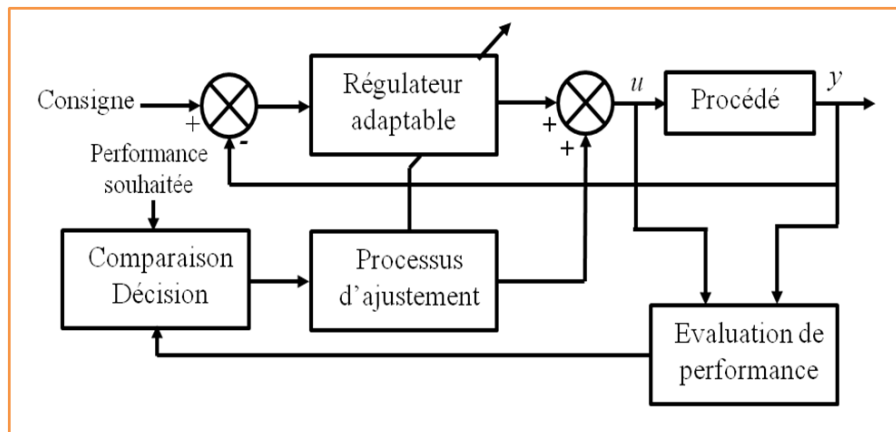


Fig.1.13.Principe général d'un système de commande adaptative

Commande adaptative indirecte : On utilise une procédure d'identification pour l'estimation des paramètres du système (commande par placement de pôles adaptatifs). Ce second type de commande adaptative est plus employé par rapport au premier, dû à la prise en compte des caractéristiques d'évolution du processus.

La tolérance aux fautes de ces approches demeure toujours restreinte. Toutefois, les techniques de la commande adaptative sont plus tolérantes par rapport aux méthodes passives. Ceci revient au fait que le calcul de la loi de commande est en fonction de l'état courant des paramètres du procédé.

d- Commande multi-modèles (MM) [36]

Lorsqu'il est possible de bien définir les modes de défauts du système par un ensemble fini de modèles en défaut prédéterminés ou qu'un ensemble fini de modes de défauts est considéré pour la reconfiguration, il devient possible d'utiliser une approche qui repose sur des modèles multiples et des commandes à gain variable [80], [81]. Cette méthode est utilisée pour contrôler un système non linéaire sur une grande plage de fonctionnement divisée en différentes zones linéarisées autour de divers points de fonctionnement. La loi de commande globale est établie à partir de n lois de commandes de base (calculées pour tous les cas éventuels du système). La loi de commande globale U adoptée par le système est calculée par:

$$U = \sum_{i=1}^n u_i P(H_i / r_i) \quad (1.11)$$

Où u_i est la commande locale, et $P(H_i / r_i)$ sont les probabilités relatives à chaque cas potentiel, déterminées à partir des probabilités de Bayes [36]. Cette méthode est valide quand le modèle n'est pas affecté de bruits.

Le travail réalisé dans [82] utilise le principe de cette méthode, pour la mise en place d'une commande tolérante active aux fautes pour des procédés dont la dynamique est modélisée par un système non linéaire affine en la commande. Ceci par le calcul d'une banque de contrôleurs pour différents cas de défauts détectable(s) et localisable(s). Le mécanisme de reconfiguration consiste à faire basculer la loi de commande du mode nominal au mode correspondant au défaut(s) détecté(s) et localisé(s).

La tolérance aux fautes est assurée dans [83] par la reconfiguration du système considéré, en se basant sur un diagramme de disponibilité des équipements, avec des modes opérationnels classés selon un ordre de préférence.

e- FTC par observateurs adaptatifs [84]

Dans cette approche, il est possible d'utiliser une technique d'identification à base d'observateurs adaptatifs pour déterminer les paramètres du système défectueux, après la détection de(s) défaut(s), et procéder à des modifications du contrôleur.

La procédure de la FTC se déroule selon les étapes suivantes:

- 1) En fonctionnement normal, la loi de commande consiste en un algorithme de commande adaptative et la FDI est utilisée pour la détection de tout défaut apparaissant sur le système;
- 2) Lors de la détection du défaut et avant son isolation, l'AOFDI (module FDI à base d'observateurs adaptatifs) assure l'analyse des défauts et l'identification des paramètres défectueux. La loi de commande utilise une stratégie passive de FTC.
- 3) Après l'isolation du défaut, la fonction de reconfiguration du contrôleur est traitée par la FTC;
- 4) Un contrôleur adaptatif indirect est sélectionné comme contrôleur reconfigurable.

L'approche de tolérance aux fautes que nous avons adoptée dans notre travail appartient aux méthodes actives. Elle consiste à considérer les possibilités d'accommodation et de reconfiguration d'un système industriel en réponse à l'apparition des défauts. Ceci en exploitant les résultats de la FDI en ligne.

Certains travaux de recherche ont exploité les deux approches active et passive pour assurer la tolérance aux fautes ; Le travail décrit dans [85], par exemple fait partie de cette catégorie. En effet, une stratégie de commande tolérante aux fautes combinant les approches actives et passives (PACT strategy), a été conçue, en se basant sur l'ensemble des configurations recouvrables minimales du système. Ceci afin de traiter la FTC dans un

système linéaire à temps invariant (LTI), en présence de défauts au niveau des actionneurs sous la stratégie de reconfiguration (c'est-à-dire, lorsque les actionneurs défectueux doivent être arrêtés). L'approche PACT développée permet de réaliser un compromis entre l'efficacité de l'approche active (en permettant la couverture de l'ensemble de toutes les fautes recouvrables) et la simplicité de l'approche passive (en construisant une banque avec un nombre réduit de lois de commande).

Un autre travail combinant les deux approches passive et active est présenté dans [86], où de nombreux contrôleurs (AFT) ont été mis en œuvre, chacun d'eux associé à un sous ensemble de défauts (PFT). Une extension de la stratégie de commande fiable où un seul sous ensemble de défauts est pris en compte a été étendue, cette approche s'applique également au cas où toutes les fautes ne sont pas recouvrables.

1.7.3 Conclusion sur la FTC

Le but de la commande tolérante aux fautes consiste à trouver des solutions, lorsqu'elles existent pour satisfaire les objectifs fixés lorsque des défauts surviennent, avec la prise en considération des informations fournies par le module de surveillance. Nous avons mentionné deux méthodes de la commande tolérante aux fautes : la méthode passive et la méthode active. Cette dernière est plus appropriée pour détourner les fautes ; il peut s'agir dans ce cas de l'accommodation ou de la reconfiguration. Toutefois, il sera toujours intéressant d'associer les deux approches pour assurer la tolérance aux fautes d'un système industriel, de cette façon, il est possible de bénéficier des avantages des deux méthodes ensemble.

1.8 Commentaire sur les travaux de supervision

Les travaux de recherches dans le domaine de la supervision, se focalisent dans la plupart du temps sur un seul aspect de cette thématique : la FDI ou la FTC. Dans le travail présenté dans [87], par exemple, une contribution à la supervision a été proposée dans le contexte du système de systèmes (SdS). Les propriétés graphiques de l'hypergraphe ont été exploitées pour déceler des solutions de reconfiguration ; ceci en parcourant le graphe d'une manière descendante. Quant à la surveillance, il a été supposé que l'étape de calcul des indicateurs de défauts à partir du modèle bond graph du processus étudié a été déjà réalisée et d'une manière correcte et les informations obtenues ont été exploitées directement.

Dans [88], par contre, une analyse structurelle de la tolérance aux fautes des actionneurs, des capteurs, et du système a été réalisée en utilisant l'outil Bond graph. Ceci afin de déterminer les conditions de diagnosabilité et de recouvrabilité. Cependant, l'accent a été mis plus sur l'étude des conditions relatives à la recouvrabilité structurelle de fautes, en

exploitant les propriétés causales, structurelles, comportementales et graphiques du modèle BG. Le but étant d'implémenter une commande en boucle fermée.

Le travail de thèse présenté dans [89] est considéré comme une contribution à la reconfiguration dynamique des systèmes de production, bien qu'il contribue réellement à la partie diagnostic de services suite à l'apparition de défauts au niveau de la partie opérative. Ceci afin de mettre à jour et en ligne, un modèle indiquant les capacités fournies par la partie opérative, mais ceci dans le but de faciliter la procédure de reconfiguration (cette fonction de la supervision n'a pas été traitée dans ce travail).

Le travail développé dans [90] concerne également la reconfiguration, mais côté analyse. L'article présenté propose une approche formelle pour analyser la reconfigurabilité du système, c'est-à-dire sa capacité à poursuivre ou pas ses objectifs, en dépit de l'occurrence des défauts. Le système est décrit du point de vue des services fournis par ses composants, qui sont groupés dans des modes de fonctionnement (USOMs) choisis par l'utilisateur, afin de réaliser certains objectifs.

Quant au travail réalisé dans [91], il constitue un apport dans le domaine de la supervision (avec ces deux aspects) des systèmes non linéaires affins en la commande.

Un module de diagnostic a été construit pour la détection et la localisation des défauts capteurs et actionneurs, en utilisant deux approches différentes. La première utilise la technique de multi-observateurs et la seconde repose sur la génération des relations de redondance analytique. Une stratégie de reconfiguration adéquate a été développée, son principe consiste à sélectionner une commande prédéfinie selon le type du défaut détecté.

Le travail de thèse réalisé dans [92] propose une approche système qui permet d'étudier et d'implémenter des systèmes reconfigurables. Un langage de haut niveau assez générique appelé DesSyRe a été proposé pour représenter les systèmes reconfigurables de différentes natures, traitant des flux (de produits ou de données). Diverses analyses liées à la performance, au coût, à la flexibilité, à la robustesse ou à la cohérence sont proposées en utilisant ce langage, afin de permettre au concepteur et à l'utilisateur de tirer profit de la reconfiguration

Chapitre 2

Surveillance des systèmes par bond graph

Dans ce chapitre nous avons présenté tout d'abord la raison principale du choix du modèle bond graph pour la conception d'un système de surveillance. Un bref état d'art sur l'utilisation de ce modèle a été dressé, en citant d'une façon non exhaustive des travaux dans la littérature qui se sont basés sur le bond graph pour assurer différentes fonctions allant de l'analyse des propriétés d'un système jusqu'à la surveillance, en passant par la simulation et la commande. Toutefois, nous avons accordé la plus grande importance à la surveillance à base de ce modèle, qui a été décrite en détail. L'aspect robustesse aux incertitudes paramétriques a également été pris en compte ; ceci en décrivant les étapes de génération des indicateurs de défaillances à base de la forme LFT du bond graph.

2.1 Surveillance des systèmes par bond graph

2.1.1 Intérêt du modèle bond graph pour la surveillance

Dans les méthodes de surveillance à base de modèle, la modélisation du processus considéré est une étape très importante pour l'élaboration d'algorithmes de surveillance. Obtenir un modèle décrivant le comportement du système avec le plus de précision, est une tâche très difficile [93]. En particulier, lorsqu'il s'agit de systèmes en génie des procédés, où il existe un fort couplage des phénomènes physiques (hydrauliques, thermiques et chimiques, etc.) et les modèles sont dans la plupart du temps non linéaires. D'où la nécessité d'utiliser un langage de modélisation multidisciplinaire et unifié. La méthodologie bond graph se révèle alors être la représentation qui convient le mieux pour ce type de processus [94], [95], vu que c'est un outil de modélisation graphique unifié permettant de prendre en compte l'aspect multi-énergies des processus.

De plus, les modèles comportementaux des systèmes peuvent être obtenus automatiquement en utilisant les logiciels à base de Bond graph disponibles [96], [97]. De

nombreuses approches FDI qualitatives et quantitatives à base de bond graph ont été développées pour la détection et l'isolation des défauts d'un seul domaine énergétique [98], [99], [100], mais peu sont les travaux qui ont abordé FDI des systèmes non linéaires couplés tels que les processus thermo-fluides [101], [13].

2.1.2 Un bref état d'art sur l'utilisation du bond graph

Le bond graph est un modèle résultant d'une étude des énergies échangées au sein du procédé physique, il nous aide à analyser des propriétés du système. Ce modèle est intéressant pour la surveillance en termes de détection et de localisation des défauts mais également pour le choix et le placement des capteurs.

L'utilisation usuelle du modèle bond graph consistait à le considérer comme un modèle de connaissance pour la simulation et la commande des systèmes dynamiques [94], [102]. En effet, ses premières utilisations consistaient à exploiter ses propriétés causales pour résoudre des problèmes de commande. Les premiers travaux concernaient au début une extension de la règle de Mason [103]. D'autres travaux suivirent dans ce sens, où le bond graph a été utilisé comme outil de calcul formel et d'analyse structurelle pour la résolution de problèmes de commande tels que la commandabilité en sortie, l'inversibilité, le découplage entrée-sortie, l'observabilité, le placement de pôles etc. Ces approches reposent toutes sur le parcours des chemins causaux entrée-sorties des modèles bond graph pour analyser des systèmes de commandes linéaires modélisant une seule énergie [104], [105]. L'étude des propriétés structurelles telles que la commandabilité, l'observabilité et la surveillabilité à partir de la modélisation par bond graph des systèmes linéaires a fait l'objet d'autres travaux, nous pouvons citer ceux présentés dans [106] et [107]. Le travail plus récent présenté dans [108] constitue une contribution à l'analyse des conditions de surveillabilité (aptitude à détecter et isoler les défaillances) des procédés industriels complexes représentés par des modèles bond graph couplés non linéaires. Ces modèles ont été linéarisés autour d'un point d'équilibre afin d'exploiter les méthodes développées pour les systèmes linéaires qui visent à déterminer les propriétés structurelles directement à partir du modèle bond graph sans faire un calcul préalable. L'analyse des modèles bond graphs linéarisés permet de déterminer la surveillabilité des fautes additives (actionneurs et capteurs) et la surveillabilité des fautes multiplicatives (composants physiques).

Le bond graph a été utilisé par la suite comme une seule représentation pour la modélisation, l'analyse et la synthèse des lois de commande. Différents travaux ont été développés dans ce sens [109], [110], [111]. Les Bond graphs ont été utilisés dans [112] comme base pour concevoir un outil évolutif de modélisation assigné à la conception de dispositifs technologiques. Cet outil permet la création et l'adaptation de modèles à partir d'un cahier des charges. L'approche logicielle proposée a été utilisée aussi dans la réadaptation du modèle d'un actionneur hydraulique d'ordre insuffisant, cette approche a

aussi aidé dans la conception d'un instrument médical de surveillance des maladies de l'oreille selon les spécifications imposées par le concepteur.

La thèse présentée dans [113] constitue une contribution au développement d'une méthodologie de dimensionnement des chaînes d'actionnement des systèmes mécatroniques en utilisant les modèles bond graph inverses. Le problème de dimensionnement traité dans ce travail consiste à sélectionner des composants constituant les chaînes d'actionnement de façon à satisfaire au mieux un cahier des charges. Ce problème a été reformulé sous une forme inverse où les inconnus du problème de dimensionnement sont directement calculés à partir des spécifications du cahier des charges sur les sorties du système. Ce mémoire a considéré également le cas où le problème de dimensionnement ne pouvait pas être complètement traité par inversion. La phase d'analyse structurelle et la résolution par optimisation dynamiques ont été déployées pour ce type de problèmes. L'approche développée dans ce travail de thèse a été mise en œuvre sur deux cas d'étude issus du domaine automobile (dimensionnement d'une direction assistée électrique puis d'une chaîne de traction).

L'utilisation du bond graph pour la surveillance a commencé à l'université de Lille, avec la thèse de Tagina [107], ceci en exploitant la structure causale de ce modèle.

D'autres auteurs se sont intéressés aussi à cet axe, comme l'article présenté dans [114] où une approche de surveillance de fautes à base de modèle en ligne a été proposée pour les systèmes hybrides. Cette approche repose sur la modélisation en bond graph hybride afin d'éviter l'énumération préalable de tous les modes possibles d'un système. La décomposition structurelle des modèles bond graph hybrides en utilisant les conflits possibles et en les implémentant par le biais de schémas blocs, permet la reconfiguration rapide du système de surveillance lors d'un changement du mode grâce à un ré-assignement efficace de la causalité à chaque changement de mode. L'approche de surveillance proposée permet également de suivre le comportement du système durant les états transitoires dû aux changements de modes.

Dans le travail de thèse présenté dans [108], l'auteur s'est intéressé à la surveillance des actionneurs au niveau d'un système thermo-fluide non linéaire, ceci en exploitant la théorie de la platitude des systèmes ; en effet, l'approche de surveillance des actionneurs présentée repose sur la détermination des sorties plates du système à surveiller et à assurer leurs mesures. Cette méthode est développée pour les systèmes plats, or, les systèmes thermo-fluides ne sont pas tous plats, d'où le développement d'une autre méthode à base d'algèbre différentielle et de degrés de transcendance pour ces systèmes, à condition que leurs équations d'état soient sous une forme polynomiale. La méthode de surveillance développée dans cette thèse a été appliquée à un site pilote d'une installation de génération de vapeur (GV).

2.1.3 Bond graph pour la surveillance

Peu de travaux utilisent les bond graphs pour résoudre les problèmes de surveillance. Le modèle bond graph est utilisé dans ces travaux souvent pour définir d'autres formes de modélisation des systèmes afin d'exploiter des méthodes classiques (schéma bloc [115], [116]), d'étudier l'observabilité pour décider du nombre, de la position des capteurs et des actionneurs défaillants [117]. On peut citer d'autres travaux récents sur la surveillance des systèmes, tels que ceux présentés dans [100] et [118], qui utilisent des bond graphs qualitatifs.

En se basant sur l'approche bond graph, un système de surveillance peut être représenté par Fig.2.1.

Deux principales parties peuvent être distinguées : la première est relative au transfert de la puissance et de l'énergie (constituée du processus et de l'ensemble des actionneurs), et la seconde est relative aux signaux (le système d'information : les capteurs et le système de commande) [108].

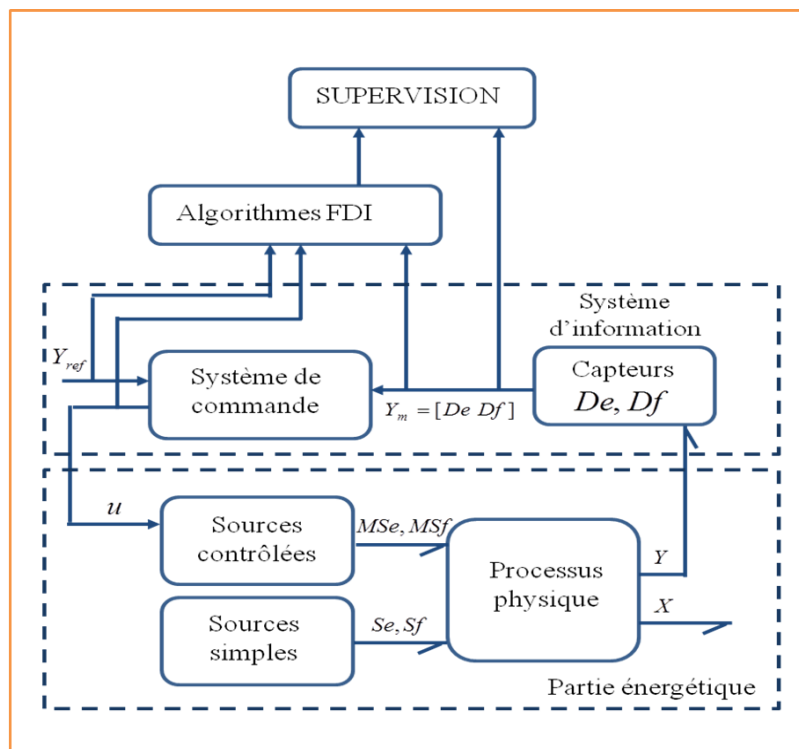


Fig.2.14. Représentation bond graph d'un système de surveillance

Les algorithmes de surveillance (détection et isolation de fautes FDI) reçoivent en ligne les informations provenant des capteurs (détecteurs d'effort D_e et de flux D_f) et fournissent au système de supervision les alarmes.

Deux approches bond graph peuvent être utilisées pour assurer la FDI des systèmes industriels : *l'approche quantitative* et *l'approche qualitative*.

- **L'approche quantitative s'appuie sur l'utilisation des lois physiques et exige une connaissance approfondie de la constitution du système et des valeurs numériques de ses paramètres. Elle repose sur la comparaison du comportement normal du procédé à celui du modèle numérique. Les modèles (tels que les fonctions de transfert, les équations d'état, ...) peuvent résulter de l'application des lois physiques (lois des premiers principes) [119], [120] ou en ayant recours à une identification statistique des paramètres [121], [24]. Depuis quelques années (à partir de 1995), on utilise le modèle bond graph quantitatif directement pour concevoir un système de surveillance. Plus de détails sur ces méthodes seront présentés dans ce qui suit.**
- **L'approche qualitative ne nécessite pas la présence d'un modèle numérique rigoureux : elle repose sur l'évaluation en fonction des opérateurs (+, -, ...) de l'écart du comportement actuel du système en comparaison avec le comportement nominal.**

2.1.3.1 Approche qualitative du bond graph pour FDI

Les bond graphs qualitatifs ne permettent de définir que la position des composants du processus et leurs interconnexions, contrairement aux méthodes utilisées en mathématiques conventionnelles qui permettent grâce à différents outils (schéma-bloc, équations différentielles, ...) de décrire la structure du système et son état. Cependant, l'utilisation des modèles bond graphs qualitatifs pour assurer la surveillance est beaucoup plus simple car il n'est pas nécessaire d'avoir un modèle précis.

Le modèle bond graph qualitatif peut être élaboré sans prendre en considération les paramètres du système, les effets des erreurs paramétriques peuvent alors être complètement évités.

Un processus d'inférence a été développé en se basant sur un raisonnement qualitatif pour analyser les relations entre la constitution du système et son comportement représenté par son modèle bond graph afin de localiser les défaillances du procédé. Les premiers travaux de recherches sur les bond graphs qualitatifs utilisés pour la surveillance ont été menés par Linkens [122], [123] dont une implémentation informatique a été réalisée au niveau du logiciel Symbols [97], [116]. Les bond graphs qualitatifs utilisent des valeurs qualitatives (à la place des valeurs numériques) représentées par l'ensemble $\{[1], [+], [0], [-], [-1], [?]\}$ décrivant la qualité de l'écart entre les valeurs des mesures obtenues et leurs valeurs en fonctionnement normal [124]. On détermine les causes des défaillances survenues au niveau du système par la résolution d'un ensemble d'équations qualitatives.

Une méthode de surveillance utilisant les graphes causaux temporels issus des bonds graph causaux est appliquée dans [125] afin d'isoler les fautes en considérant leurs

dynamiques ainsi que leurs ordres d'occurrence. Dans d'autres travaux on repose sur une analyse qualitative des équations d'état linéaires [126] dans le but de déterminer les causes potentielles d'une défaillance en vérifiant la cohérence fonctionnelle du système avec le modèle.

Le principal avantage des méthodes qualitatives réside dans la possibilité de s'en passer d'une connaissance profonde de la structure du système et des valeurs numériques de ses paramètres ; un modèle bond graph qualitatif est suffisant. Cependant, ces méthodes ne peuvent s'appliquer qu'aux bond graphs linéaires ce qui n'est pas le cas de la plupart des processus réels. S'ajoute à cette limite la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de spécifier les seuils inférieurs et supérieurs des déviations. Ces méthodes deviennent complexes pour les processus multi-énergies. En effet, Un autre problème combinatoire peut survenir lors du processus d'inférences pour les systèmes complexes. On peut citer en guise d'illustration, l'exemple du réservoir utilisé dans [124] où un raisonnement qualitatif complexe a été suivi afin d'assurer la surveillance d'un simple réservoir (Fig.2.2). Ceci peut être assuré plus facilement en utilisant la redondance analytique basée sur le modèle bond graph.

Le résidu est obtenu à partir de la relation de conservation d'énergie au niveau de la jonction « 0 » en remplaçant les variables inconnues (le flux d'entrée et la variable d'état : la pression) par leurs mesures (la valeur du capteur d'effort De_2 et la source de flux Sf_1) :

$$r_1 = Sf_1 - R \cdot De_2 - C\dot{De}_2$$

Le vecteur de signatures des fautes, $V = [Sf_1 \ De_2 \ R \ C]^T$, indique la sensibilité du résidu au défaut de la vanne R , de la source de flux Sf_1 , du capteur De_2 et de la capacité C .

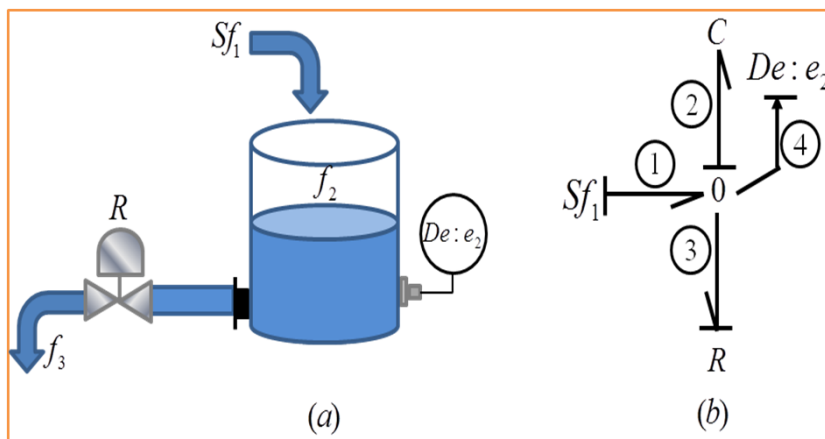


Fig.15.2. Exemple pédagogique de la surveillance à base de bond graph qualitatif

Une méthode qualitative à base d'évènements a été développée dans [127] pour la surveillance de défauts multiples en exploitant la notion de décomposition de modèle. En effet, il a été montré que l'utilisation de la technique de décomposition de modèle des conflits possibles (PCs) peut améliorer considérablement la diagnosabilité des défauts

multiples dans un système. Cette technique permet de partitionner le modèle global d'un système en un ensemble de sous systèmes sur-déterminés minimaux en se basant sur l'ensemble des mesures et des composants défectueux. Chaque PC se déclenche lorsqu'un défaut affecte son sous système, les fautes sont alors découplées à partir des résidus issus des PCs, ce qui améliore grandement l'isolabilité des défauts multiples en réduisant la possibilité de masquage des fautes lorsque plusieurs défauts apparaissent. Les résultats expérimentaux sur un système de plusieurs réservoirs montrent l'efficacité des PCs par rapport au modèle global du système dans la surveillance des fautes multiples.

A travers cet article, il a été également montré que l'exploitation des résidus calculés à partir du modèle global et ceux issus des PCs améliore encore plus la diagnosabilité.

2.1.3.2 Approche quantitative du bond graph pour FDI

Cette approche repose sur l'utilisation des lois physiques, elle requiert une très bonne connaissance de la structure du système ainsi que les valeurs numériques de ses paramètres ; son principe consiste à comparer le fonctionnement normal du système à celui du modèle numérique. Les modèles utilisés auparavant étaient souvent sous formes de fonctions de transfert, d'équations d'état, ... résultants de l'application des lois physiques (lois des premiers principes) [119], [120] ou en se basant sur une identification statistique des paramètres [121], [24]. Depuis 1995, le modèle bond graph quantitatif est utilisé directement pour la conception du système de surveillance. Les premiers travaux ont été entrepris avec la thèse de M. Tagina [107], ils se basent principalement sur l'analyse des propriétés causales et structurelles du modèle [98].

Le bond graph est un mécanisme de modélisation très intéressant car il permet de représenter à la fois la structure et le comportement du processus considéré. Il est utilisé pour générer d'une manière générique des indicateurs de défauts (appelés aussi Relations de Redondance Analytique : RRA) et analyser les conditions de surveillabilité des actionneurs directement à partir du bond graph. Les travaux qui existaient auparavant dans la littérature sur l'analyse structurelle des processus reposaient sur une modélisation bond graph mono-énergie qui décrit les systèmes physiques asservis par une seule énergie à la fois (souvent mécanique ou électrique). Cependant, dans plusieurs industries chimiques et pétrochimiques souvent à risques, les processus à surveiller sont thermo-fluides représentés par des pseudo-bond graphs multi-énergies, l'exploitation des approches développées pour le cas mono-énergie n'est plus possible. Ceci revient à la non linéarité des modèles bond graphs décrivant ces processus et au fait qu'ils sont multiports. Parmi les travaux traitant la modélisation par bond graph, qui ont fait l'objet de publications et d'applications industrielles, nous pouvons citer ceux présentés dans [128], [129]. Dans [2], une nouvelle approche intégrée pour la supervision des processus en génie des procédés a été présentée, où seul le bond graph est utilisé pour la modélisation, la génération des indicateurs de défaillances, l'analyse de la surveillabilité et le placement de capteurs en vue de satisfaire le cahier des charges de la surveillance. Dans ce travail, trois

principales méthodes ont été développées pour la génération des RRAs. La première méthode a été employée pour la construction de RRAs sous forme de relations analytiques symboliques, à partir d'un modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle. La seconde méthode a été développée pour contourner le problème du non applicabilité de la première méthode en présence de boucles (algébriques ou différentielles) et/ou de relations non inversibles, elle génère des résidus sous forme numérique. Pour cela, le modèle bond graph initial a été modifié de façon à obtenir un modèle dit Bond Graph de Surveillance (BGDg). La méthode du BGDg a été étendue dans la troisième méthode pour la génération de résidus dépourvus de toutes formes intégrale ou singulière.

Le travail présenté dans [13] concerne également la surveillance des systèmes de génie des procédés, où les études réalisées à l'aide de l'outil bond graph mono-énergie ont été étendues aux modèles thermofluides (bond graphs multi-énergies non linéaires), une méthode générique et algorithmique de génération d'indicateurs de défauts a été développée où les RRAs générées sont sous forme symbolique prêtes à être intégrées dans des systèmes de supervision. Afin d'exploiter les propriétés structurelles déduites du bond

graph linéaire (commandabilité, observabilité, surveillabilité), une extension des méthodes de linéarisation des bond graphs multiports mono-énergies aux bond graphs couplés a été réalisée. Ceci en linéarisant les composants du bond graph non linéaire et en connectant chaque composant pour obtenir le modèle linéarisé global. Ces études ont été également appliquées au site de génération de vapeur pilote du LAGIS.

Le bond graph a été utilisé dans [130] pour la modélisation du réacteur nucléaire (PWR) avec eau pressurisée standard, la génération des indicateurs de défaillances (résidus) permettant de détecter les défauts, l'analyse de la surveillabilité et le placement des capteurs afin de satisfaire les spécifications techniques pour la surveillance. La structure finale du système surveillable peut être déterminée à partir des variables binaires introduites au niveau des relations de jonctions pour permettre d'essayer les différentes possibilités de placements de capteurs, en essayant les combinaisons des valeurs pouvant être prises par les variables binaires, afin de choisir les meilleurs placements en termes de surveillabilité des composants spécifiés dans le cahier des charges. Les limites de l'approche proposée se situent dans le besoin de considérer toutes les combinaisons possibles des valeurs des variables binaires, ce qui devient très difficile lorsque le système considéré est complexe, tel qu'un réacteur nucléaire à eau pressurisée de différentes formes, avec diverses échelles de non-linéarités et de temps. La seconde limite consiste en la nécessité de générer la table de signatures à chaque combinaison ce qui peut causer une importante perte de temps surtout lorsqu'il s'agit d'un grand processus, qui nécessite plusieurs capteurs, pouvant avoir différentes combinaisons de positions.

L'intérêt d'utilisation d'une telle approche en comparaison aux approches à base d'observateurs réside d'abord dans la facilité de compréhension des RRAs vu qu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont mises en évidence par le modèle

bond graph représentant le processus physique. Ces relations sont obtenues directement de la représentation graphique, elles peuvent être engendrées sous une forme symbolique et donc conviennent parfaitement à une implémentation informatique [108].

2.1.3.2.1 Génération de RRAs à partir de modèles BGs

Dans le cas linéaire, il est possible d'obtenir certaines relations à partir de la représentation vectorielle d'un modèle bond graph qui peuvent être énoncées comme suit :

$$\begin{aligned} D_{out} &= L \cdot D_{in} \\ Z_i &= H(1/s) \cdot \dot{x}_i \\ Z_d &= H'(s) \cdot \dot{x}_d \end{aligned} \quad (2.1)$$

L , $H'(s)$ et $H(1/s)$ sont des matrices carrées, s et $1/s$ sont les opérateurs de Laplace pour la dérivation et l'intégration par rapport au temps. Le vecteur \dot{x} dans cette représentation doit être vu comme un vecteur contenant des variables d'effort et de flux et non la dérivée temporelle du vecteur x [108]. Ces matrices sont diagonales et inversibles dans le cas d'éléments 1-port, et elles ne sont pas diagonales et souvent non inversibles lorsqu'il ya des éléments multiports dans le système.

Une nouvelle matrice M est définie à partir de la matrice de structure de jonction S et les lois d'entrées-sorties de tous les composants. Cette matrice représente alors un modèle polynomial du système. On distingue trois méthodes pour générer les RRAs à partir du bond graph.

a. Méthode par substitution

La matrice M est décomposée en deux sous matrices M_C et M_W correspondantes aux variables connues C et inconnues W , respectivement. On obtient alors l'équation suivante : $M_C \cdot C + M_W \cdot W = 0$. L'approche par substitution consiste à déduire une sous matrice M_{W_i} inversible (le reste de la matrice est noté M_{W_r}) et de l'utiliser pour déterminer l'ensemble des variables inconnues. Un ensemble de relations de redondance analytique est alors obtenu à partir des lignes restantes :

$$\left[-M_{W_r}(M_{W_i})^{-1}M_{C_i} + M_{C_r} \right] \cdot C = 0 \quad (2.2)$$

Le choix de la sous matrice M_{W_i} n'est pas unique et amène chaque fois à une forme distinctive des relations de redondance.

Cette méthode devient plus complexe dans le cas non linéaire (il y a des contraintes sur la définition d'une variable à partir d'une fonction dû à la non linéarité des composants [58]). En fait, la causalité des composants non linéaires est déterminée par la fonction définissant le comportement du composant

b. Méthode par projection

Depuis la matrice M , on cherche une matrice polynomiale N telle que $N \cdot M_w = 0$. On peut alors générer n_s relations de redondance indépendantes définies par : $N \cdot M_c \cdot C = 0$. Il n'y a pas une solution unique puisque toute matrice résultante d'une combinaison linéaire des lignes de N résout l'équation. La démonstration de ce résultat a été présentée dans [131] en utilisant une approche par espace d'état. Dans le cas non linéaire, ce produit est représenté par $N \circ M_w = 0$ (ou \circ est l'opérateur de composition) qui est difficile à effectuer.

Le problème de recherche d'une matrice polynomiale N orthogonale à une matrice M_w a été traité dans [132], et l'approche proposée pour construire N se basait sur un algorithme itératif ce qui n'est pas le cas de l'approche à base de bond graph, qui permet d'obtenir directement la matrice de projection en exploitant la forme particulière du modèle mathématique relatif à un bond graph ; il est possible ainsi de sélectionner une

sous matrice de façon à optimiser des critères liés à la qualité de la procédure de surveillance : des propriétés directionnelles [133], des propriétés de robustesse [134], des propriétés de sensibilité [135]. L'expression de la matrice de transfert est un cas particulier de la méthode de projection. L'approche par substitution est un cas particulier de l'approche par projection [136].

c. Génération des RRAs par parcours des chemins causaux

Une des démarches pour engendrer des RRAs à partir du modèle bond graph linéaire mono-énergie se base sur le parcours des chemins causaux [107]. Plusieurs relations entre les différents flux et effort peuvent être générées au niveau des structures de jonction. En exprimant les variables inconnues présentes dans ces relations en fonction des variables connues, on obtient des relations de redondance analytique. L'objectif est d'étudier l'ensemble des chemins causaux à partir de chaque jonction jusqu'aux sources et aux capteurs. Cette approche s'avère intéressante car elle permet de générer un nombre de relations égal à celui des jonctions, sans avoir à calculer le déterminant du bond graph et les gains des différentes boucles causales. Cette méthode a été étendue dans [13] pour inclure les modèles couplés, elle a été ensuite développée et appliquée pour la conception en ligne des systèmes de supervision [137].

2.1.3.3 Surveillance des composants

Il existe deux approches permettant la détection et l'isolation des défauts pouvant affecter les composants d'un système linéaire modélisé par bond graph ; ces méthodes reposent sur l'estimation des paramètres.

Le principe consiste à exploiter la relation constitutive de chaque composant pour estimer la valeur du paramètre caractéristique de ce dernier, ceci peut être réalisé selon deux méthodes : La première (très difficile à réaliser en pratique) repose sur l'utilisation d'un support essentiellement matériel : Il s'agit de placer deux capteurs au niveau de chaque composant (l'un d'effort et l'autre de flux) et de comparer les valeurs mesurées à celles déduites des caractéristiques de ce composant. L'existence d'un écart indique la présence d'une défaillance au niveau du composant. Le point positif de cette méthode consiste en sa sûreté et la simplicité de sa mise en œuvre. Toutefois, elle est très lourde et très coûteuse.

La seconde méthode repose essentiellement sur un support logiciel : elle consiste à exploiter la notion de bond graph bicausal afin de déterminer les variables généralisées d'un composant en fonction des variables connues du système. Cette notion de bicausalité du bond graph permet d'utiliser le reste du modèle pour déterminer les valeurs des variables d'efforts et de flux de chaque composant sans avoir recours à sa caractéristique [138]. Lorsque le nombre d'équations dépasse celui des inconnues, le système est considéré comme étant sur-déterminé, la redondance d'information obtenue peut être exploitée pour la détection d'une défaillance probable. Parfois, pour éviter des boucles de causalité, qui engendrent des problèmes de parcours de chemins et de simulation, il faut regrouper des composants pour former un « macro-composant » ou une « impédance » composée [139], [140]. Une analyse préliminaire permet de savoir s'il faut utiliser le modèle tel qu'il est, ou bien le modifier.

Le problème qui se pose souvent dans un modèle bond graph est la causalité des composants pouvant conduire à des situations difficiles qui ne peuvent être résolues sans procéder à des calculs fastidieux, chose qui peut être évitée en regroupant les composants suspects.

Les méthodes de détection des défauts de composants qui se basent sur la notion de relation de redondance analytique et l'élaboration des signatures des différentes défaillances possibles sont actuellement complexes. En plus, seuls les défauts paramétriques (modifiant la valeur des paramètres) sont pris en compte.

Cependant, quelques travaux comme celui présenté dans [13] permettent de discerner les défaillances physiques de type « fuite de matière » ou d'énergie en se basant sur les RRAs obtenues à partir des équations de balance des jonctions «0».

2.1.3.3.1 Informatisation des étapes de l'analyse structurelle pour la surveillance par BG

Une des approches permettant la génération des RRAs à partir du modèle bond graph consiste à exploiter tous les chemins causaux en partant d'un nœud de jonction jusqu'à l'arrivée aux sources ou aux capteurs.

La complexité des processus physiques à surveiller a fait que l'automatisation des procédures d'analyse structurelle est devenue indispensable. Les propriétés structurelles et causales du modèle BG ont été exploitées pour générer automatiquement des RRAs. Dans [140] les procédures graphiques pour l'analyse structurelle de systèmes physiques modélisés par bond graph ont été présentées. Dans ce cas, deux problèmes ont été considérés lors de l'implémentation [139]:

- **Les problèmes relatifs aux boucles algébriques apparaissant lors de l'interruption d'un chemin causal au niveau d'une jonction contenant au moins deux éléments passifs et les problèmes relatifs aux relations implicites résultantes de la présence de boucles causales.**

Pour le premier type de problèmes, les éléments semblables sont remplacés par un seul élément équivalent dont la fonction est déterminée en appliquant la règle de Mason sur les bond graphs. Pour le second type de problèmes, l'existence de relations implicites est détectée par la modification de la matrice de structure du bond graph : l'existence de relations implicites entre deux variables du système dépend de l'existence de valeurs opposées disposées de façon symétrique dans la nouvelle matrice de structure à l'intersection des efforts et flux concernées. Cette approche est une extension de la méthode de parcours systématique des chemins causaux dans le but d'obtenir les informations nécessaires.

- **Les problèmes relatifs à la génération des RRAs à partir du bond graph, et qui résultent du type de signal provenant des capteurs. Ces problèmes ont été traités dans [139]. Un autre type de graphe (graphe causal) est obtenu à partir du modèle bond graph permettant la prise en considération des redondances d'information présentes au niveau des jonctions tout en rendant la procédure de calcul des RRAs plus directe et plus rapide.**

Le travail réalisé dans une seconde thèse [141] concerne la contribution à la résolution des problèmes combinatoires dans un bond graph par la théorie des matroïdes. Il participe ainsi à la résolution de certains problèmes associés à la procédure de génération des RRAs afin de faciliter son informatisation. Ce travail résout le problème combinatoire lié au calcul des chemins causaux, en améliorant l'outil d'analyse. Il exploite pour cela des techniques d'optimisation et la théorie de matroïdes (résultant de la combinaison de la théorie des graphes et de l'algèbre linéaire).

De nouveaux travaux ont été réalisés ces dernières années au niveau de l'opération transversale « BG et surveillance » concernant la génération des RRAs et l'élaboration des systèmes de supervision en utilisant l'outil BG. Un outil logiciel « Model Builder » a été développé, il a été testé sur des procédés chimiques et pétrochimiques dans le cadre du projet Européen CHEM [137], [142]. D'autres travaux visent à améliorer les procédures de surveillance à base de modèle bond graph existantes, comme dans [143], où une méthodologie a été proposée pour contourner les problèmes de différentiation de l'information de position mesurée pour l'estimation de vitesse lorsque, la détection et l'isolation des fautes à base de modèle bond graph sont réalisées sur les systèmes mécatroniques en présence de bruits. En se basant sur l'approche bond graph, une reconstruction de l'information non mesurée a été réalisée par le biais d'un observateur Luenberger, cette estimation est utilisée pour la détection et l'isolation des fautes. Dans [144] par contre, une méthode de génération de la structure des résidus en évitant le processus de calcul des RRAs a été proposée. Cette méthode est inspirée des techniques de recherches opérationnelle, les règles heuristiques proposées permettent d'obtenir la structure des résidus directement lorsque la combinaison du placement des capteurs est connue. En effet, des transformations sont effectuées directement sur la combinaison du placement des capteurs afin de construire la table de signatures des défauts (seuls les défauts des éléments C et R ont été considérés). Dans ce travail, une nouvelle stratégie de placement de capteurs optimal pour la diagnosabilité a été développée, en utilisant les propriétés du chemin causal, ceci afin d'éviter l'exploration de toutes les combinaisons. L'illustration de cette méthodologie a été réalisée à travers un exemple pédagogique d'un système thermo-fluide à deux réservoirs, dont le modèle bond graph est simple.

2.2 Surveillance robuste des processus industriels par BG

2.2.1 Surveillance des systèmes incertains

Comme nous avons spécifié auparavant, l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des processus dépend principalement des algorithmes de détection et d'isolation des défauts (FDI). La qualité de ces algorithmes est accrue en réduisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection des défauts. La détérioration des performances des algorithmes FDI revient essentiellement à la connaissance imparfaite des valeurs des paramètres des modèles et à leurs évolutions aléatoires. De nombreux chercheurs se sont intéressés dans leurs travaux au développement de méthodes de surveillance robustes.

Nous rappelons que selon la connaissance dont nous disposons pour la représentation du

comportement des systèmes, nous pouvons distinguer deux types d'approches de surveillance, les approches qualitatives et celles quantitatives.

2.2.1.1 Approches qualitatives de surveillance robuste

La méthode qualitative consiste à construire différentes classes selon l'espace paramétrique. Chaque classe correspond à un mode de fonctionnement donné, ensuite de définir par apprentissage les relations qui lient les effets (observations des experts, mesures des capteurs et données statistiques) aux causes (défauts).

Cependant, la spécification de tous les modes de fonctionnement éventuels n'est en général pas réalisable, dû à la connaissance incomplète des valeurs paramétriques et de leurs variations aléatoires. Cette démarche a été le sujet de diverses publications, nous pouvons citer celle de J. L. De Miguel & al. (2005) [145] qui traitent la surveillance d'un moteur à courant continu en exploitant les réseaux de neurones flous. Quant à K. Hising-Chia & al. (2004) [146] et A. P. Rotshtein & al. (2005) [147], ils se servent des réseaux de neurones flous pour la modélisation des relations de causes à effets, et ils ont recours aux algorithmes génétiques pour un choix optimal des paramètres des réseaux de neurones. Dans le cas où les données statistiques stockées sur la conduite précédente du processus sont assez importantes, et suffisantes pour la définition des probabilités a priori d'apparition de chaque classe de fonctionnement, ils utilisent les lois de probabilités bayésiennes. Le principe des méthodes qualitatives repose alors sur la résolution d'un problème de reconnaissance de formes. Le problème dans la décision réside au niveau des frontières des classes de fonctionnement, ceci revient aux incertitudes paramétriques qui consistent dans ce genre d'approche en l'ambiguïté sur les observations des experts, les bruits de mesure, et les marges de confiance sur les probabilités calculées depuis les données statistiques précédentes. Il n'est donc pas possible d'affecter une observation se trouvant sur la frontière de deux classes à l'une d'elles.

Il y a de nombreuses approches permettant d'améliorer la décision sur les frontières des classes, comme l'approche bayésienne et les réseaux de neurones flous.

2.2.1.2 Approches quantitatives de surveillance robuste

Concernant les approches quantitatives, connues également par les méthodes à base de modèles, nous rappelons que son principe consiste d'abord à générer des relations de redondance analytique appelées également résidus ou indicateurs de défauts, qui représentent l'écart entre les données provenant du système réel et celles obtenues à partir du modèle de fonctionnement normal. Ces relations nous permettent d'identifier le mode de fonctionnement du processus, elles sont nulles en fonctionnement normal dans le cas où le modèle est idéal (absence d'incertitudes paramétriques et d'incertitudes de modélisation) et différentes de zéro en cas de défaillances. Or, ceci n'est jamais vérifié à

cause de la présence constante des incertitudes dans un modèle. Les travaux de recherche de ces dernières années se focalisent sur la considération des incertitudes dans l'évaluation des résidus, pour assurer de meilleures performances de surveillance pour les systèmes dont la complexité et les incertitudes ne cessent de s'accroître.

Le principe de la génération de résidus robustes par les méthodes quantitatives peut être résumé par le schéma de la Fig.2.3.

Parmi les travaux de recherche traitant la surveillance robuste aux incertitudes paramétriques en exploitant les méthodes quantitatives, on peut mentionner ceux réalisés par O. Adrot & al. (1999) [148]. Dans ce travail, les résidus sont construits en utilisant l'espace de parité ; ils sont obtenus avec des incertitudes paramétriques structurées et incluses dans un intervalle. L'évaluation de ces incertitudes est assurée par l'application de l'arithmétique des intervalles. La même procédure de génération des résidus a été suivie par Z. Han & al. (2002) [149], les incertitudes paramétriques contenues dans les résidus obtenus sont structurées et bornées par une norme et un test probabiliste " khi deux" pour les évaluer.

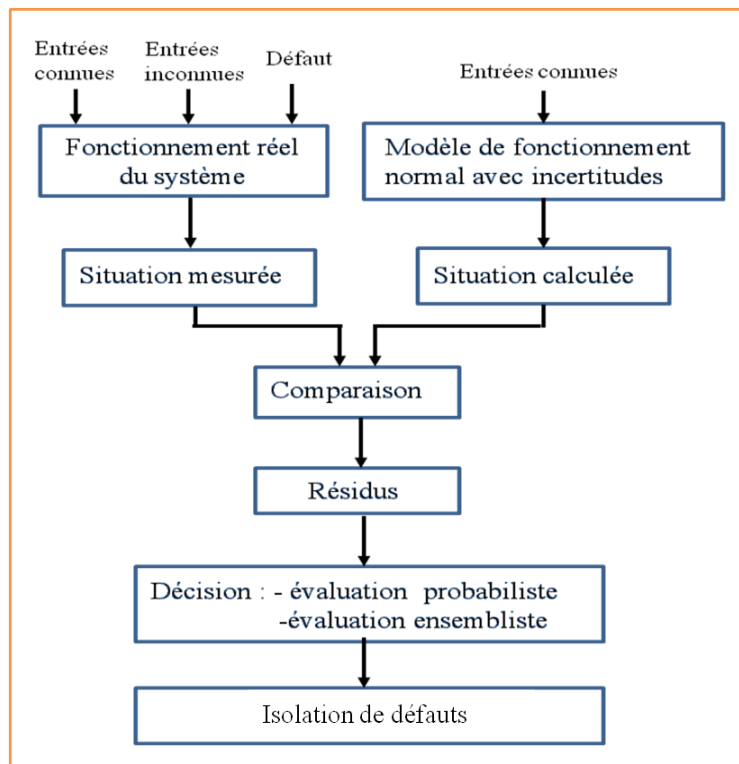


Fig.2.3. Principe de génération de résidus à base de modèle

Le travail de thèse présenté dans [150] consiste à utiliser une des méthodes à base d'intervalles appelée méthode à base des suites de bandes temporelles (SBTs) déjà validée sur les systèmes électroniques pour la conception d'un système de surveillance robuste

pour les systèmes en génie des procédés. Cette méthode permet de générer des résidus sous une forme canonique bien précise, tout en tenant compte des incertitudes des paramètres du modèle et des erreurs relatives et absolues des mesures. Ceci en considérant les paramètres et les mesures variant dans des intervalles qui définissent les valeurs minimales et maximales ainsi que les valeurs acceptables pouvant être prises par ces derniers. La méthode utilisée fournit un mécanisme de décision robuste en évitant le calcul des dérivées des entrées et des sorties souvent nécessaires dans les démarches habituelle de surveillance, et difficiles à évaluer. Ceci est réalisé par l'intégration successive des résidus ayant la forme canonique jusqu'à l'obtention d'équations sans aucune dérivée, la cohérence des résidus est ensuite vérifiée. Une application des algorithmes développés a été réalisée en ligne sur une installation pilote de génération de vapeur.

De nombreux travaux de recherches se sont intéressés également à la surveillance robuste aux incertitudes à base de méthodes de filtrage et d'observateurs, parmi lesquels on peut citer [151], [152], [153] qui proposent une forme spécifique d'observateurs à mode glissant, dont les paramètres peuvent être acquis en exploitant les techniques LMI. Ces approches sont très employées pour les systèmes linéaires pour supprimer l'effet des bruits de mesures et des perturbations hautes fréquences sur les résidus. Il est également intéressant d'utiliser ces approches dans le cas particulier où les incertitudes paramétriques ne sont pas de la même fréquence que les défauts survenus.

Une transformation non linéaire a été proposée par A. Zoghadri & al. (1996) [154] afin de découpler la partie nominale du modèle de sa partie incertaine, un banc d'observateurs est ensuite utilisé pour isoler les défauts. D. Henry & al. (2006) [155] ont proposé un modèle incertain sous forme LFT ; ils exploitent des méthodes de filtrages pour générer des résidus, qui remplissent les spécifications fixées en termes de stabilité du filtre, robustesse aux incertitudes et sensibilité aux défauts. Une étude de plusieurs méthodes probabilistes utilisées pour la surveillance robuste a été menée par M. Basseville (1998) [156], qui a réalisé également une comparaison entre les performances obtenues de ces approches.

La surveillance des défauts capteurs et actionneurs peut être bien assurée par l'espace de parité et les observateurs, cependant, les paramètres des RRAs engendrées n'ont aucune perception physique claire et ne peuvent pas être directement liés aux défauts sur les composants physiques. Dans les méthodes de filtrage, on suppose que les défauts agissent à une fréquence différente de celle des incertitudes, ceci est vrai pour les bruits de mesure qui sont des signaux haute fréquence, mais il ne l'est pas toujours pour les incertitudes paramétriques.

Afin d'avoir de meilleures performances, on peut combiner les avantages des deux approches précédentes, on parle dans ce cas de méthodes hybrides de surveillance. Parmi les auteurs utilisant ces méthodes, nous citons F. J. Garcia & al. (2000) [157] qui utilisent

la logique floue pour la génération des résidus et la redondance analytique pour l'isolation des défauts.

Dans cette section nous avons cité de façon non exhaustive quelques travaux sur la surveillance des systèmes incertains. Les méthodes quantitatives mentionnées reposent sur des modèles d'état linéaires, où il n'est pas possible d'associer les paramètres à des composants physiques ou à des phénomènes physiques précis. Quant aux modèles d'état non linéaires, il est difficile de les exploiter même en déterministe, que ce soit pour la commande ou pour la surveillance. Cependant, différents travaux de recherches ont été publiés ces dernières années abordant essentiellement la surveillance à base de modèles d'état non linéaires déterministes, nous pouvons citer ceux de L.Li & al. (2004) [158], M. A. Djeziri & al. (2007) [159] et X. G. Yan & al. (2007) [153].

Dans ce mémoire nous nous intéressons aux méthodes quantitatives de surveillance robuste des processus industriels et plus particulièrement à l'utilisation de modèles bond graph pour assurer la surveillance des systèmes physiques en prenant en considération l'ensemble des incertitudes paramétriques présentes à leur niveau. En effet, nous nous basons dans notre conception d'un système de supervision intégrée pour une station de production de vapeur sur les résultats fournis par Djeziri (2007) [160] concernant l'utilisation de BG sous la forme LFT pour la surveillance des processus incertains.

L'espace de parité et le filtrage sont des méthodes qui visent à supprimer l'influence des incertitudes paramétriques sur les résidus. Tandis que la méthode développée par Djeziri (2007) [160] dans son mémoire a pour objectif la génération de résidus incertains à partir de modèles BG-LFT, et l'évaluation de l'énergie amenée par ces incertitudes aux indicateurs de fautes, pour fixer les seuils adaptatifs de fonctionnement normal. Une méthode d'analyse de sensibilité aux incertitudes et aux défauts est également proposée pour rendre les performances de la surveillance encore meilleures.

Nous nous intéressons alors dans la suite de ce chapitre à la modélisation LFT des éléments bond graph après la présentation de l'intérêt d'utilisation des BGs pour la surveillance des systèmes incertains.

2.2.2 Intérêt des BGs pour la surveillance des systèmes incertains

Les systèmes industriels sont caractérisés par l'interaction de différents phénomènes physiques et plusieurs composants technologiques, raison pour laquelle l'outil bond graph reposant sur une analyse énergétique et multi physiques est bien adapté [102], [161]. L'outil BG permet grâce à sa structure graphique une analyse causale et structurelle directement sur le modèle. Ces propriétés ont été utilisées au début pour définir les conditions d'observabilité et de commandabilité des systèmes [162]. Dans les méthodes classiques de surveillance, on utilisait essentiellement des descriptions mathématiques

usuelles telles que les équations d'état, les fonctions de transfert, etc., tandis que les processus réels sont représentés par des schémas PID (Plan d'Instrumentations Détaillé) qui décrivent l'architecture d'instrumentation et les boucles de régulation. Le modèle bond graph est une image qui reflète ces PIDs.

Le développement d'un système de surveillance en partant des PIDs du processus, jusqu'à l'implémentation des algorithmes de surveillance en employant un seul outil (les bond graphs) a été mené par B. Ould Bouamama & al. (2005) [163]. Le parcours des chemins causaux sur le bond graph permet de déterminer l'origine des défauts, et d'engendrer des RRAs en éliminant les variables inconnues. Ceci en se basant sur les équations de conservation énergétique résultantes des jonctions 0 et 1, les indicateurs de défauts obtenus peuvent alors être automatiquement associés aux défauts système (fuites, blocages, jeux mécaniques, ...) auxquels ils sont sensibles. Grâce à cette propriété, il est possible de construire automatiquement des tables de signature des défauts et des matrices d'incidence [164].

La modélisation bond graph est une modélisation physique qui se base sur la représentation explicite des paramètres par les éléments de base du BG (résistance R, capacité C, induction et inertielle I, . . .), il est donc possible de modéliser les incertitudes présentes sur ces éléments. Parmi les travaux qui ont utilisé l'outil bond graph pour modéliser des incertitudes paramétriques, C. Sié Kam & al. (2001) [165], W. Borutzky & al. (2004) [166], et C. Sié Kam & al. (2005) [167] qui proposent deux possibilités pour modéliser ces incertitudes sur les éléments bond graph. La première consiste à représenter l'incertitude paramétrique comme un élément bond graph, et la seconde introduit la forme LFT.

2.2.3 Modélisation LFT des éléments bond graph [160]

Avant de décrire l'approche de surveillance robuste aux incertitudes des systèmes par BG, nous définissons d'abord la méthodologie de modélisation LFT (Linear Fractional Transformation) des incertitudes paramétriques sur les éléments BG. La première utilisation de cette forme de modélisation sur des modèles mathématiques fût par R. Redheffer (1960) [168], elle possède de multiples avantages en termes d'analyse structurelle et de surveillance des systèmes incertains et permet la modélisation de toutes les incertitudes. En plus de la facilité de son implémentation informatique.

La mise d'un modèle sous forme LFT exige que celui-ci respecte deux principales conditions : Il doit être *propre* et *observable* [169]. Ces propriétés peuvent être directement vérifiées sur le modèle bond graph par des manipulations causales.

Propriété 1 : Un modèle bond graph est propre si et seulement si tous les composants dynamiques qu'il contient sont en causalité intégrale (dérivée) lorsque il est en causalité intégrale (dérivée, respectivement) préférentielle [170].

Propriété 2: Un modèle bond graph est structurellement observable en état si et seulement si les points suivants sont vérifiés:

i) Sur le modèle bond graph en causalité intégrale, il existe un chemin causal entre tous les éléments dynamiques I et C en causalité intégrale et un détecteur De ou Df .

ii) Tous les éléments dynamiques I et C admettent une causalité dérivée sur le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle. Lorsque des éléments dynamiques I ou C ne peuvent pas être mis en causalité dérivée, la dualisation de détecteurs De et Df permet de les mettre en causalité dérivée [170].

Les systèmes linéaires à paramètres incertains ont été modélisés dans C . Sié Kam (2001) [169], pour plus de détails sur la modélisation des éléments BG incertains (R , I , C , TF et GY), il est possible de consulter les références correspondantes. Nous illustrons la méthode de modélisation des éléments BG incertains, en prenant l'exemple de l'élément physique R (la même procédure est appliquée pour tous les autres éléments BG) [41]. Les modèles BG déterministes de R en causalité résistance et conductance sont respectivement donnés par les Fig.2.4 (a) et (b).

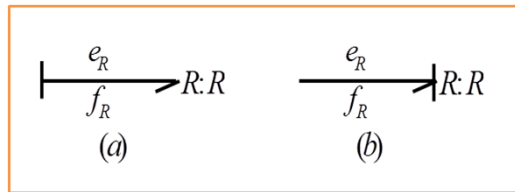


Fig.2.4 (a) Élément R déterministe en causalité résistance. (b) Élément R déterministe en causalité conductance

Après l'ajout de l'incertitude d'une façon multiplicative à l'élément R en causalité résistance on obtient la relation suivante:

$$e_R = R_n \cdot (1 + \delta_R) \cdot f_R = R_n \cdot f_R + \delta_R \cdot R_n \cdot f_R = e_n + \delta_R \cdot e_n = e_n + e_{inc} \quad (2.3)$$

Avec R_n la valeur nominale de l'élément R , δ_R l'incertitude multiplicative sur le paramètre. e_R et f_R sont l'effort et le flux dans le paramètre R , respectivement.

$e_n = R_n \cdot f_R$ et $e_{inc} = \delta_R \cdot R_n \cdot f_R$ sont l'effort fourni par le paramètre nominal et celui amené par l'incertitude multiplicative, respectivement.

L'effort apporté par une incertitude multiplicative (équation (2.3)) est une fonction de l'effort apporté par le paramètre nominal. Ce qui est d'un grand intérêt pour la procédure d'identification paramétrique et pour la surveillance.

L'insertion d'une incertitude multiplicative sur l'élément R en causalité conductance conduit à la forme:

$$f_R = \frac{1}{R_n} \cdot \left(1 + \delta_{\frac{1}{R}}\right) \cdot e_R = \frac{1}{R_n} \cdot e_R + \delta_{\frac{1}{R}} \cdot \frac{1}{R_n} \cdot e_R = f_n + \delta_{\frac{1}{R}} \cdot f_n = f_n + f_{inc} \quad (2.4)$$

Avec $\delta_{\frac{1}{R}} = \frac{-\Delta R}{R_n + \Delta R}$ l'incertitude multiplicative sur l'élément R en causalité conductance.

e_R et f_R sont l'effort et le flux dans le paramètre R en causalité conductance,

respectivement. $f_n = \frac{1}{R_n} \cdot e_R$ et $f_{inc} = \delta_{\frac{1}{R}} \cdot \frac{1}{R_n} \cdot e_R$ sont le flux fourni par le paramètre nominal et celui amené par l'incertitude multiplicative, respectivement.

Les modèles bond graph des Fig.2.5 (a) et (b) peuvent être obtenus à partir des équations (2.3) et (2.4) comme suit :

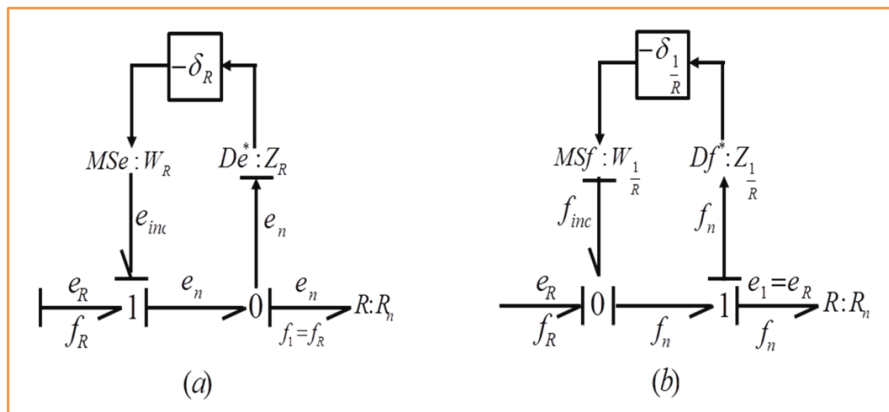


Fig.2.5 (a) Modèle BG-LFT d'un élément R en causalité résistance avec incertitude multiplicative. (b) Modèle BG-LFT d'un élément R en causalité conductance avec incertitude multiplicative

Les symboles De^* et Df^* sont utilisés pour montrer qu'il n'y a pas de détecteurs réels sur les sorties auxiliaires (capteurs virtuels), les détecteurs fictifs sont ajoutés pour expliquer le principe de la modélisation BG sous forme LFT.

Le passage d'un modèle BG déterministe à un modèle incertain sous forme LFT est alors assuré par l'insertion de sources modulées d'effort ou de flux au niveau des jonctions 1 ou 0, respectivement. Le modèle reste donc causalement correct et ses propriétés structurelles inchangées (commandabilité, observabilité,...). En plus, ces sources modulées sont causalement liées au reste du modèle, leurs apports énergétiques s'ajoutent alors au bilan énergétique au niveau des jonctions. Ceci rend cette forme standard la plus appropriée à la surveillance des systèmes à paramètres incertains.

Dans le but d'appliquer la procédure de surveillance détaillée dans [41], les composants dynamiques I et C doivent être mis en causalité dérivée préférentielle, pour éviter le

problème des conditions initiales généralement inconnues dans les équations obtenues à partir du modèle bond graph.

Afin de Construire le modèle BG-LFT complet d'un processus, on remplace chacun de ses éléments incertains par son modèle BG-LFT. Ce modèle est conçu plus facilement qu'un modèle d'état et reflète fidèlement le système réel.

L'espace paramétrique dans un modèle bond graph peut être divisé en deux ensembles : le premier est associé aux composants matériels fabriqués en série (résistances électriques, condensateurs, vannes, . . .). La valeur nominale du paramètre est dans ce cas fournie par le constructeur avec une incertitude bornée. Le deuxième ensemble est relatif aux phénomènes physiques, dont les valeurs nominales sont calculées ou identifiées expérimentalement.

La valeur nominale du paramètre et la valeur de l'incertitude sont déterminées suite à la phase d'identification, en employant une approche statistique [171] ou ensembliste [172].

2.2.4 Surveillance robuste par bond graph

Plusieurs auteurs se sont intéressés ces dernières années à la surveillance des systèmes incertains dans leurs travaux de recherches, nous pouvons citer, D. Henry & al. (2005) [155], M. A. Djeziri & al. (2007) [164], X. G. Yan & al. (2007) [153]. Ceci revient à la complexité et à la non stationnarité des systèmes physiques d'un côté et à l'exigence accrue des industriels en matière de sécurité et de rendement. Le modèle bond graph sous forme LFT permet grâce à sa structure énergétique et multi physiques, d'utiliser un seul outil pour la modélisation, l'analyse structurelle, la génération des RRAs incertaines et des seuils adaptatifs de fonctionnement normal, en plus de l'analyse de la sensibilité des résidus. En effet, les RRAs obtenues à partir du BG-LFT sont constituées de deux parties distinctes : une partie nominale, représentant le résidu, et une partie incertaine, servant à déterminer les seuils adaptatifs de fonctionnement normal et à l'analyse de la sensibilité. Les RRAs construites à partir d'un modèle bond graph sont obtenues en procédant à l'élimination des variables inconnues e_i et f_i contenues dans les contraintes de structure issues des équations aux jonctions 0 et 1, ceci en parcourant les chemins causaux de la variable connue à la variable inconnue. Ces variables sont déterminées à partir des contraintes de mesure, des contraintes de dérivation et des contraintes de comportement déduites du modèle bond graph. Les équations du bilan énergétique sur les jonctions représenteront les RRAs.

Les algorithmes de génération de RRAs robustes des systèmes modélisés par des BGs incertains sont analogues à ceux développés dans le cas déterministe.

2.2.4.1 Génération de résidus robustes

Le processus de construction des relations de redondance analytique robustes à partir d'un modèle bond graph commence par la mise sous forme LFT du modèle bond graph déterministe, ensuite la génération des RRAs à partir des équations aux jonctions. Chaque RRA obtenue aura l'expression symbolique suivante :

$$\sum b_i \cdot f_{i_n} + \sum Sf + \sum w_i = 0 \quad (2.5)$$

pour une jonction 0 et:

$$\sum b_i \cdot e_{i_n} + \sum Se + \sum w_i = 0 \quad (2.6)$$

pour une jonction 1.

Avec $\sum Sf$ la somme des sources de flux associées à la jonction 0, $\sum Se$ la somme des sources d'effort attachées à la jonction 1, et $b = \pm 1$ selon le sens de la demi-flèche (entrant ou sortant de la jonction). Les variables inconnues sont e_{i_n} et f_{i_n} .

Les variables inconnues sont calculées en parcourant les chemins causaux entre les détecteurs ou les sources et les variables inconnues. Une fois les variables inconnues éliminées, les RRAs incertaines auront la forme suivante:

$$RRA : \Phi(\sum Se, \sum Sf, De, Df, \tilde{De}, \tilde{Df}, \sum w_i, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n) = 0 \quad (2.7)$$

Où TF_n et GY_n sont respectivement les valeurs nominales des modules des éléments TF et GY. R_n, C_n, I_n et RS_n sont les valeurs nominales des éléments R, C, I et RS. $\sum w_i$ est la somme des entrées modulées relatives aux incertitudes sur les éléments raccordés à la jonction.

En effet, les incertitudes sont introduites au niveau des jonctions 1 ou 0, sous forme de sources d'effort ou de flux, respectivement. Leur apport énergétique s'ajoute alors au bilan énergétique au niveau des jonctions. Ces entrées fictives sont variables, leurs modules sont fonctions des mesures des détecteurs rattachés aux jonctions ou des entrées imposées au système (signaux de commande).

La RRA obtenue se compose de deux parties distinctes grâce à l'utilisation du modèle LFT, une partie nominale nommée r :

$$r = \Phi(\sum Se, \sum Sf, De, Df, \tilde{De}, \tilde{Df}, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n) \quad (2.8)$$

et une partie incertaine nommée $b = \sum w_i$ avec :

$$w_i = \Phi (De, Df, \tilde{D}e, \tilde{D}f, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n, \delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_{RS}, \delta_{TF}, \delta_{GY}) \quad (2.9)$$

Où $\delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_{RS}, \delta_{TF}, \delta_{GY}$ sont respectivement les valeurs des incertitudes multiplicatives sur les éléments R, I, C, RS, TF et GY . La partie incertaine de la RRA sera exploitée pour déterminer des seuils adaptatifs de fonctionnement normal [148], [149] sous forme d'une enveloppe qui inclut le résidu en absence de défauts. Ces seuils assurent la robustesse aux incertitudes et s'adaptent automatiquement aux changements des modes de fonctionnement.

Afin d'illustrer la méthodologie de génération de résidus robustes à partir d'un BG-LFT [41], on utilise l'exemple de la partie électrique d'un moteur à courant continu, représenté par le schéma de la Fig.2.6 (a), son modèle bond graph est donné par la Fig.2.6 (b).

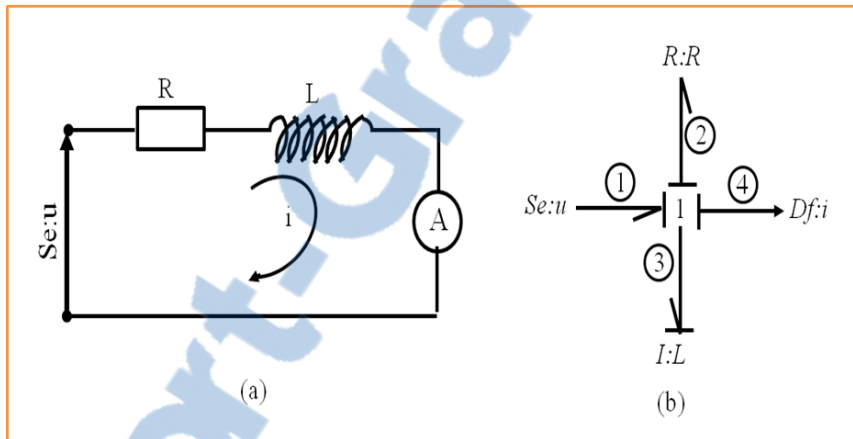


Fig.2.6 (a) Schéma de la partie électrique d'un moteur à courant continu. (b) Son modèle bond graph en causalité intégrale

Le modèle bond graph LFT du système en causalité dérivée est représenté en Fig.2.7, où les sources modulées décrivent les incertitudes sur les éléments $R : R$ et $I : L$, et sont définies comme suit :

$$w_R = -\delta_R \cdot z_R; z_R = R_n \cdot SSf \quad (2.10)$$

$$w_L = -\delta_L \cdot z_L; z_L = L_n \cdot \frac{dSSf}{dt} \quad (2.11)$$

Le bilan des puissances au niveau de la jonction 1 du modèle bond graph en causalité dérivée est donné par l'équation suivante:

$$\Phi_{j_1} : Se + w_R + w_L - e_2 - e_3 = 0 \quad (2.12)$$

Les variables Se, w_R, w_I sont des sources d'effort connues et les variables inconnues e_2 et e_3 sont déterminées en parcourant les chemins causaux désignés par des traits en pointillés sur le modèle bond graph de la fig.2.7 et qui sont donnés comme suit:

$$e_2 : SSf \rightarrow f_2 \rightarrow f_9 \rightarrow \Phi_{R_n}(f_9, e_9) \rightarrow e_9 \rightarrow e_2 = R_n \cdot SSf$$

$$e_3 : SSf \rightarrow f_3 \rightarrow f_{10} \rightarrow \Phi_{L_n}(\dot{f}_{10}, e_{10}) \rightarrow e_{10} \rightarrow e_3 = L_n \cdot \frac{dSSf}{dt}$$

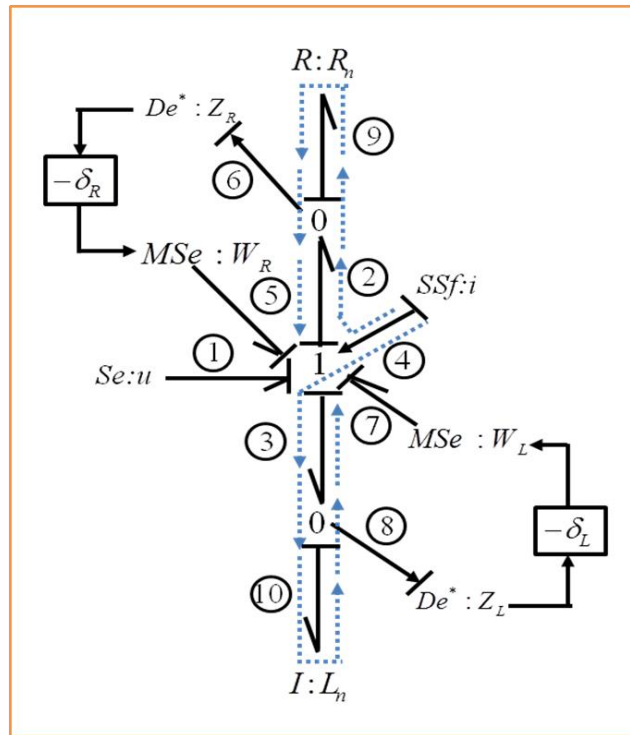


Fig.2.7 Modèle BG-LFT du système en causalité dérivée avec le capteur de flux dualisé

La RRA obtenue a la forme suivante :

$$RRA : u - R_n \cdot SSf - L_n \cdot \frac{dSSf}{dt} + w_R + w_I = 0 \quad (2.13)$$

Cette RRA se compose de deux parties distinctes, permettant de construire à la fois le résidu et ses seuils adaptatifs.

$$r = u - R_n \cdot SSf - L_n \cdot \frac{dSSf}{dt} \quad (2.14)$$

$$a = |w_R| + |w_L| = |\delta_R \cdot R_n \cdot SSf| + \left| \delta_L \cdot L_n \cdot \frac{dSSf}{dt} \right| \quad (2.15)$$

L'adaptabilité des seuils est assuré par le fait que les sources modulées $MSe:w_R$ et $Mse:w_L$ sont fonctions des mesures du détecteur dualisé $SSf:i$, qui sont elles mêmes

fonctions de l'entrée $Se : u$ imposée au système. L'exploitation des propriétés de la valeur absolue pour déterminer les seuils de fonctionnement normal garantit la robustesse de cet algorithme aux fausses alarmes.

À nos jours, la surveillance robuste constitue toujours un thème de recherche d'actualité. Le travail décrit dans [41] s'intéresse à la surveillance robuste des processus industriels représentés par des modèles BG incertains. Une procédure de génération automatique des indicateurs de fautes robustes à partir des modèles BG LFT a été développée, où la partie incertaine des RRA est utilisée pour générer les seuils adaptatifs des résidus pour le fonctionnement normal. L'utilisation de la forme LFT pour la modélisation des incertitudes paramétriques a permis de générer systématiquement les indicateurs de défauts incertains formels. Les performances de la surveillance sont contrôlées par une analyse de la sensibilité des résidus aux incertitudes et leur détectabilité aux défauts. Les résultats de recherches ont été validés par deux applications à des systèmes industriels de natures physiques différentes (un système électromécanique (JEF : Jeu d'Elasticité et de Frottement), et un système énergétique (GV : Générateur de Vapeur)). L'approche bond graph développée peut s'appliquer à des modèles non linéaires, à condition de faire apparaître explicitement l'incertitude paramétrique multiplicative dans les lois des composants. L'approche proposée a été implémentée informatiquement en utilisant le logiciel SYMBOLS2000, ceci en complément à l'application logicielle déjà développée pour le cas déterministe. Dans [173], la forme LFT est utilisée pour découpler la partie nominale de la RRA de la partie incertaine. Les seuils adaptatifs ainsi que les valeurs détectables des fautes sont calculés afin d'évaluer les résidus et d'améliorer la robustesse de la méthode de surveillance. L'analyse de la sensibilité des résidus est réalisée en utilisant la partie incertaine de la RRA, permettant ainsi de calculer les indices de détectabilité des fautes. Les résultats expérimentaux sont donnés pour soutenir le développement théorique. Le travail présenté dans [174] par exemple propose une méthode FDI permettant de générer des résidus et des seuils adaptatifs, en utilisant un modèle bond graph sous la forme LFT, afin d'améliorer les performances de la surveillance. Une méthode d'analyse de la sensibilité des résidus est également proposée pour l'estimation des valeurs détectables des défauts. La robustesse de l'algorithme FDI développé aux fausses alarmes a été montrée par la simulation et les résultats expérimentaux des tests effectués sur un banc d'essai mécatronique. Quant à la performance de l'algorithme contre les non détectations et les retards dans la détection des fautes, elle est contrôlée par l'estimation des valeurs détectables des défauts. La modélisation ainsi que l'approche à base de modèle bond graph pour la FDI robuste aux incertitudes paramétriques ont été appliquées en ligne sur un générateur de vapeur industriel.

En continuité au travail de Djeziri (2007) [41], des algorithmes de détection et de localisation de défauts robustes aux incertitudes paramétriques ont été développés dans [175] pour assurer la surveillance des réacteurs chimiques industriels en génie des

procédés. Ceci en se basant sur des modèles bond graphs non linéaires multi-énergies couplés (couplage de trois formes d'énergie : fluide, thermique et chimique) sous la forme LFT, afin de prendre en compte les incertitudes paramétriques des modèles. Un intérêt particulier a été alloué à la détection et à la localisation de défauts de nature chimique tels que les défauts dus à un emballement thermique de la réaction ou au déclenchement de certaines réactions secondaires.

Une stratégie de surveillance à base de modèle bond graph couplé a été adoptée dans [176] par le même auteur pour la détection et l'isolation des dérives thermodynamiques et cinétiques des réacteurs chimiques, qui reviennent à l'apparition des réactions secondaires. Des algorithmes FDI ont été conçus pour la surveillance en ligne des défauts affectant les capteurs, les actionneurs, et les composants et phénomènes physico-chimique, en exploitant les propriétés structurelles et causales du modèle bond graph, les indicateurs de fautes générés sont sensibles aux fautes chimiques telles que l'occurrence des réactions secondaires. L'approche présentée est utilisée pour la surveillance d'un réacteur chimique couplé à un échangeur de chaleur complexe.

La thématique de la surveillance robuste est abordée dans [177] dans une approche d'amélioration. En effet, dans ce travail, une nouvelle méthodologie d'estimation de défauts a été développée en se basant sur le modèle BG-LFT, et sur les propriétés structurelles et causales du bond graph. Elle permet de déduire d'une façon simple et systématique les équations mathématiques de l'estimation de faute ainsi que la relation entre cette faute et les résidus directement à partir du modèle graphique, en exploitant la notion de bi-causalité sur le modèle graphique. La méthode proposée a été appliquée et validée par des données expérimentales d'un système électromécanique. Son plus grand avantage réside dans la réduction du nombre de calculs nécessaires lors du traitement des informations issues de la surveillance.

L'article présenté dans [178] traite la surveillance robuste des défauts quantitatifs à base de modèle bond graph des systèmes hybrides avec des incertitudes structurées. La procédure proposée s'applique à des systèmes subissant des changements de modes discrets, des relations de redondance analytique globales ont été engendrées (GAARs) en utilisant le modèle bond graph hybride de la surveillance du système, la structure de ces relations change suivant le mode commuté. Dans le but d'assurer la détection et l'isolation des défauts, les résidus sont évalués à chaque instant à partir des GAARs, et leurs valeurs sont comparées à des seuils adaptatifs qui peuvent subir des modifications dû à un changement de mode ou d'états. En exploitant l'approche de transformation fractionnelle linéaire [41], le bond graph hybride de la surveillance (DHBG) intègre les incertitudes paramétriques et les seuils adaptatifs sont déterminés à partir du DHBG modifié. La robustesse des résidus est assurée par le maintien de leurs valeurs entre des seuils supérieurs et inférieurs pour toutes les perturbations, sauf l'apparition des défauts. Afin d'illustrer l'approche de surveillance robuste développée dans ce travail, une application a

été réalisée sur un système non linéaire thermo-fluide hybride dont le comportement combine entre des changements d'états continus et discrets. En faisant appel à la simulation, Il a été montré que l'utilisation de l'approche passive pour assurer la détection et l'isolation robustes des défauts est efficace, lorsque des incertitudes paramétriques sont présentes au niveau d'un système hybride soumis fréquemment à des changements de modes.

L'innovation apportée par a ce travail réside dans l'intégration du principe de surveillance à base de modèle pour les systèmes hybrides avec l'approche de génération des seuils résiduels robustes pour des systèmes ayant des incertitudes paramétriques.

2.3 Conclusion

Ce chapitre a traité la surveillance des systèmes industriels par l'approche bond graph. Après la présentation d'un bref état d'art sur les différentes utilisations possibles du modèle bond graph, nous avons insisté sur l'exploitation de ce modèle dans le domaine de la surveillance industrielle. Nous avons décrit les deux approches possibles d'utilisation du BG pour la surveillance; qualitative et quantitative, en insistant sur la dernière approche, et en particulier sur la génération des indicateurs de défauts (RRAs) par parcours des chemins causaux. La deuxième section de ce chapitre a été consacrée à la présentation de la surveillance robuste des processus industriels par BG, en décrivant d'abord, les deux approches possibles (qualitative et quantitative) pour assurer la surveillance des systèmes incertains. L'intérêt d'utilisation du BG pour surveiller ce type de systèmes a été ensuite présenté. La prise en considération de l'aspect robustesse aux incertitudes paramétriques dans les procédures de détection et de localisation, a été ensuite détaillée, en décrivant la modélisation BG-LFT, et les différentes étapes suivies pour la génération des résidus robustes à partir de ces modèles.

Chapitre 3

Modélisation des systèmes dynamiques hybrides

3.1 Introduction

La plupart des travaux de recherche qui traitent la dynamique des systèmes industriels en littérature considèrent l'un des deux aspects distincts : continu, et à événements discrets (SEDs). La modélisation et l'analyse de la dynamique continue, reposent principalement sur l'utilisation des équations différentielles, afin de bien saisir l'évolution continue des différentes variables. Tandis que pour les SEDs, la saisie de l'évolution discrète des variables est assurée par la notion d'évènement, cette dernière conditionne les transitions entre les différents états discrets du système modélisé.

Ces dernières années ont vu l'apparition d'un intérêt croissant pour le comportement dynamique des systèmes industriels, qui combinent les deux aspects cités précédemment, à savoir, le continu et le discret. Ces systèmes sont connus sous l'appellation de systèmes hybrides. Cet intérêt est motivé par des objectifs au niveau théorique et pratique.

La majorité des efforts de recherches ont été fournis dans la modélisation du comportement hybride et l'analyse des performances de ces systèmes. La commande de cette classe de systèmes a été également traitée dans certains des travaux de recherche.

Plusieurs méthodes ont été présentées dans la littérature, pour la modélisation des systèmes hybrides. Ainsi, différents formalismes ont été proposés pour la description du comportement hybride de ces systèmes dynamiques. Nous pouvons citer par exemple, les Réseaux de Pétri (RdP) hybrides [179], les statecharts hybrides [180], les bond graphs hybrides [181], etc. Toutefois, l'outil de base incontournable reste l'automate hybride [182], qui combine entre deux formalismes de base ; les équations différentielles pour la

représentation des systèmes continus ; et les automates à états finis pour la représentation des SEDs. Ce formalisme sera décrit en détails, par la suite.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les systèmes hybrides, classe de systèmes à laquelle appartient le procédé étudié dans ce mémoire. Étant donné que ces systèmes résultent de l'association entre les systèmes continus et les systèmes à événements discrets, nous présenterons en premiers ces deux systèmes, brièvement. Les systèmes hybrides seront présentés par la suite, suivis de la présentation des différentes méthodes pouvant être utilisées pour la représentation de ces systèmes. Notre choix se portera sur les automates hybrides vu que notre approche de supervision intégrera les bond-graphs pour l'aspect continu. Nous nous sommes basés principalement sur le travail présenté dans [183], pour l'élaboration de ce chapitre.

3.2 Les dynamiques des systèmes

Dans le but de satisfaire les exigences de plus en plus contraignantes des systèmes industriels: augmentation de la productivité dans une usine de fabrication, fluidité de la circulation dans un réseau urbain, fiabilité dans les mécanismes de contrôle/surveillance, ou encore disponibilité des systèmes de communication, commande des systèmes automatisés/robotisés, il a été indispensable d'élaborer des méthodes puissantes de modélisation et d'analyse [183].

Selon les objectifs qu'on se fixe et la nature physique du système, on peut avoir plusieurs représentations possibles du procédé. On peut se retrouver donc contraint à faire un choix entre ces différents modèles ; divers critères peuvent entrer en jeu pour choisir un modèle, tels que la facilité ou la rapidité de calculs, ou encore la précision de ces calculs [183].

Les systèmes industriels diffèrent en fonction de la dynamique qui gère leur fonctionnement. Cette dynamique dépend de la nature des variables d'état qui décrivent le système. Nous pouvons alors discerner trois classes de systèmes : les systèmes continus, les systèmes à événements discrets (SEDs) et les systèmes hybrides [184].

3.2.1 La dynamique continue

Cette dynamique caractérise les systèmes dont les variables représentant leur évolution dans le temps, qui est continu, prennent des valeurs réelles. Autrement dit, les variables d'état de ces systèmes évoluent d'une façon continue dans le temps. Un niveau, une température, une pression, un débit sont quelques exemples de ces variables.

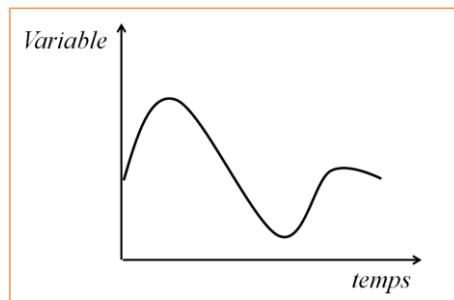


Fig.3.1. Comportement des variables d'état dans un système continu [185]

Les équations différentielles associées à différentes transformations (Laplace, Fourier...), ainsi que les représentations d'état sous forme matricielle (pour les systèmes linéaires), sont les outils mathématiques les plus utilisés pour modéliser les systèmes continus.

3.2.2 La dynamique discrète

Lorsque les variables d'un système évoluent dans un ensemble de valeurs discrètes tel que l'ensemble des entiers, par exemple, on parle d'un système discret. Mais lorsque le système peut être défini par un ensemble d'états distincts, et que le passage entre un état et un autre se fait à des instants discrets dans le temps, associés à des événements, tels que la fermeture d'une vanne, l'introduction d'un nouvel objet dans le process, ou encore l'apparition d'un défaut, on parle dans ce cas d'un Système à Evènements Discrets (SED) [186]. Les dates d'apparition de ces événements peuvent avoir une grande influence sur le comportement du système. De même que les instants de leur apparition peuvent avoir une nature planifiée ou aléatoire.

La modélisation des SEDs ne s'intéresse qu'aux débuts et aux fins des processus (représentant les événements discrets) et de leur séquence d'exécution logique, dynamique et temporelle. On peut trouver pas mal d'exemples de ce type de systèmes autour de nous, tels que la circulation des véhicules en réseau urbain; ou le fonctionnement des machines dans un atelier de production, de n'importe quel domaine industriel.

L'outil de modélisation classique pour un SED est l'automate à états finis.

Par exemple, si on considère une vanne pouvant avoir 4 états distincts : « en fermeture », « fermée », « en ouverture » et « ouverte ». Le chronogramme de Fig.3.1, représente l'évolution possible de ce simple SED.

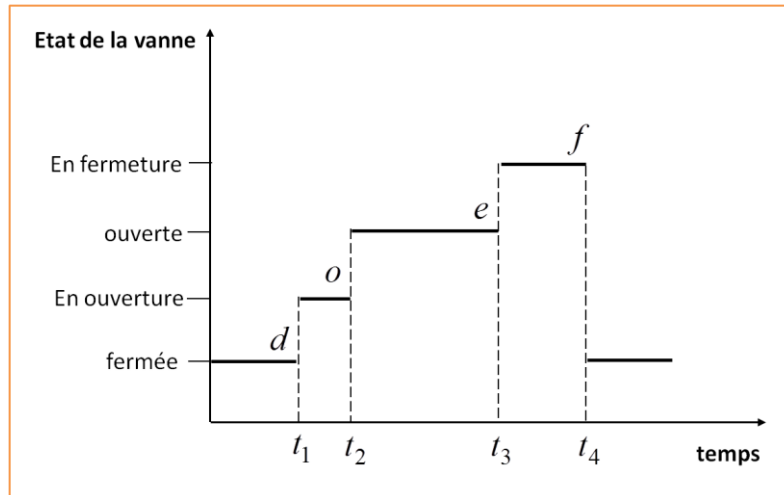


Fig.3.2. Chronogramme représentant l'évolution de l'état d'une vanne [183]

La vanne est supposée fermée initialement. Les évènements « début d'ouverture de la vanne (d) », « fin d'ouverture (o) », « début de fermeture (e) » et « fin de fermeture (f) », surviennent aux instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4 , respectivement. Cette chronologie des évènements représente l'évolution temporelle de l'état du SED. Les instants d'apparition des évènements ne sont pas fixes, ces derniers peuvent se produire à tout moment.

Par abus de langage, on peut ne pas faire de différence entre l'utilisation d'un évènement physique et le symbole qui le représente. Par exemple, on pourra dire que l'évènement e représente la transition entre l'état « ouverte » et l'état « en fermeture » [183].

Deux façons distinctes peuvent être utilisées pour décrire l'évolution d'un SED :

- L'utilisation d'un modèle temporisé, qui consiste à modéliser le système par un ensemble de couples (e, t) où e représente un évènement et t l'instant d'apparition de cet évènement. Si on reprend l'exemple de la vanne, on peut définir l'évolution de son état par les couples : (d, t_1), (o, t_2), (e, t_3), (f, t_4), ... Cette description est considérée comme temporelle, puisque l'importance est donnée aux instants d'occurrences des évènements.
- L'utilisation d'un modèle logique, où l'importance est accordée entièrement à l'ordre d'occurrence des évènements. Le temps est négligé dans ce cas, on parle alors de séquences d'évènements. Le fonctionnement de la vanne par exemple, peut être défini par la séquence des évènements : d, o, e, f, ... Les modèles logiques sont exploités pour l'étude des propriétés qualitatives des SEDs [183].

Parmi les modèles utilisés pour la représentation des SEDs, on peut citer :

- Les automates temporisés et les réseaux de Pétri temporels, faisant partie des modèles temporisés.
- Les automates à états finis et les réseaux de Pétri, faisant partie des modèles logiques [183].

3.2.3 La dynamique hybride

Les systèmes industriels sont généralement modélisés en considérant soit la dynamique continue (modèles continus), soit la dynamique discrète (modèles à événements discrets). Il est possible de choisir l'un ou l'autre de ces modèles, pour décrire un même système. Ceci dépendra des phénomènes auxquels on s'intéresse, du temps d'observation et des objectifs qu'on vise par la modélisation. Nous pouvons prendre l'exemple du réservoir représenté en Fig.3.3.

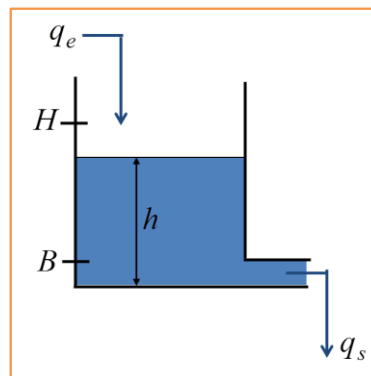


Fig.3.3. Exemple de réservoir [183]

Deux cas de figures peuvent se présenter :

- Si on s'intéresse à la modélisation de l'évolution du niveau d'eau dans le réservoir, on doit utiliser un modèle continu, qui peut être représenté par l'équation : $S \cdot \dot{h}(t) = q_e(t) - u(t) \cdot \alpha h(t)$, où $q_e(t)$ est le débit d'entrée, $h(t)$ est la hauteur d'eau, $u(t)$ est l'état de la vanne qui peut être 0 (fermée) ou 1 (ouverte), S est la section du réservoir et α est un paramètre.
- Par contre, si on s'intéresse seulement à la modélisation des deux états du système, à savoir le remplissage et le vidage, alors on doit utiliser un modèle SED, qui peut être représenté par un automate [183] (Fig.3.4).

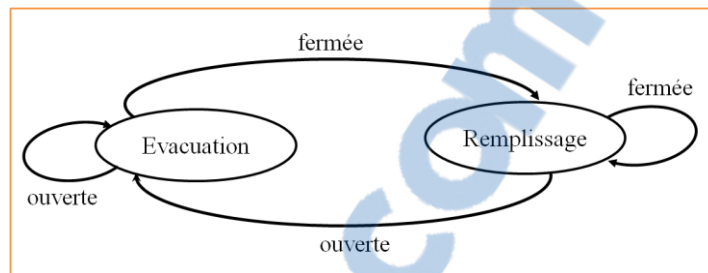


Fig.3.4. Modèle à événements discrets représentant le réservoir [183]

Dans certains systèmes, où les phénomènes sont liés, il devient très difficile de les mettre dans l'une des deux classes citées auparavant. Une nouvelle classe de modèles doit être considérée, afin de prendre en considération les deux types de variables d'état ; continues et discrètes. Il s'agit de la classe des modèles hybrides, qui permet de représenter les Systèmes Dynamiques Hybrides (SDHs).

Les SDHs sont des systèmes qui évoluent également dans le temps, et font intervenir des variables d'état continues, qui évoluent dans un ensemble continu (\mathbb{R}) ; et d'autres

discrètes, dont les valeurs appartiennent à un ensemble d'événements discret (\mathbb{N}) [184]. Ces deux types de variables, dépendent de la variable temps, qui peut être également continue ou discrète.

Ce 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 (Fig.3.5). Le système industriel hybride 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 [185].

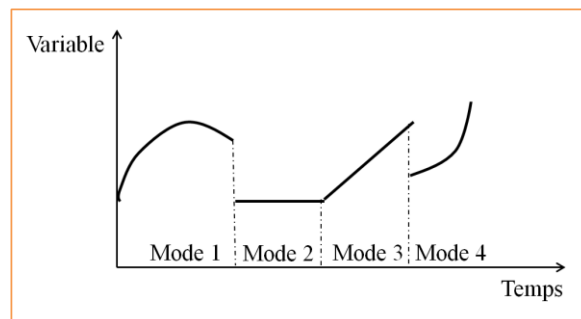


Fig.3.5. Comportement des variables dans un SDH [185]

En résumé, nous pouvons dire que le SDH inclut des dynamiques continues et événementielles, en interaction.

Nous avons opté pour l'automate hybride dans notre présent travail, il sera présenté plus en détails dans la section suivante.

3.3 Modélisation des systèmes hybrides

Nombreux sont les systèmes réels qui se composent d'un ensemble de sous systèmes continus régis par des mécanismes de commande/contrôle discrets, qui gèrent leur démarrage et leur arrêt. Les systèmes industriels rassemblent donc souvent les deux types de comportements discret et continu. Dans ces systèmes dynamiques hybrides (SDHs), il y a toujours une dynamique qui domine sur l'autre. Par conséquent, deux points de vue distincts peuvent être considérés : les systèmes hybrides sont donc considérés soit comme des systèmes continus avec des commutations discrètes, conduisant à un changement du comportement dynamique du système ; soit comme une extension des systèmes à événements discrets, avec des évolutions continues caractérisant chaque état du système.

Dans notre cas d'étude, l'aspect continu est représenté par l'évolution temporelle de la position de certains actionneurs tels que : le clapet de gaz, le volet d'air et leurs servomoteurs associés, ainsi que par l'évolution des temporisateurs dans certains modes de fonctionnement. La dynamique des relations de redondance analytique associées à chaque mode de fonctionnement est également continue.

Cependant, la gestion globale du fonctionnement du système industriel en situation normale et défectueuse repose principalement sur les valeurs de certaines variables discrètes. Ce type de variables constitue la majorité des variables présentes sur le procédé. Elles représentent les états de certains composants tels que les vannes (fermées ou ouvertes), les contacts dont les états (fermé ou ouvert) sont liés aux valeurs de certaines grandeurs, par exemple : niveau d'eau dans la chaudière, pression de gaz dans la rampe gaz, etc.

C'est en fonction de l'occurrence des événements relatifs aux changements de valeurs de ces variables, qui surviennent à des instants discrets dans le temps, que le procédé évolue d'un état à un autre.

Par conséquent, nous dirons que la dynamique de notre système de supervision s'approche plus de celle à événements discrets.

Nous allons présenter au préalable, quelques outils utilisés pour la modélisation des systèmes hybrides, en insistant sur les automates hybrides, modèles utilisés dans notre travail, afin de satisfaire les objectifs que nous nous sommes fixés auparavant.

Trois grandes classes d'approches de modélisation des SDHs peuvent être distinguées: l'approche continue, l'approche événementielle et l'approche mixte [187].

3.3.1 Approche de modélisation continue

Le principe de cette approche consiste à étendre les modèles continus pour prendre en considération les discontinuités présentes dans le système. Une approximation des dynamiques discrètes du système hybride est définie par des équations différentielles, afin de modéliser l'occurrence des événements discrets. Le principal objectif étant d'exploiter les théories et méthodes déjà développées dans le domaine du continu, ce qui facilite amplement l'étude des propriétés du système telles que la stabilité, la commandabilité ou l'observabilité.

De nombreux travaux de recherche se sont intéressés à la modélisation des systèmes hybrides par une approche continue. Ces travaux appartiennent à l'une des classes suivantes :

- Une classe qui définit un ensemble de transitions pour représenter l'évolution discrète du système hybride [188].
- Une classe qui se base sur l'introduction de variables supplémentaires dans les équations différentielles représentant le modèle continu, afin de considérer l'aspect discret du système hybride [189].

Le point fort de l'approche continue est le fait qu'on peut bénéficier des méthodes classiques développées pour les systèmes continus linéaires ou non linéaire, pour analyser les systèmes hybrides. Les principales limites de cette approche sont l'accroissement de la complexité des équations utilisées et la représentation de l'évolution discrète du système

qui doit considérer toutes les transitions possibles, et sélectionner celles qui ont un sens physique.

3.3.2 Approche de modélisation événementielle

Utiliser une approche entièrement discrète pour la modélisation des systèmes hybrides revient à faire abstraction des dynamiques continues ou à faire une approximation de l'évolution continue de sorte que le système hybride soit modélisé uniquement par les événements qui le décrivent. Le point fort de l'approche événementielle est de pouvoir exploiter la théorie classique des SEDs, pour l'étude d'un SDH.

Une méthode directe d'obtention d'un modèle événementiel temporisé à partir du système hybride a été proposée dans [190], elle se base sur la division de l'espace d'état continu en plusieurs régions, chacune associée à un état discret. Néanmoins, en appliquant cette méthode, il est difficile de trouver un compromis entre la précision et le nombre d'états discrets qui tend à croître exponentiellement.

3.3.3 Approche de modélisation mixte

Les approches qui se basent sur l'extension des modèles continus ou événementiels pour représenter les systèmes hybrides, ne permettent pas de représenter l'interaction entre la partie continue et la partie événementielle d'une manière explicite.

Dans une approche mixte, par contre, chaque partie ; continue et discrète, est représentée explicitement et avec précision, en considérant également leur interaction à travers l'interface qui les relie.

L'approche mixte considère que le fonctionnement d'un système hybride se fait en deux étapes :

- La première étape est une évolution temporelle des variables du modèle continu, pouvant déclencher certaines transitions.
- La deuxième étape est une évolution du modèle discret qui permet au système de passer à un nouvel état discret, et donc de déclencher l'évolution temporelle d'un nouveau sous système continu [185].

Dans cette approche, les modèles établis se basent sur la collaboration entre deux sous modèles :

- Le premier sous-modèle représente la partie événementielle. Il repose sur l'utilisation des automates à états finis, les réseaux de Pétri ou d'autres formalismes étendus de ces derniers.
- Le second sous-modèle représente la partie continue, en utilisant des équations d'état (voir Fig.3.9).

De cette façon, les deux aspects, continu et événementiel, sont représentés par des formes classiques et l'aspect hybride est explicitement modélisé. L'interaction entre les modèles continu et événementiel se fait de la manière suivante : l'aspect événementiel agit sur le modèle continu en validant certaines équations continues, selon l'état discret actif. L'aspect continu influe sur le modèle événementiel par la validation ou le forçage de certaines transitions.

De nouveaux modèles hybrides sont apparus en se basant sur cette approche mixte, tels que les bond graphs hybrides, issus des modèles continus, ou bien les réseaux de Pétri hybrides et les automates hybrides, résultant des modèles discrets, et les MLD (Mixed Logical Dynamical) obtenus à partir des modèles continus [191]. Ce dernier modèle repose sur le principe d'introduction de variables auxiliaires afin de représenter les relations qui existent entre la partie continue et celle discrète.

3.3.2.1 Modèles de l'approche mixte

Nous allons présenter dans ce qui suit, sans exhaustivité, quelques outils de modélisation des systèmes dynamiques hybrides, qui font partie de l'approche mixte. Nous avons mis l'accent en particulier sur les automates hybrides modèles pour lesquels nous avons opté dans notre approche de supervision.

Notre choix s'est porté sur ce formalisme pour les points forts qu'il représente. Parmi ces avantages, nous pouvons citer en premier la simplicité de son utilisation. De plus, aucune restriction n'est imposée sur la nature des variables ou la forme des contraintes utilisées, ce qui permet de représenter tous les phénomènes continus ou discrets que nous voulons considérer. Un autre point positif de ce formalisme consiste au fait qu'il permet une représentation explicite des dynamiques continues et discrètes, par des équations différentielles par exemple, et des modes ou des états discrets, respectivement. Les deux dynamiques sont donc clairement représentées sur le même graphe. Par ailleurs, ce modèle est bien adapté à la programmation des Automates Programmable Industriels (API), qui se basent sur le même principe général ; celui des étapes et des transitions, mais également de vérification des conditions permettant au système de demeurer dans un mode. Ce modèle permet aussi la vérification continue des conditions de franchissement des différentes transitions, pour l'activation des modes adéquats. Et enfin, pour la clarté du modèle.

3.3.2.1.1 Les réseaux de Pétri hybrides

Les réseaux de Pétri (RdP) [192] ont été utilisés pour la modélisation, l'analyse et la synthèse des systèmes à événements discrets. Une extension de ces modèles, appelée réseaux de Pétri hybrides a été proposée dans [193], afin de pouvoir traiter les SDHs.

Un RdP hybride est constitué de places et de transitions continues (C-places et C-transitions) et de places et de transitions discrètes (D-places et D-transitions). Le marquage d'une C-place est représenté par un nombre réel, et l'unité est appelée marque. Le marquage d'une D-place est représenté par un nombre entier et l'unité est appelée jeton.

On prend l'exemple d'un système de fabrication qui produit des pièces par lots de cinq, et on le modélise par un RdP hybride (Fig.3.4). Le cycle de fabrication est repris à la fin de la production de 2 lots de 5 pièces.

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

n'est pas vide. Dans le cas où P_2 est marqué, le passage d'une quantité $V_3 dt$ à travers T_3 provoquera le retrait de $V_3 dt$ marqués à P_2 et l'ajout de la même quantité à P_3 .

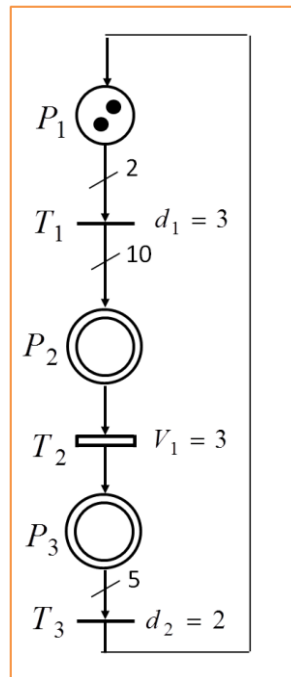


Fig.3.6. Modèle RdP hybride d'un système de fabrication par lots

Tous les avantages du modèle RdP de base peuvent être retrouvés dans un modèle RdP hybride, tels que la possibilité de représentation du parallélisme, de la synchronisation et des conflits [194].

Parmi les travaux qui se sont intéressés au développement d'approches à base de RdP pour la représentation et l'analyse des systèmes, on peut citer : le travail présenté dans [195] qui consiste à utiliser des modèles bond graphs pour la vérification de systèmes représentés par des RdPs hybrides. Une autre approche utilisant les RdPs a été présentée dans [196], il s'agit de « High-level Petri Nets », qui se caractérise par l'utilisation de jetons colorés dans la partie discrète du modèle.

3.3.2.1.2 Les bond graphs hybrides

C'est une représentation analogue à celle d'un bond graph usuel, qui se base sur l'aspect énergétique des procédés. Cependant, cette description graphique s'intéresse aux systèmes dynamiques avec des discontinuités, autrement dit, des systèmes dynamiques hybrides. En effet, ce formalisme permet la commutation instantanée de la structure de jonction, ce qui peut violer le principe de continuité de puissance [197].

Le bond graph classique est un outil de modélisation puissant, qui permet la description de la dynamique continue des systèmes physiques ; la structure de jonction dans ce graphe renforce les contraintes de conservation d'énergie et de continuité de puissance.

Afin de prendre en considération les changements discontinus dans le comportement du système, des éléments de commutation primitifs et des structures de contrôle sont introduits sur le formalisme du bond graph classique, permettant ainsi de représenter les changements discrets dans la configuration du modèle [198].

Ainsi, plusieurs modes de fonctionnement peuvent être distingués, où le modèle de chaque mode est généré en établissant ou en coupant les connexions d'énergie entre les ensembles des éléments BG au niveau des jonctions. De telles jonctions sont contrôlées localement en utilisant des valeurs de signaux prélevés sur le modèle bond graph. Une jonction contrôlée peut être soit « on » soit « off », ce qui correspond respectivement à la présence ou l'absence des connexions d'énergie associées à cette jonction [199].

Par conséquent, un système hybride est modélisé d'abord en représentant tous les composants et leurs connexions énergétiques par des modèles bond graph. En se basant sur un mécanisme de contrôle local, les jonctions sont ensuite identifiées comme étant actives ou pas. Une fois tous les mécanismes de contrôle sont définis, des modèles valides de chaque mode du système peuvent être générés dynamiquement à partir du modèle d'énergie global. Les composants du bond graph peuvent être mappés aux composants et mécanismes du système physique [199].

a) Définition formelle d'un bond graph hybride

L'approche de modélisation à base de bond graph hybride regroupe les bond graphs traditionnels qui représentent le formalisme continu et les automates à états finis qui représentent le formalisme discret. Ces deux formalismes interagissent à travers les jonctions contrôlées. Ces dernières sont associées à des indices dans le modèle BG, par exemple : 1_1 , 0_1 , pour les différencier des jonctions classiques et aussi pour faire référence à leur automate d'états finis correspondant [198]. Un exemple de système à deux réservoirs est présenté en Fig.3.5, son modèle BG hybride est présenté en Fig.3.6. Une jonction contrôlée se comporte comme un commutateur idéalisé. Une jonction 0 qui est déconnectée (off) impose un effort nul, une jonction 1 qui est désactivée (off) impose un flux nul. Lorsque ces jonctions sont activées (on) elles fonctionnent comme des jonctions ordinaires.

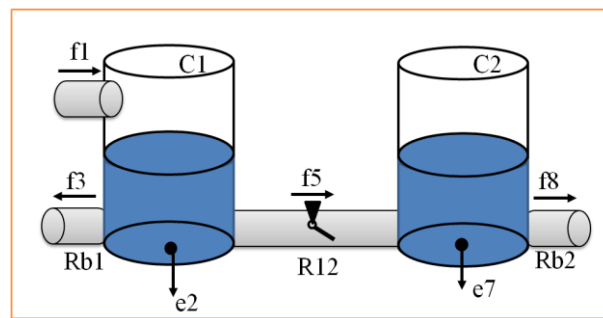


Fig.3.7. Commutation de modes dans un système à deux réservoirs par un clapet [198]

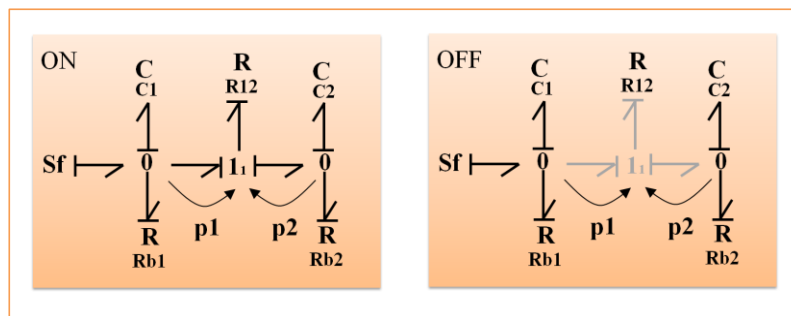


Fig.3.8. La jonction contrôlée établit un comportement de changement de mode [198]

3.3.2.1.3 Les automates hybrides

Ce formalisme est considéré comme une extension des automates à états finis [200], par des variables continues. Les automates hybrides sont constitués de deux sous-ensembles :

- Un sous-ensemble à comportement discret, représenté par un automate à états finis.
- Un sous-ensemble à comportement qui évolue d'une façon continue dans le temps, au niveau de chaque état discret. Cette dynamique est représentée par un système d'équations différentielles.

Un automate hybride évolue suivant une séquence de pas continus et discrets qui s'alternent. Les variables d'état et le temps évoluent dans le premier cas d'une façon continue, l'évolution dans le dernier cas est assurée par le franchissement d'une ou de plusieurs transitions discrètes. Nous commençons par l'introduction des automates à états finis, outil sur lequel se base l'automate hybride.

a) Les automates à états fini (AEF) [185]

Définition 3.1: un automate à états finis est un quadruplé $AEF = (Q, \Sigma, T, q_0)$ où :

- Q : est un ensemble fini de sommets, représentant les différents états du SED.
- Σ : est un ensemble fini d'évènements, qui déclenchent les transitions de l'automate.

- T : est l'ensemble des transitions entre sommets. Une transition $t_i \in T$ est définie par le triplet (q, σ, q') , où $q \in Q$ est un sommet origine, $\sigma \in \Sigma$ est un évènement et $q' \in Q$ est un sommet destination. Cette transition exprime le passage du système de l'état q vers l'état q' suite à l'occurrence de l'évènement σ .
- q_0 : est l'état initial de l'automate.

Nous pouvons considérer l'exemple d'un clapet qui peut avoir deux états (position O, ou position F). Désignons par a le passage de la position O à la position F, et par b le passage de la position F à la position O. Le clapet est supposé fermé (F) à l'état initial. L'automate représentant ce comportement évènementiel est illustré en Fig.3.7.

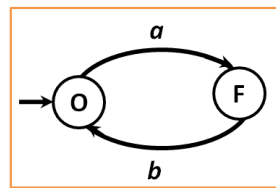


Fig.3.9. Automate à états finis d'un clapet

L'ensemble des séquences d'évènements pouvant être exécutées en parcourant l'AEF à partir de son état initial, définit le fonctionnement global du système.

b) Description d'un automate hybride

D'une façon générale, un automate hybride est vu comme un automate à états finis gérant un ensemble d'équations différentielles [201], qui modélisent l'aspect continu du système au niveau de chaque état discret.

Le modèle automate hybride est constitué d'un ensemble fini de variables, désigné par X , et d'un graphe orienté, désigné par la paire (S, T) , où S est l'ensemble des sommets du graphe, et T représente l'ensemble des transitions discrètes. L'automate change d'état instantanément lorsqu'un évènement discret se produit ou lorsqu'une condition logique relative à la valeur d'une variable continue est validée [202].

L'évolution des variables X_i de chaque sommet q_i d'un automate hybride, est définie sous la forme $\dot{X}_i = F_i(X_i)$, où F_i est une fonction d'évolution associée à chaque état. Un prédicat sur la valeur des variables continues nommé invariant est également associé à chaque sommet. Le système peut rester dans un sommet tant que l'invariant associé à ce dernier est satisfait. On attribue une condition de franchissement, nommée garde, à chaque transition de l'automate hybride. Une fois la transition franchie, une réinitialisation des valeurs des variables continues est effectuée [185] (Fig.3.8).

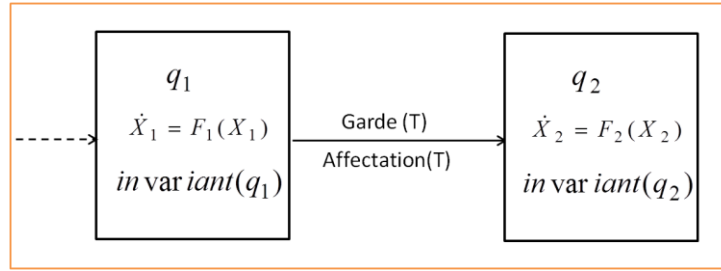


Fig.3.10. Automate hybride général [185]

Définition 3.2 : Un Automate Hybride (AH) est défini formellement [185] par un $A = (Q, X, \Sigma, T, F, inv)$ tel que :

- $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ est un ensemble fini de sommets,
- $X \in \mathbb{R}^n$ est un vecteur d'état constitué de n variables réelles,
- Σ est un ensemble fini d'évènements,
- T est un ensemble de transitions, où chaque transition t_i est un quintuple $(q, \sigma, g, \gamma, q')$ tel que :
 - $q \in Q$ est le sommet source,
 - $\sigma \in \Sigma$ est un évènement associé à la transition t_i ,
 - g est la garde de la transition t_i , c'est un prédicat sur X , sa validité permet le franchissement de la transition t_i .
 - γ est la fonction de réinitialisation qui attribue une valeur ou expression aux variables continues, une fois la transition t_i franchie.
 - $q' \in Q$ est le sommet but,
- F est une fonction qui affecte à chaque sommet q une fonction continue f_q qui décrit l'évolution dynamique du vecteur d'état dans le sommet,
- Inv est une fonction qui associe un prédicat $Inv(q)$ à chaque sommet q . Lors du séjour de l'automate dans le sommet q , les valeurs des variables continues de ce sommet doivent vérifier ce prédicat.

L'état d'un AH à un instant t donné est défini par la paire (q, v) tel que $q \in Q$ est un sommet discret et $v \in \mathbb{R}^n$ est la valeur du vecteur d'état à l'instant considéré. L'évolution du système à partir d'un état peut se faire de deux façons distinctes : soit par l'évolution du temps dans le sommet actuel, conduisant à un changement de l'état continu v selon la fonction d'évolution associée à ce sommet; soit par le franchissement d'une transition discrète, qui permet le passage à un nouveau état discret et la réinitialisation de certaines variables [185].

Le comportement global d'un automate hybride est décrit par ses exécutions possibles qui sont des séquences de délais et de transitions discrètes. Une exécution d'un AH est définie formellement comme suit :

Définition 3.3 : Une exécution φ est une séquence finie ou infinie ayant la forme suivante :

$$\varphi = (q_0, v_0) \xrightarrow{t_0, f_0} (q_1, v_1) \xrightarrow{t_1, f_1} (q_2, v_2) \xrightarrow{t_2, f_2} \dots (q_i, v_i) \xrightarrow{t_i, f_i} \dots$$

Tel que : le couple (q_i, v_i) représente un état de l'automate hybride, f_i définit la fonction d'évolution dans le sommet q_i , t_i le temps de séjour dans le sommet q_i . Cette séquence n'est valide que si les conditions suivantes sont vérifiées :

- $f_i(0) = v_i$
- $f_i(t)$ satisfait $Inv(q_i) \forall t \in [0, t_i]$
- $\forall i, \exists t' = (q_i, \sigma, g, \gamma, q_{i+1}) \in T$ tel que :

- $f_i(t_i)$ satisfait g ,
- $f_{i+1}(0) = \gamma(f_i(t_i))$

Afin de bien illustrer ces concepts théoriques, prenons l'exemple de l'automate [183] de Fig.3.9, qui modélise un système hybride où :

- Les équations différentielles associées aux sommets du graphe, représentent l'évolution continue.
- Les arcs étiquetés du graphe représentent l'évolution événementielle.

Les états discrets du système de l'exemple sont représentés par les sommets « Eteint » et « Allumé ». L'évolution continue est représentée par les équations à l'intérieur de chaque sommet. x est une horloge et y est une variable plus complexe.

Les conditions, appelées également gardes pour l'occurrence des événements « allumer » et « éteindre » sont représentées respectivement par les prédicats $x \in [2, 4]$ et $x \in [5, 10]$ sur les arcs.

Les prédicats $x \leq 4$ et $x \leq 10$ dans les sommets représentent les invariants de l'automate, c'est-à-dire, les contraintes à satisfaire par les variables continues du système pour le maintenir dans un des deux états discrets (« éteint » ou « allumé »).

L'état initial du système est représenté par l'arc d'entrée au sommet initial « Eteint ». L'étiquette de cet arc $x := [5, 10] \wedge y := 0$ définit l'espace continu à partir duquel la dynamique du système hybride démarre.

Les équations différentielles $\dot{x} = 1, \dot{y} = -4y$ et $\dot{x} = 1, \dot{y} = 3y + 2$ (\dot{x} et \dot{y} sont les dérivées du premier ordre par rapport au temps des variables x et y) représentent l'évolution des variables x et y dans les sommets « Eteint » et « Allumé », respectivement, et sont appelées conditions de flux.

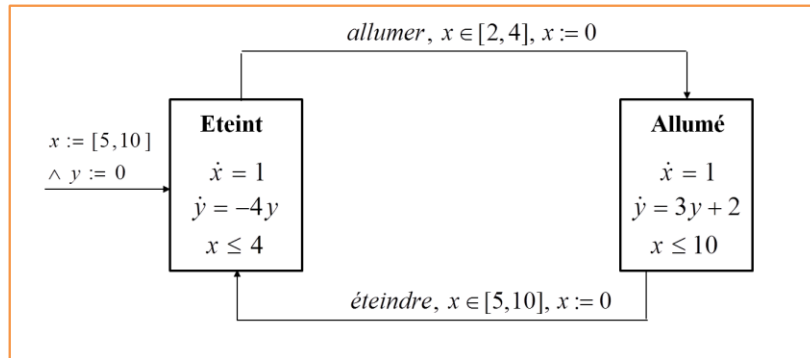


Fig.3.11. Un exemple d'automate hybride [183]

3.4 Conclusion

Les systèmes dynamiques hybrides sont nés de l'association des systèmes continus et des systèmes discrets. Ces dernières années, ont vu l'accroissement de l'intérêt porté à ce

type de systèmes; de nombreuses représentations ont été proposées dans la littérature, afin de prendre en considération l'interaction entre l'aspect continu et l'aspect discret.

Dans ce chapitre, nous avons défini en premier les systèmes continus, les systèmes à évènements discrets et les systèmes dynamiques hybrides, classe de systèmes à laquelle nous nous sommes intéressés dans ce travail.

Par la suite, nous avons présenté les principales méthodes de modélisation de ces systèmes hybrides, parmi lesquelles figure l'approche mixte. Cette dernière ne fait pas d'hypothèses sur le système à modéliser, elle permet donc de tenir compte des deux types de comportements ; continu et événementiel dans la même représentation, ce qui lui confère son caractère général.

Enfin, nous avons introduit quelques modèles de représentation faisant partie de l'approche mixte, en insistant particulièrement sur l'automate hybride, l'outil de modélisation que nous avons utilisé pour assurer la supervision d'un système dynamique hybride.

Chapitre 4

Supervision des systèmes industriels par l'approche Automates Hybrides et Bond Graphs

4.1 Introduction

Dans le but de présenter notre approche de supervision industrielle et afin de pouvoir bien situer notre travail, nous avons voulu que les deux premiers chapitres soient consacrés à la présentation d'un état d'art sur la supervision dans le domaine industriel. Vu que la plupart des travaux de recherches sur la supervision dans ce domaine consultés en littérature, traitent séparément ses deux principales fonctions : FDI et FTC, nous avons donc consacré les deux premiers chapitres à la présentation des différentes méthodes de surveillance et de tolérance aux fautes développées dans la littérature. Les chapitres précédents décrivent également les outils sur lesquels nous nous sommes basés pour le développement de notre approche, à savoir les Bond graphs (BGs) et les Automates Hybrides (AHs).

Le présent chapitre est donc réservé à la présentation et au développement de notre propre approche de supervision de systèmes industriels. Les systèmes auxquels nous nous sommes intéressés sont de nature dynamique hybride (SDH).

La méthode que nous proposons se base principalement sur la modélisation du comportement global du système par le biais des automates hybrides, ce formalisme nous permet de considérer les deux dynamiques continue et discrète du système.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes démarches suivies pour concevoir le système de supervision proposé sous forme d'une stratégie globale de reconfiguration basée sur une analyse Bond-graph du système. La composition de ce dernier ainsi que son

fonctionnement seront également décrits en détails. Une partie de ce chapitre est consacrée à l'application de la théorie développée sur un cas d'étude industriel ; il s'agit d'un processus de génération de vapeur, faisant partie d'une chaîne de fabrication du carton ondulé.

4.2 Contexte de l'approche

Tous les systèmes industriels de nos jours sont équipés de systèmes de supervision plus au moins sophistiqués selon la criticité, l'importance ainsi que l'ampleur du procédé à superviser, mais également selon le budget alloué à la réalisation de cette fonction.

La supervision en ligne est perçue dans le monde industriel pour la plupart comme deux opérations consécutives : acquisition des données et gestion des alarmes. En effet, la majorité des systèmes de supervision employés en industrie reposent dans leur principe de fonctionnement sur deux étapes fondamentales, qui consiste d'abord à collecter l'ensemble des signaux émanant des capteurs et des détecteurs au niveau du procédé à superviser, afin d'avoir une image en temps réel de l'état du système. Ces signaux sont ensuite analysés et vérifiés par rapport à des intervalles d'acceptation. En cas de non-conformité, des alarmes seront générées, indiquant ainsi la présence d'une anomalie. Le déclenchement d'une alarme est généralement accompagné d'un message qui s'affiche sur l'interface de supervision, désignant le composant défectueux avec plus au moins de précision, selon la criticité de l'élément en défaut et selon la sophistication du système de supervision utilisé.

L'ensemble des opérations effectuées depuis la collecte des informations jusqu'à la localisation de la défaillance définit la détection et l'isolation des défaillances telles qu'elles sont souvent pratiquées dans l'industrie avec ces différents secteurs.

L'exécution de ces deux tâches repose donc uniquement sur les informations recueillies à partir des capteurs, et dépend de ce fait entièrement de l'instrumentation présente au niveau du terrain. C'est le nombre de capteurs, leurs types, leurs qualités ainsi que leurs emplacements qui déterminent principalement la qualité du résultat.

Cette technique souvent utilisée dans les usines et les manufactures se résume en une surveillance permanente des signaux par rapport à des seuils minimaux ou maximaux, ou à des valeurs bien définies. Ceci limite considérablement les défaillances pouvant être détectées et isolées. De plus, il faut disposer de capteurs au niveau de tous les composants dont on veut surveiller l'état, ce qui n'est pas toujours évident.

L'application de cette technique nécessite également de supposer que les capteurs ne sont pas défectueux durant toute la période de fonctionnement et par conséquent les données qu'ils fournissent sont totalement fiables. Ceci n'est pas toujours vrai en réalité.

De plus, la précision de la localisation des défauts dépend fortement du nombre de capteurs disposés à fournir des signaux concernant l'état du composant défectueux, ce qui

oblige à accroître le nombre de capteurs pour tout composant dont on veut une localisation précise de sa défaillance. Ce qui constitue une autre limite des systèmes de supervision industriels actuels.

Une autre limite majeure de ces systèmes concerne la tolérance aux fautes, qui n'est prise en compte que pour les composants critiques. En effet, la tolérance aux fautes est assurée au niveau du procédé par la redondance de tous les composants jugés critiques. La dégradation est tolérée par défaut pour tous les autres cas de défaillances, ce qui risque de représenter un réel danger dans certains scénarios pour certaines installations particulières. Ceci est le cas de l'installation étudiée dans ce travail.

Des propositions de solutions peuvent être offertes à l'opérateur dans le cas où le système de supervision est doté d'un module d'aide à la décision. Cependant, ces suggestions restent pour la plupart vagues et générales. Ceci est dû parfois au manque de précision dans la localisation des composants défaillants.

En général, un ensemble de solutions potentielles peuvent être proposées, mais il reste à l'opérateur de les évaluer, et de prendre des décisions sur les actions à réaliser. Ceci doit être effectué le plus rapidement possible, ce qui n'est pas une tâche aisée. De plus, la contrainte de temps peut affecter l'efficacité des décisions prises.

Dans tous les cas, la décision finale sur les actions à entreprendre pour résoudre l'état de défaillance demeure de la responsabilité entière de l'opérateur, qui se base souvent sur son expérience pour le faire.

L'approche de supervision que nous proposons dans ce chapitre permet de pallier un bon nombre de ces inconvénients et d'affranchir de certaines limites.

4.3 Apport de notre approche

En proposant cette nouvelle approche de supervision, nous avons voulu apporter une amélioration à l'existant en matière de supervision des procédés industriels. La méthode de supervision proposée dans ce travail a donc plusieurs objectifs, que nous pouvons résumer dans les points suivants :

- Se délivrer de la dépendance totale des capteurs pour connaître l'état du système, ceci en représentant le procédé à superviser par un modèle Bond graph. Ce modèle nous permet de surveiller l'état du système en permanence et en temps réel, sans avoir à doter chaque composant que nous voulons surveiller d'un capteur.
- Obtenir plus de précision dans la localisation des défaillances en exploitant les

deux types de redondance (matérielle et analytique) présentes au niveau du modèle.

- Assurer une surveillance robuste aux incertitudes paramétriques, ce qui n'est pas pris en considération dans les systèmes de supervision industriels actuels.
- Permettre au système de supervision de tolérer les défaillances non critiques. En effet, par le biais de cette approche, nous offrons au procédé la possibilité de poursuivre son fonctionnement après l'apparition d'une défaillance, tout en restant le plus proche possible du fonctionnement nominal. Le but étant de limiter le plus possible les temps d'arrêts, sans qu'il y est le moindre risque sur la sécurité des personnes ou du procédé.
- S'offrir la possibilité de continuer à surveiller le procédé même après l'application d'une méthode de tolérance aux fautes.
- Offrir une aide à la décision plus ciblée, et donc plus efficace. Ce qui facilite énormément la tâche aux opérateurs dont la responsabilité est de décider des actions à entreprendre suite à l'apparition des défaillances.
- Permettre au système de supporter le mode dégradé, mais uniquement pour les composants non critiques et seulement lorsque la dégradation n'a pas dépasser un certain seuil d'acceptation. Le passage à ce mode est accepté dans certains cas particuliers, et seulement pour un temps restreint afin de permettre d'achever l'exécution d'une tâche prioritaire, ou pour faire gagner du temps aux agents de maintenance afin de réunir tous les éléments d'une intervention réussie.
- Augmenter la sécurité du procédé, en interdisant au système de supervision d'accepter la dégradation pour certaines défaillances, qui apparaissent à première vue sans danger.

Il est important de signaler que notre contribution consiste non pas, à remplacer le système actuel de supervision industrielle mais de le compléter, de l'améliorer de façon à ce qu'il réponde aux attentes des utilisateurs industriels en termes de supervision mais également en termes de gains de temps.

4.4 L'approche de supervision proposée

4.4.1 Description du principe

L'approche que nous proposons dans ce travail, repose sur l'utilisation d'un automate hybride (AH) pour assurer la supervision d'un procédé industriel. Cet automate nous

permettra de gérer le fonctionnement du procédé dans toutes les situations, y compris celles à défauts.

Des modèles BG-LFT sont utilisés pour assurer la surveillance du procédé au niveau de chaque mode de l'AH, en temps réel.

En fonctionnement normal, le passage entre les modes se fait dès que les conditions de transitions sont vérifiées.

En cas d'apparition d'un défaut, le procédé bascule vers l'un des modes prévus pour ces situations, lors de notre conception du système de supervision. Ceci dépendra du défaut.

Lorsqu'une faute est tolérée, la méthode de tolérance choisie est appliquée, automatiquement lorsqu'il y a une redondance du composant défaillant, et avec l'aide de l'opérateur dans les autres cas. Le système de supervision conçu nous permet de continuer à surveiller le procédé même suite à l'application d'une technique de tolérance aux fautes. Le principe du système de supervision développé est illustré ci-dessous (Fig.4.1).

D'un point de vue pratique, l'architecture d'un tel système de supervision consiste en trois parties comme montré en Fig.4.1. La génération hors ligne des indicateurs de défauts, notamment les Relations de Redondances Analytiques (RRAs), en tenant compte des incertitudes paramétriques, en utilisant BG-LFT.

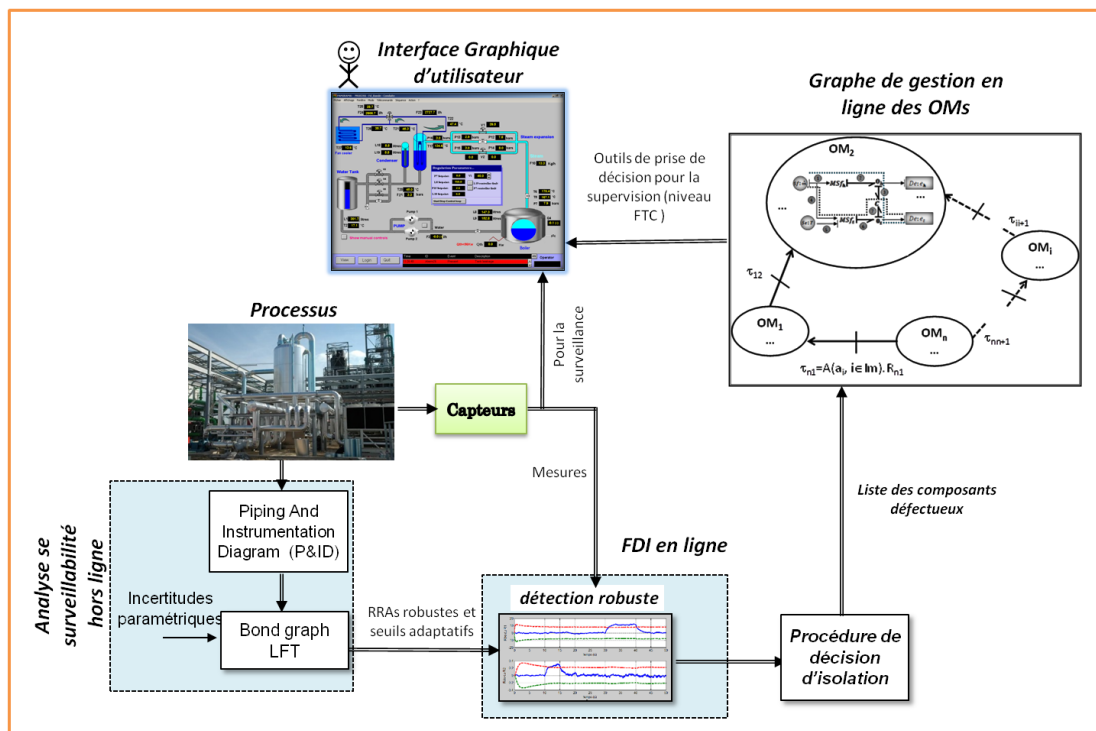


Fig.4.1. Méthodologie globale de supervision

Le graphe de gestion des modes de fonctionnements (OMs) est construit à partir des spécifications du système. Ensuite, les RRAs sont utilisées pour la détection et l'isolation robustes en ligne des composants défectueux [203].

À partir des défauts détectés, le graphe de gestion de fonctionnement est mis à jour, permettant la prise de décisions de recouvrement. Les informations de FDI et de FTC sont affichées à l'opérateur à travers l'interface graphique (GUI).

4.4.2 Composants du système de supervision proposé

Notre système de supervision se compose de deux modules: Un module FDI et un module de commande tolérante aux fautes FTC. Le premier assure les deux tâches de la surveillance à savoir la détection et la localisation des défauts et le second assure la commande du procédé considéré même en présence de défauts. En effet, ces deux modules sont complémentaires dans une architecture d'un système de supervision intégré et c'est à ce point précis que notre contribution se situe.

Le système de supervision que nous proposons dans ce mémoire se compose formellement de deux automates hybrides, l'un modélisant le comportement du processus étudié en fonctionnement normal et défectueux et l'autre fournit un modèle de base pour assurer la surveillance de ce même processus. Les deux automates notés A_1 et A_2 interagissent continuellement en s'échangeant des informations pertinentes et essentielles au bon fonctionnement du système de supervision. En effet, les données échangées assurent la cohérence du fonctionnement global de ce système et garantissent ainsi la consistance de la commande et du contrôle du procédé considéré dans tous les modes de fonctionnement y compris ceux à défauts.

Le schéma synoptique du système de supervision proposé est représenté dans Fig.4.2, où A_1 et A_2 représentent l'automate de contrôle/commande du processus en fonctionnement normal et à défauts, ou la commande tolérante aux fautes (FTC) et l'automate du module FDI, respectivement.

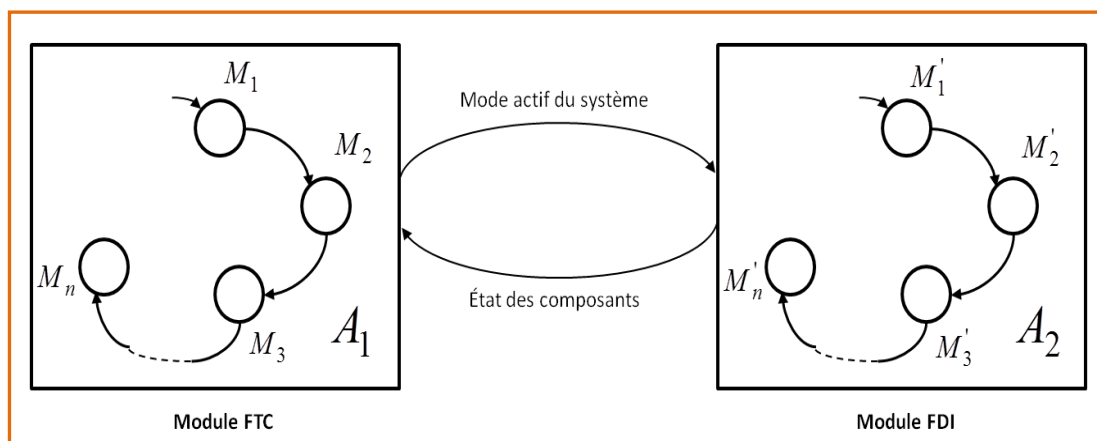


Fig.4.2. Schéma synoptique du système de supervision

Les deux modules communiquent d'une façon permanente afin d'assurer le bon

fonctionnement du système supervisé dans tous ses modes de fonctionnement normaux et à défauts. Le module de commande fournit au module FDI les informations nécessaires sur le mode actuellement actif dans le procédé pour qu'il y ait synchronisation du fonctionnement des deux modules. Par contre, le module FDI fournit au module FTC les informations relatives à l'état des différents composants actifs dans chaque mode ou lors du passage entre les modes c'est-à-dire durant les transitions. Chaque nœud de l'automate gérant les tâches de détection et de localisation des défauts peut représenter l'état des composants dans un mode donné ou lors d'une transition donnée ; les nœuds associés aux modes et ceux relatifs aux transitions entre ces modes sont en alternance.

4.4.3 Conception du système de supervision

Avant d'entamer la description du fonctionnement du système de supervision proposé, il sera plus judicieux de signaler qu'il y a deux principales phases dans le développement de ce dernier ; une phase hors ligne et une phase en ligne, chacune relève d'une grande importance. La qualité du système construit dépend donc étroitement de la qualité du travail réalisé dans chaque étape.

L'objectif de l'étape hors ligne consiste en l'étude théorique du processus à superviser pour pouvoir le modéliser en considérant les deux aspects de la supervision : surveillance et tolérance aux fautes. Le résultat de cette étape peut être résumé en l'obtention de deux modèles hybrides sous la forme d'automates hybrides, l'un représentant les possibilités de commande du procédé durant toute la période de son fonctionnement, ceci inclut évidemment tous ces modes de fonctionnement y compris ceux à défauts et l'autre représente les possibilités de détection et de localisation des défauts pouvant apparaître au niveau de n'importe quelle étape du fonctionnement, que ça soit un mode ou une transition.

Les composants concernés par la surveillance sont ceux spécifiés dans le cahier de charges de la surveillance, c'est-à-dire, les éléments jugés critiques et à surveiller.

La difficulté de la phase hors ligne réside dans la nécessité d'étudier de plus près le procédé à superviser et de décrire le plus précisément possible ses différentes étapes. Cela implique de citer de la manière la plus exhaustive possible ses modes de fonctionnement, ainsi que les conditions à vérifier à l'intérieur de chaque mode, et celles permettant le passage entre chaque mode et un autre. De plus, il est impératif de connaître l'ensemble des composants qui doivent être actifs ou activés dans chaque mode et à chaque transition afin de pouvoir les modéliser, dans un but de surveillance. En effet, chaque ensemble de ces composants est représenté par un modèle BG-LFT, permettant ainsi de générer un ensemble de relations de redondance analytique (RRAs) robustes aux incertitudes paramétriques. Ces dernières représentent les contraintes devant être satisfaites au niveau de chaque nœud de l'automate du module FDI.

À cette étape de la conception, nous devons alors disposer de la forme analytique des

RRAs pour tous les modes et les transitions de l'automate représentant le fonctionnement du procédé.

La méthode de tolérance aux fautes doit être bien spécifiée pour chaque type de défaut. Nous nous sommes basés sur l'impact que peut avoir chaque défaut surveillable sur le procédé, pour décider des approches que nous pouvons appliquer pour tolérer chacune des fautes apparues. Nous avons donc pu distinguer les cas de figures suivants :

- 1) Lorsque le défaut survenu est important (blocage total d'une vanne dans une position donnée par exemple) et qu'il y a une redondance matérielle du composant affecté, nous pouvons résoudre le problème par une commutation vers le composant sain, nous parlerons ici de reconfiguration matérielle ou restructuration du procédé supervisé.
- 2) Lorsque le défaut n'est pas important (blocage partiel d'une vanne par exemple) et le composant touché n'a pas de redondance, nous pouvons tolérer une certaine dégradation dans la fonction touchée par ce défaut à condition que : les valeurs des variables affectées par le défaut ne dépassent pas les seuils de tolérance ; les intervalles dans lesquels doivent évoluer les variables sont précisés lors d'entrée des contraintes exploitées pour la tolérance aux fautes, dans le système de supervision. Ces dernières diffèrent en forme des contraintes utilisées pour gérer le fonctionnement du procédé en absence de défauts. En effet, afin de suivre l'évolution de l'exécution des différentes tâches du système supervisé, nous vérifions en permanence la présence des conditions nécessaires au bon déroulement des différentes fonctions de ce système. Les variables concernées sont alors de type booléen (présence du signal de flamme par exemple, ou alors présence du combustible). Ceci facilitera énormément l'implémentation informatique par la suite, puisque ça respecte la logique de programmation des APIs (Automates Programmables Industriels) qui se base principalement sur la manipulation de variables logiques. Cependant, nous utilisons un autre type de contraintes pour assurer la tolérance aux fautes, ces dernières représentent les relations qui existent entre les différentes variables pour assurer un bon fonctionnement du système supervisé. Ceci nous permettra de savoir quels sont les composants sur lesquels on peut agir pour régler le problème, et par conséquent, nous permettra de proposer une aide précieuse à l'opérateur dans sa prise de décision sur les actions à entreprendre pour remédier aux effets du défaut sur le procédé, ne serait-ce que temporairement pour gagner du temps.

Les composants sur lesquels nous pouvons agir pour permettre au procédé de réaliser ses fonctions correctement, ou du moins minimiser la dégradation de la fonction affectée par le défaut, n'inclut pas l'élément défectueux, on parle dans ce cas de tolérance aux fautes par compensation.

- 3) Enfin, lorsque le défaut survenu touche un composant critique, c'est-à-dire, sur lequel on ne peut accepter de dégradations. Dans ce cas, nous ne pouvons pas appliquer une méthode de tolérance aux fautes. Nous faisons alors passer le système supervisé dans un mode d'arrêt pour éviter tout incident. Une autre alternative consiste à mettre le système dans un mode de sécurité, en gardant le strict minimum de composants actifs. Ceci n'est possible que lorsqu'il n'y a aucun risque sur la sécurité du procédé ou des personnes autour. Le passage du système supervisé à l'un de ces modes n'est que temporaire, afin de donner aux agents de maintenance le temps de diagnostiquer le défaut et de trouver une solution au problème.

Dans les deux premiers cas de figure, le procédé n'arrête pas de fonctionner, sans qu'il y est le moindre risque, et c'est l'objectif ultime de l'application des techniques de tolérance aux fautes. Dans le dernier cas de figure par contre, le système est arrêté partiellement ou totalement, puis relancé une fois le défaut corrigé, ce qui est complètement justifié, vu qu'il n'y a aucune tolérance aux fautes.

Une fois programmée, la technique de tolérance aux fautes est appliquée automatiquement dans le premier cas, dès que le défaut apparaisse. En revanche, l'application de la tolérance au second cas est semi-automatique ; nous offrons à l'opérateur une aide à la décision bien ciblée, en lui proposant les différentes possibilités d'action pour tolérer la faute apparue. Nous confions à l'opérateur ensuite la tâche d'appliquer l'une de ces solutions, en lui fournissant les outils d'actions nécessaires à travers l'interface interactive du système de supervision.

Dans la phase hors ligne de conception du système de supervision, il est également indispensable de préciser la relation qui doit exister entre les deux modules FDI et FTC pour qu'ils forment ensemble une unité cohérente de supervision assurant ses tâches d'une façon synchronisée. La communication entre les deux modules doit être bien explicitée ; les données échangées ainsi que le sens d'échange de ces dernières doivent être bien spécifiés.

L'étape en ligne consiste à mettre en marche le système de supervision et à exploiter ses diverses fonctionnalités sur le terrain. La première utilisation de ce système après sa conception permet de tester l'efficacité du développement théorique du système et la fiabilité du produit résultant.

Dans cette étape, chaque ensemble de conditions est testé afin d'activer le mode ou la transition correspondante, ceci est le principe de fonctionnement des deux modules ; ces deux opérations (test et activation) sont exécutées en temps réel. Les conditions d'activation des modes ou de déclenchement des transitions dans chaque module incluent des données indispensables qui proviennent de l'autre module, d'où la nécessité que la communication et l'échange de données entre ces deux modules se fassent également en

temps réel et à chaque fois qu'il est nécessaire. L'évaluation numérique des RRAs se fait en ligne aussi et en temps réel, fournissant ainsi des indicateurs de défauts dont les valeurs sont testées en continu. Cette vérification nous permet de détecter et de localiser les défauts, dès leur apparition.

L'évaluation de la situation et la proposition d'actions de tolérance se font également en temps réel. L'opérateur doit agir le plus rapidement possible et l'exécution des actions doit se faire dès qu'elles ont été choisies.

4.4.4 Fonctionnement du système de supervision

Afin d'explicitier le fonctionnement global du système de supervision proposé, nous pouvons distinguer deux principaux cas de figure selon l'état du procédé :

- a) Cas d'absence de défauts : fonctionnement normal du processus considéré : Les nœuds et les transitions de l'automate de commande sont activés selon la séquence normale des opérations du système industriel, c'est-à-dire, dès que les conditions d'activation sont satisfaites ; cela suppose une vérification continue de leur état (vrai ou faux). Ces conditions incluent les positions adéquates des composants nécessaires pour la réalisation des différentes tâches de chaque mode.

En général, grâce aux RRAs générées pour tous les modes et les transitions possibles du système supervisé, le module FDI fournit au module FTC en temps réel, les informations sur l'état des composants (défectueux ou pas) impliqués à chaque étape de fonctionnement du procédé. Par conséquent, en cas de fonctionnement normal du système supervisé, le module FDI permet de confirmer l'absence de défauts.

Les nœuds du module FDI délivrent aux nœuds du module FTC l'information sur l'état des composants (défectueux ou pas) nécessaires à l'exécution des tâches de chaque mode, lors de son activation. Cependant, ils fournissent aux transitions l'information sur l'état des composants essentiels au passage entre les modes, ainsi que l'état des composants devant être activés dans le nœud d'arrivée d'une transition. Le bon état de ces éléments est une contrainte supplémentaire qu'il faut respecter pour déclencher une transition, en plus des conditions d'activation normales, qui permettent de sortir d'un mode et d'entrer dans un autre mode, en absence de défauts. Le bon état des composants constitue également une contrainte à satisfaire pour rester dans un mode donné.

D'un autre côté, le module FTC informe le module FDI lorsqu'une transition a été activée ou le passage d'un mode à un autre a été effectué pour que ce dernier se mette à jour, en activant à son tour le nœud adéquat. Ceci va permettre d'assurer la synchronisation en temps réel des deux modules et de garder ainsi une certaine cohérence dans le

fonctionnement du système intégral de supervision. Les transitions du module FDI ne peuvent être activées que par le module FTC.

Fig.4.3 illustre le passage d'un mode M_1 à un mode M_2 dans le cas d'un fonctionnement nominal du processus.

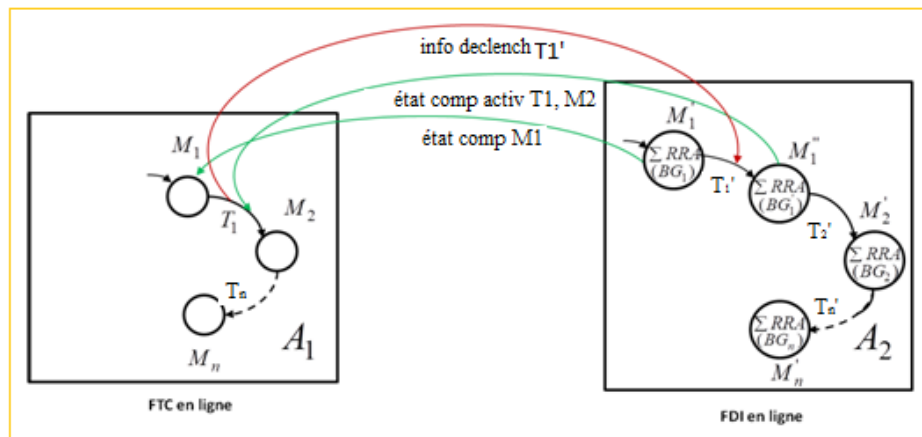


Fig.4.3. Fonctionnement normal du processus

- b) Fonctionnement à défauts du processus considéré: dans le cas où un défaut survient au niveau de l'installation à superviser, le module FDI doit avertir le module FTC des problèmes rencontrés et ce en temps réel afin que, les actions prévues à cet effet soient exécutées à temps, le type de ces actions dépend évidemment du type de défaut survenu.

De façon générale, il n'est plus possible de rester dans un mode donné, lorsque les conditions à satisfaire pour le faire ne sont plus remplies. En cas de fonctionnement normal, ceci déclenchera automatiquement le passage au mode suivant. Le module FDI dans ce cas a confirmé au module FTC le bon état des composants concernés, ce qui lui a permis de valider le déclenchement de la transition.

En cas de défauts, les informations concernant ces derniers sont transmises en temps réel du module FDI vers le module FTC, afin de les exploiter à temps. Pour un mode donné, ces informations concernent les composants qui ne fonctionnent plus correctement dû aux défauts, et qui empêchent le système industriel de continuer à évoluer dans ce mode. Pour une transition donnée, les informations envoyées concernent les composants affectés par les défauts, qui empêchent le déclenchement de la transition ou l'activation du mode cible.

La réception de ces informations par le module FTC en temps réel, lui permet d'appliquer la méthode de tolérance adéquate selon le défaut, et ce qui a été programmé pour chaque type. Ceci n'est possible que lorsque le défaut apparu est tolérable, dans le cas contraire le

système de supervision fait basculer le procédé vers un mode d'arrêt ou un mode de sécurité, suivant le cas.

Dans les cas d'application de tolérance aux fautes (activation des composants redondants ou compensation), nous pouvons garder les mêmes modèles de surveillance, vu que la structure du procédé ne change pas. Ce sont les valeurs des variables et des paramètres qui changent dû aux défauts. Par conséquent, la forme symbolique des RRAs ne change pas par rapport au cas nominal, c'est le résultat de leur évaluation qui change.

Fig.4.4 illustre le cas où un défaut surgisse au niveau du mode 1 (M_1) du fonctionnement du système considéré. \overline{M}_2 représente le mode de tolérance prévu pour ce défaut.

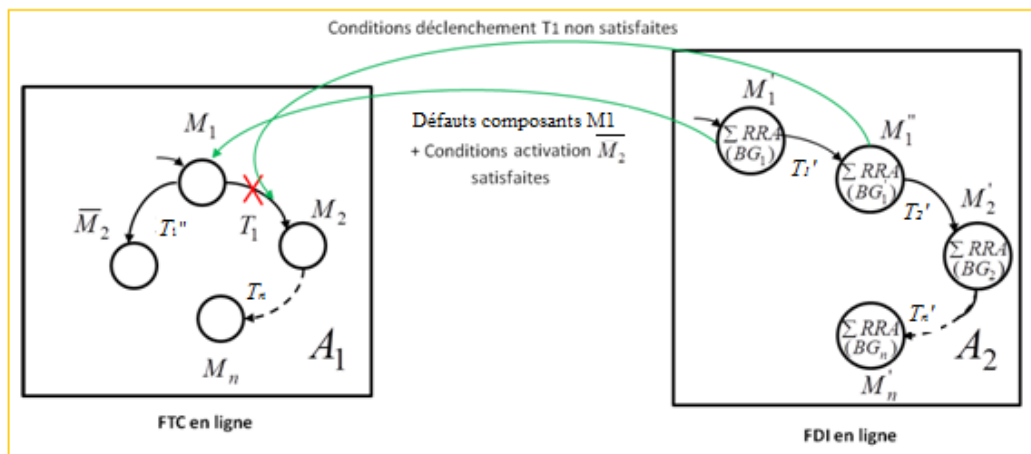


Fig.4.4. Fonctionnement du processus en cas de défauts

Le fonctionnement du système de supervision peut être illustré par l'organigramme ci-dessous (fig.4.5) qui constitue notre approche de supervision intégrée où :

Processus i : représente l'ensemble des composants devant être actifs dans le mode i du système à superviser (mode i de l'automate de contrôle).

BG-LFT(i) : constitue le BG-LFT associé au mode i du système à superviser.

BG-LFT(D_i) : constitue le BG-LFT associé au mode i du système à superviser, suite à l'application de la tolérance au défaut apparu.

$R_i = r_{i1} \cup r_{i2} \cup r_{i3} \cup \dots \cup r_{in}$: représente l'ensemble des résidus calculés dans le mode i .

Pour valider notre approche, nous nous sommes intéressés à un cas réel, issu d'un processus de fabrication de carton ondulé.

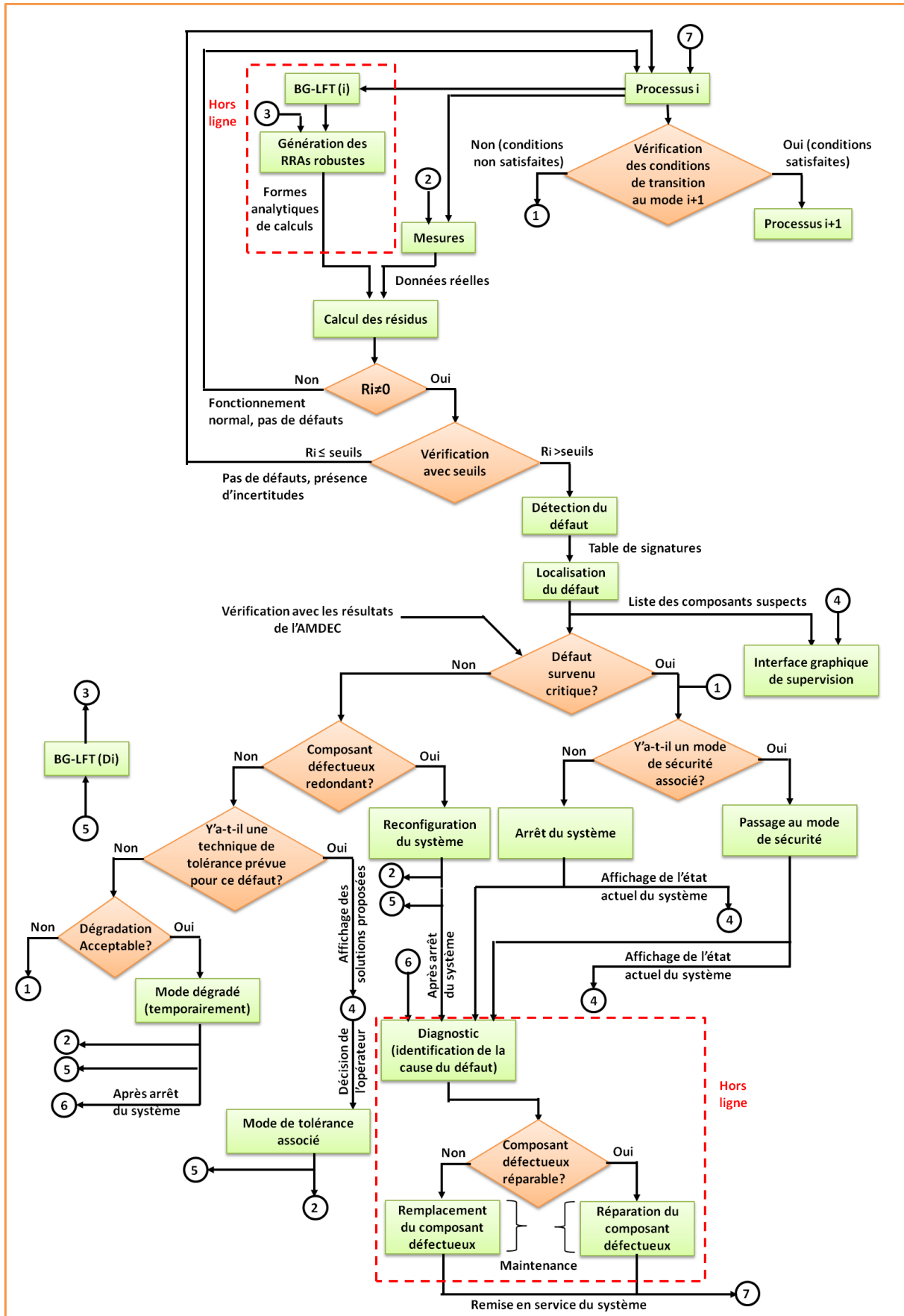


Fig.4.5. Fonctionnement du système de supervision

4.5 Cas d'étude : système de génération de vapeur à l'unité Kerma (Usine de fabrication du carton ondulé Maghreb-Emballage, Oran)

4.5.1 L'intérêt de la supervision de ce système

La fabrication du carton ondulé est un processus complexe réalisé principalement par des machines onduleuses, afin de transformer les bobines de papier en entrée en plaques de carton ondulé en sortie [204].

On retrouve de la vapeur tout au long du processus de fabrication. En effet, la vapeur est utilisée pour faire sécher le papier ou le préparer sur l'onduleuse, donner la forme des cannelures (ondulation du papier intérieur sous l'effet de la chaleur) ainsi que pour le collage des feuilles de papier formant le carton ondulé. Ces tâches sont accomplies grâce à des dispositifs chauffants dans l'installation globale tels que les préchauffeurs, les cylindres onduleurs et les plaques chauffantes.

L'installation de production de vapeur constitue alors une partie primordiale de la ligne de fabrication du carton ondulé, de par l'importance constatée de la vapeur dans la chaîne de production.

La supervision de cette partie du système est donc une nécessité pour assurer le bon aboutissement du processus de fabrication. Néanmoins, il faut souligner l'importance de cette supervision non seulement pour assurer un bon fonctionnement mais pour garantir la sécurité des personnes et du matériel, ceci en mettant en sécurité l'équipement concerné et si nécessaire toute l'installation, ce qui relève d'une importance capitale.

Les installations de vapeur ont toujours eu besoin d'un très haut degré de supervision afin de garantir une efficacité dans le fonctionnement et satisfaire les demandes des utilisateurs le plus possible, et surtout d'assurer un niveau adéquat de sécurité.

En effet, toute installation utilisant un combustible liquide ou gazeux constitue une éventuelle bombe, qui est susceptible d'exploser à tout moment s'il n'y a pas une supervision permanente de l'installation en question. De nombreux accidents industriels survenus dans diverses régions du monde en témoignent de l'ampleur des dégâts causés par de telles explosions.

Nombreux sont les travaux qui ont traité la surveillance et le diagnostic du générateur de vapeur. Nous pouvons citer en particulier les travaux [13], [2], [12], ou encore les travaux plus récents [302], [236], de l'équipe de recherche MOCIS, Laboratoire CRISTAL (LAGIS auparavant) qui est actif à nos jours dans le domaine de la surveillance, du diagnostic et de la supervision des systèmes en génie des procédés. Cependant, et à notre

connaissance, il n'y a pas eu une étude de la supervision du générateur de vapeur traitant en même temps les deux aspects de la supervision, à savoir, la FDI et la FTC. C'est dans ce contexte que nous pouvons situer notre contribution.

4.5.2 Description et principe de fonctionnement de l'installation de production de vapeur

L'installation de production de vapeur désigne ici comme dans tout secteur de l'industrie un ensemble d'équipements interconnectés dans le but de produire ou de "générer" de la vapeur, utilisée dans le reste du processus de fabrication et nécessaire à son bon déroulement.

Le circuit de génération de vapeur comporte principalement les équipements suivants :

- Une bache alimentaire : dans laquelle sont réunis l'eau fraîche après traitement, qui constitue l'eau d'appoint et les retours de condensats.
- Une chaudière : dont un tiers du volume est laissé libre pour fournir assez d'espace à la vapeur qui se forme. Le circuit de production de vapeur se termine à la fin de la conduite de vapeur, en sortie de la chaudière, et c'est à ce niveau que commence le circuit de consommation de la vapeur. La grande partie de la vapeur générée est dirigée vers les machines consommatrices, l'autre partie est orientée vers la bache alimentaire pour assurer l'échauffement de l'eau.
L'évaporation de l'eau est assurée par la chaleur résultante de la combustion
- Une station de condensation : à son niveau est réalisée la condensation du surplus de la vapeur exploitée par l'installation consommatrice.
- Une bache de condensat : l'eau résultante de la vapeur après sa condensation est stockée au niveau de cette bache avant d'être redirigée vers la chaudière ou vers la bache alimentaire, selon sa température.

Des canalisations et des pompes ainsi que des vannes assurent l'interconnexion de ces différents composants, afin d'assurer la circulation de l'eau dans ces deux formes liquide et vapeur dans l'installation.

Les principaux circuits pouvant être distingués au niveau de l'installation de génération de vapeur sont :

- Le circuit d'alimentation de la chaudière en eau
- Le circuit d'alimentation du brûleur en combustible
- Le circuit d'alimentation du brûleur en air
- Le circuit de vapeur saturée produite
- Le circuit d'extraction des fumées résultantes de la combustion.

La figure (Fig.4.6) nous fournit un schéma synoptique de l'installation globale de génération de vapeur.

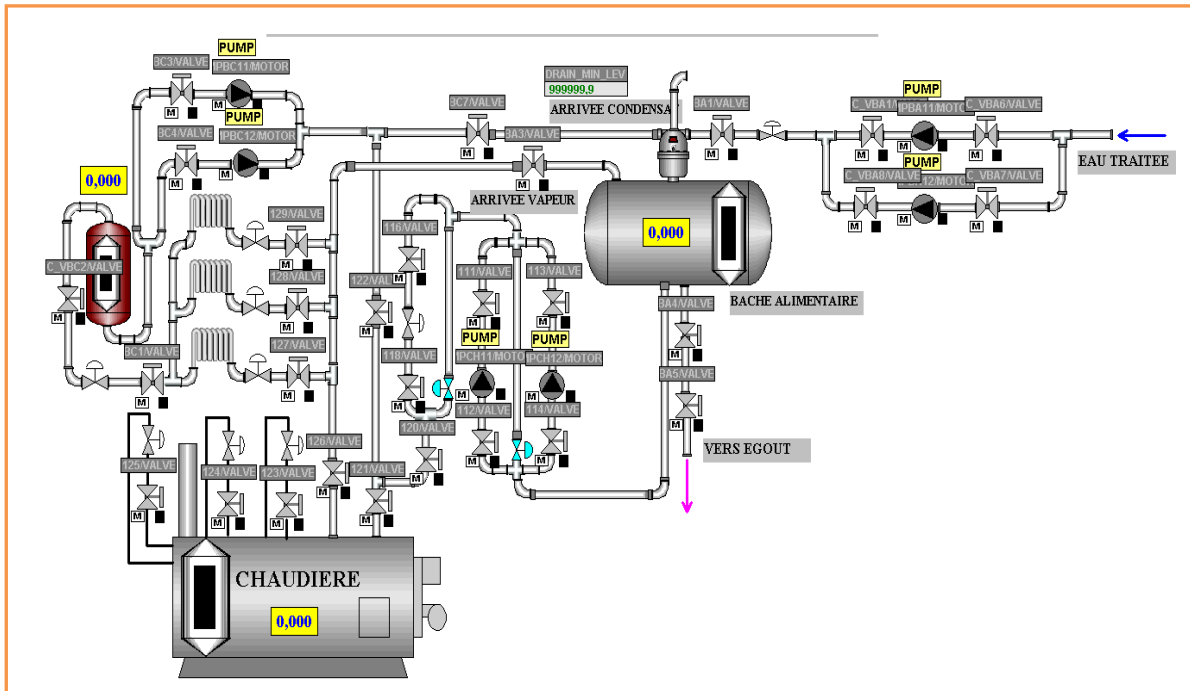


Fig.4.6. Station complète de préparation de vapeur (Maghreb-Emballage)

Le dernier circuit ne fait pas partie de notre étude. Pour la partie surveillance, nous avons considéré l'ensemble des composants depuis l'approvisionnement en eau de la bache alimentaire jusqu'à la sortie de vapeur de la chaudière. Le système surveillé est représenté en Fig.4.7.

Dans ce qui suit, nous allons décrire les principaux composants faisant partie de cet ensemble.

a) Bâche alimentaire

Cet équipement est un élément crucial dans la chaîne de production de vapeur, son rôle principal est de prévenir l'interruption de l'approvisionnement en eau de cette chaîne, ce qui provoquera l'arrêt du processus de fabrication dès que la quantité d'eau disponible n'est plus suffisante.

De plus, la bâche d'alimentation assure le réchauffage de l'eau alimentaire (80° en standard) légèrement au-dessus de 100°C, grâce à la vapeur vive injectée directement à partir de la chaudière par les pulvérisateurs installés à l'intérieur de la bâche, afin d'évacuer l'oxygène dissous dans l'eau d'alimentation.

b) Chaudière

La chaudière est le cœur du procédé de génération de vapeur. En effet, elle constitue l'équipement au niveau duquel la vapeur est produite. Un large éventail de chaudières peut être trouvé dans l'industrie, et qui peuvent être classées de diverses façons selon différents critères.

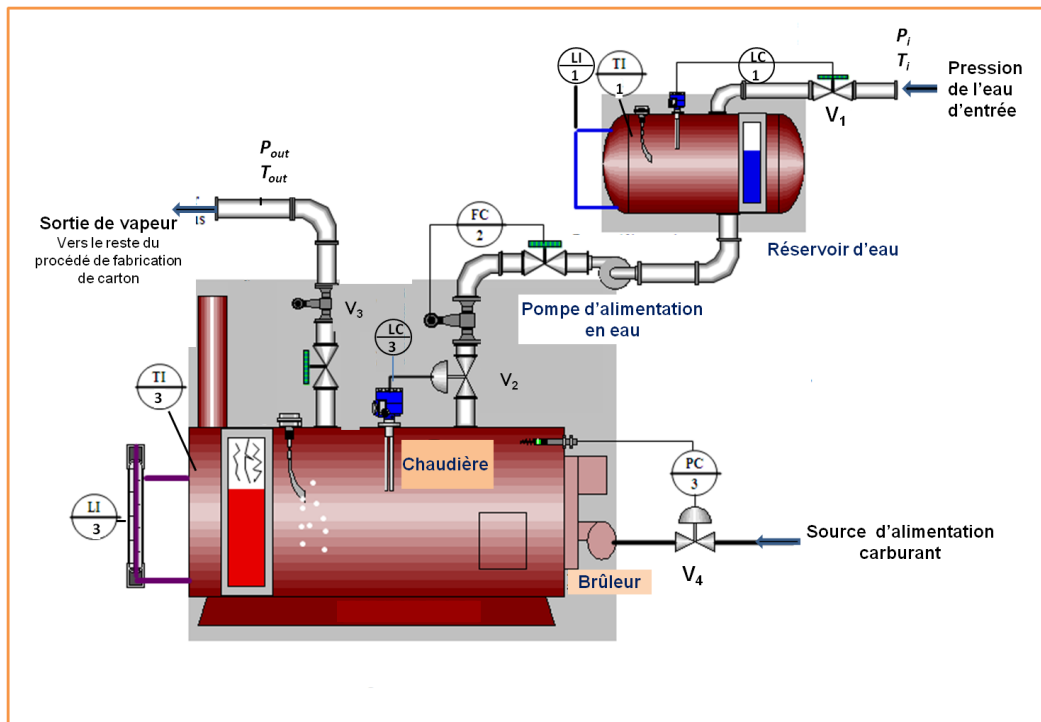


Fig.4.7. Vue d'ensemble et PID du processus

En se basant sur la classification en fonction de la construction et en considérant particulièrement les chaudières à combustible, tout en tenant compte du fluide circulant dans le faisceau tubulaire : l'eau à chauffer ou les fumées de combustion; on retrouve deux types de chaudières à structures tubulaires: les chaudières à tubes d'eau et les chaudières à tubes de fumées. Dans la première catégorie, les tubes sont parcourus par l'eau et l'émulsion eau-vapeur, alors que dans la seconde catégorie les tubes sont parcourus par les gaz de combustion [205].

La chaudière considérée dans notre travail est du second type, avec possibilité de combustion du gaz naturel dans son foyer. La chaleur résultante de la combustion est transmise à l'eau de la chaudière représentant ici le fluide thermique, encore appelé fluide caloporteur, afin de le chauffer et de le vaporiser.

Cette chaudière est donc composée de deux sections distinctes : une où s'effectue l'échauffement de l'eau et l'autre dans laquelle est brûlé le combustible, appelée Chambre ou Foyer, ces deux parties sont contenues dans le corps cylindrique de la chaudière. La première partie est constituée d'un grand récipient d'eau parcouru par des tubes horizontaux dans lesquels circulent les fumées, permettant ainsi un échange de chaleur

entre les fumées et l'eau ; et la seconde partie (foyer) située sous le plan d'eau, n'est autre que le premier tube par lequel commence le parcours de ces fumées, mais ce dernier possède un diamètre beaucoup plus grand que les autres tubes. En effet, c'est au niveau du foyer que se développe la flamme et par conséquent, où s'accumulent les gaz chauds provenant du brûleur, avant qu'ils ne soient véhiculés vers le faisceau tubulaire.

Il est également nécessaire de mentionner le fait que les tubes de fumées de la chaudière considérée sont à triple passages de fumées, en incluant la traversée du tube foyer qui est considéré comme un premier passage. Ceci afin d'étendre la surface d'échange thermique entre les fumées et l'eau.

La vapeur résultante est saturée, elle est produite par l'échauffement d'un volume considérable d'eau, via les tubes de fumées qui sont immergés dans l'eau à l'intérieur de la chaudière, et dans lesquels circulent les fumées générées par la combustion du gaz, tâche réalisée par le Brûleur. La vaporisation est donc assurée par la chaleur transmise par conduction des tubes de fumées à l'eau du réservoir. Le débit de la vapeur saturée produite est inférieur à 20 tonnes/heures, à une pression au dessous de 20 bars. En effet, le timbre (la pression maximale d'utilisation spécifiée par le constructeur) de la chaudière considérée est limité à 18 bars, quant à sa pression de service (pression devant être maintenue par les régulateurs de chauffe), elle est de 15 bars.

Les coupes suivantes fournissent une meilleure compréhension du principe de construction de la chaudière considérée.

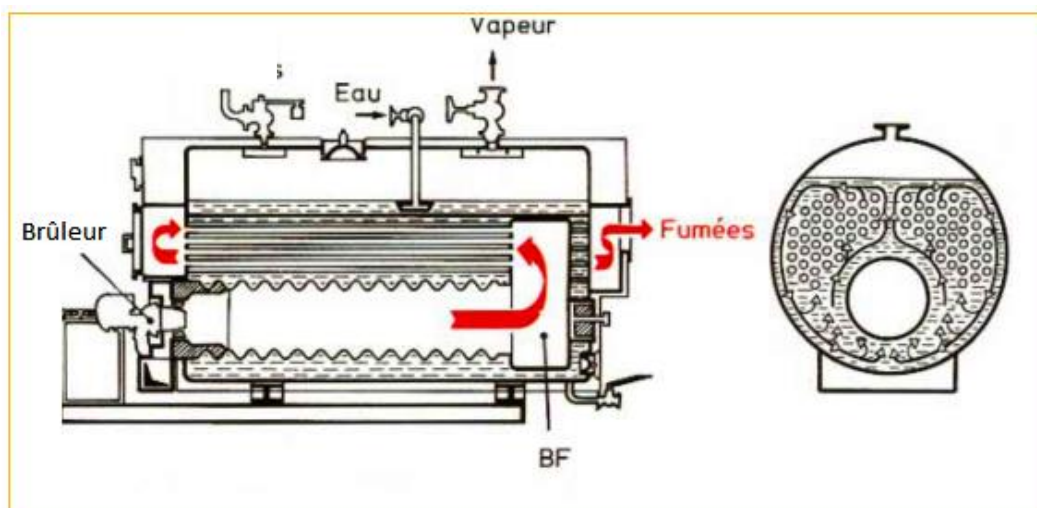


Fig.4.8. Coupes frontale et latérale d'une chaudière à tubes de fumées [206]

L'un des composants cruciaux dans l'installation de génération de vapeur, est l'élément assurant l'échauffement de l'eau de la chaudière, afin de produire de la vapeur. Il s'agit du brûleur.

Cet équipement joue un rôle prépondérant dans la qualité de la combustion. Il assure généralement une double fonctionnalité : le mélange carburant - comburant avec des pourcentages donnés (avec excès d'air par exemple), la réalisation de la combustion dans les meilleures conditions (ignition et entretien de la flamme, combustion totale). Il est à noter que le brûleur considéré dans cette étude est à air soufflé assurant ainsi l'entrée du combustible: gaz et de l'air comburant, qui est projeté par un ventilateur au foyer de la chaudière où s'effectue la combustion [206], en alimentant ainsi la flamme en air frais.

c) Alimentation en eau (Pompes d'alimentation en eau)

La chaudière est alimentée par l'eau provenant de la station de traitement d'eau (décarbonatation, déminéralisation, dégazage,...), de la bache de récupération des condensats et du dégazeur [207], qui sont accumulées dans la bache alimentaire. Suite à la diminution du niveau d'eau dans la chaudière, dû aux pertes de vapeur intrinsèques au procédé de fabrication du carton ondulé et aux besoins techniques, et afin de compenser ces pertes, un appoint d'eau est fourni à la chaudière [203] à partir de la bache alimentaire, par le biais d'une pompe d'alimentation (généralement, mise en double).

La pompe alimentaire est alors sans aucun doute, un élément important pour le générateur de vapeur. En effet, la charge perdue dans la chaudière est variable selon les variations de la charge thermique, donc de la proportion de vapeur dans l'émulsion, raison pour laquelle la pompe alimentaire doit être de caractéristique : débit en fonction de la pression, qui assure une alimentation régulière de la chaudière indépendamment de la charge.

Les pompes à pistons, les pompes à membranes ou toute autre pompe volumétrique ou semi-volumétrique sont parfaitement adéquates pour remplir une telle fonction [205].

4.5.3 Instrumentation de l'installation à vapeur étudiée

Pour assurer le bon déroulement de la procédure de génération de vapeur, L'installation est équipée d'une variété de capteurs répartis sur l'ensemble de ces équipements. Des instruments de mesure et de régulation sont installés au niveau la bache alimentaire, de la chaudière et de la bache de condensats pour assurer le contrôle du niveau et de la pression ou de la température à l'intérieur de ces récipients.

En effet, le niveau d'eau dans les trois récipients doit rester entre une valeur basse et une valeur haute et ne pas dépasser la valeur très basse ou bien très haute.

4.5.3.1 Régulation de niveau d'eau de la chaudière

Le bon fonctionnement de la chaudière est une exigence de nos jours dans tous les domaines de l'industrie où cet équipement est utilisé. Il doit être équipé d'éléments de régulation efficaces qui assurent le bon rendement et la sécurité nécessaire.

Dans les chaudières de génération de vapeur, le niveau d'eau est en perpétuelle baisse avec une vitesse qui diffère selon les demandes de vapeur dans l'installation. Par conséquent, il est nécessaire de compenser cette diminution de niveau par l'adjonction à partir de la bêche alimentaire d'une quantité d'eau égale à celle consommée par le procédé de fabrication. Le niveau de la chaudière ne doit pas dépasser le seuil très haut réservé à la vapeur et le seuil très bas, considérés comme étant les niveaux de sécurité supérieur et inférieur, respectivement. Ceci afin d'empêcher l'eau d'entrer dans les conduites de sortie de la vapeur, et empêcher les tubes de surchauffer.

4.5.4 Modes de fonctionnement

Le déroulement global du processus de génération de vapeur peut être résumé dans les modes de fonctionnement suivants :

Mode 1 : Remplissage de la bêche alimentaire par de l'eau fraîche traitée, et ceci jusqu'au niveau haut (niveau = NH)

Mode 2 : Remplissage de la chaudière (Niveau > NB)

Mode 3 : Activation du brûleur (Vérification de la boucle de sécurité : alimentation électrique, présence du gaz, présence de l'air de combustion,...) : allumage de la veilleuse + arrivée du gaz = première flamme, après il y a régulation de la pression de flamme selon la pression à l'intérieur de la chaudière.

4.5.5 Implémentation du modèle

L'automate $A_C(M, \tau, m^0)$ est directement implémenté pour représenter la gestion des modes de fonctionnement du système (Fig.4.8) où:

- $M = \{m_i, i \in I_m\}$ est l'ensemble des OMs représentés par les sommets de l'automate. À chaque OM correspond un ensemble de composants permettant la réalisation des tâches de ce mode.
- $\tau = \{\tau_{ij}, i, j \in I_m\}$ est un ensemble de transitions, où chaque transition est définie par $\tau = \{m_i, m_j, c_{ij}\}$ où m_i est l'OM de départ, m_j est l'OM d'arrivée, et c_{ij} est une condition de franchissement de la transition.
- $m^0 \in M$ est l'OM initial, c'est le mode où le système reste lorsqu'il est démarré.

Le graphe de gestion de fonctionnement du processus au niveau de la chaudière est caractérisé par quatre principaux modes (OMs), organisés d'une façon cohérente afin de satisfaire des objectifs bien spécifiques :

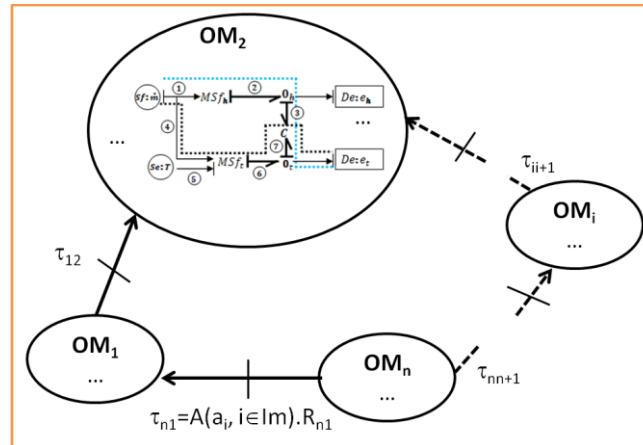


Fig.4.9. Gestion des modes de fonctionnement [203]

A: est une fonction. a_{ij} : représente l'état des composants nécessaires pour déclencher la transition τ_{ij} donné par le système de FDI en ligne. R_{ij} : demande de l'opérateur.

OM1. Pas d'opération: pas de production de vapeur avec un point de fonctionnement caractérisé par une température $T = T_{\text{ambiante}}$ et une pression $P = P_{\text{atmosphérique}}$.

OM2. Mode de démarrage: atteindre un point de consigne de fonctionnement où il est possible de produire de la vapeur ($T \geq 100^\circ\text{C}$ et $P \geq 1 \text{ bar}$). Dans ce mode, la température et la pression sont indépendantes et la qualité de la vapeur (le rapport de vapeur dans le mélange vapeur-liquide) est $x = 0$.

OM3. Production de vapeur: maintenir la température et la pression dans la chaudière afin de produire de la vapeur saturée avec une qualité fixe. Dans ce mode de mélange eau-vapeur saturée, la température et la pression sont dépendantes et liées par une relation thermodynamique ou des diagrammes de Mollier: la qualité de la vapeur est: $0 < x \leq 1$.

OM4. Arrêt d'urgence: mettre le système dans des conditions de sécurité.

La transition τ_{ij} pour passer de OM_i à OM_j est valide (égale à vrai) si toutes les conditions de passage vers OM_j sont satisfaites et si OM_j est le mode voulu par l'utilisateur. Une exception est accordée au mode d'arrêt d'urgence; le système passe automatiquement à l'OM d'arrêt d'urgence dès que l'OM adjacent ne peut plus être atteint. Les transitions τ_{ij} sont égales à faux pour tous les modes OM_j que nous ne pouvons pas atteindre.

La possibilité d'atteindre l'OM est évaluée en ligne par les algorithmes FDI basés principalement sur BG-LFT.

Le graphe est illustré en Fig.4.10.

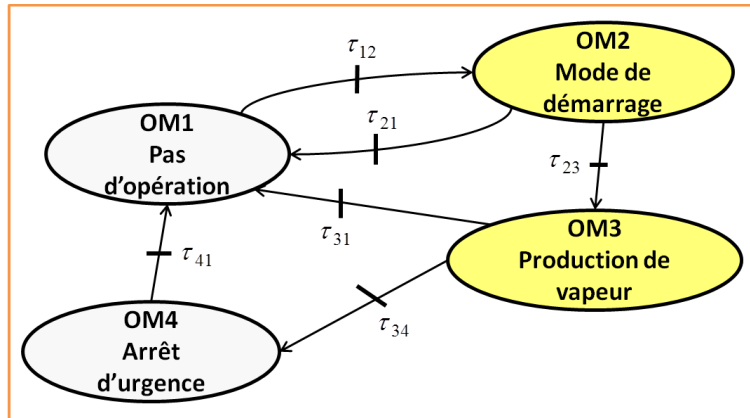


Fig. 4.10. Graphe de gestion des OMs de la chaudière

4.5.6 Modèles BG-LFT pour une FDI robuste

Le système à surveiller est décomposé en un réservoir d'eau d'alimentation avec une capacité de 8000 litres, un débit d'eau contrôlé (mesuré par F_2), une pompe d'alimentation, et une chaudière à haute pression 14000l chauffée par un brûleur à travers une vanne contrôlée V_4 .

La vapeur produite via la vanne de sortie V_3 est utilisée pour former du carton ondulé. La température de la vapeur, la pression dans la chaudière et le niveau d'eau sont respectivement mesurés par les capteurs T_3 , P_3 et L_3 . Le réservoir d'eau est rempli par la vanne V_1 jusqu'au niveau nominal. Le niveau et la température de cette eau sont respectivement mesurés par les capteurs L_1 et T_1 . De plus, pour augmenter la robustesse du système, des capteurs ou même des actionneurs redondants peuvent être ajoutés.

4.5.6.1 Hypothèses de modélisation

La transformation d'une partie de l'eau de la chaudière de l'état liquide à l'état gazeux est une évolution isobare, les pertes de charges sont faibles, il est possible donc de les négliger. Les variations d'énergie cinétique peuvent également être négligées, dans ce cas.

Le processus de génération de vapeur est modélisé en considérant les hypothèses suivantes: (i) l'eau et la vapeur dans la chaudière sont en équilibre thermodynamique, (ii) le mélange intérieur de la chaudière est à pression uniforme; (iii) la chaudière est mal isolée, donc sujette à des pertes de chaleur vers l'environnement extérieur; (iv) le fluide dans le circuit d'alimentation est incompressible.

4.5.6.2 Bond graph à mots

Le bond graph à mots consiste à décomposer le système en un ensemble de sous-systèmes, échangeant différentes puissances données par la paire de variables de

puissances. Le bond graph à mots du système est donné en Fig.4.11.

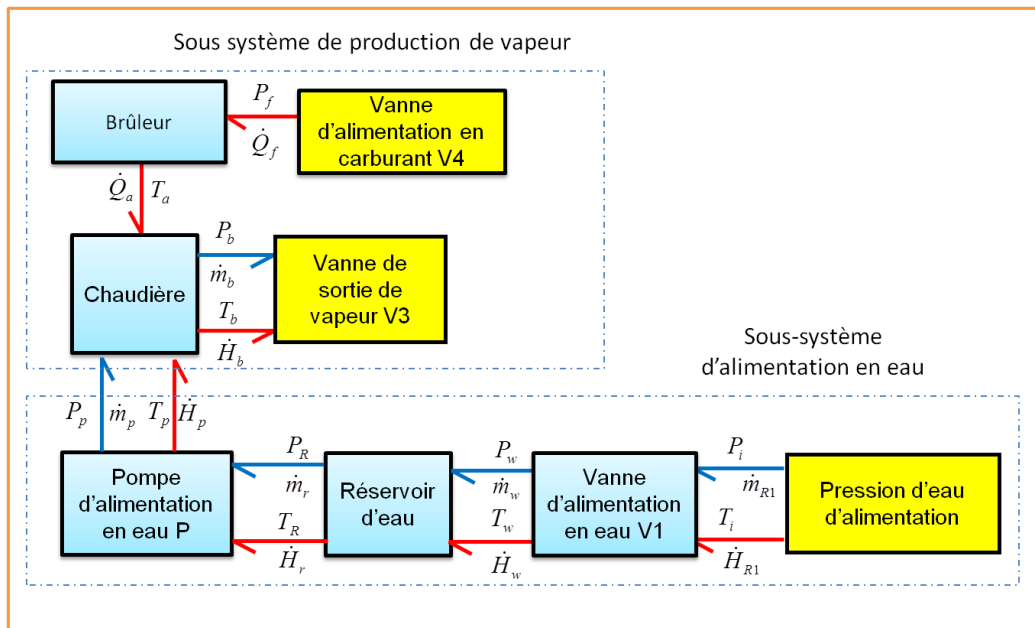


Fig.4.11. Bond graph à mots du processus de génération de vapeur

Le système est caractérisé par le couplage de deux énergies: thermique et hydraulique conduisant à un modèle pseudo bond graph dynamique non linéaire. La paire pression-débit (P, \dot{m}) est utilisée pour représenter l'énergie hydraulique. Pour le domaine thermodynamique, la paire température-enthalpie (T, \dot{H}) est utilisée pour représenter la convection, et la paire température-flux thermique (T, \dot{Q}) est utilisée pour représenter les phénomènes de conduction.

4.5.6.3 Modélisation BG-LFT

Toute expression rationnelle peut être écrite sous la forme de deux parties distinctes: la partie nominale du modèle et sa partie incertaine.

Pour une raison de simplicité, la partie incertaine sera présentée simplement par un effort modulé MS_e^* ou un flux modulé MS_f^* , selon le type de capteur. Chaque élément BG incertain peut être représenté par son modèle BG-LFT [41].

Nous avons décomposé le système à surveiller en quatre sous-systèmes. Nous avons modélisé chacun en BG-LFT à part. La composition de ces modèles nous fournira le modèle global du système.

Le modèle BG-LFT du premier sous-système, constitué de la vanne V1, de la pompe P1 et du régulateur LC est représenté en Fig.4.21 (c), sa forme simplifiée est donnée en Fig. 4.12 (d).

Le modèle BG-LFT simplifié du deuxième sous-système constitué de la bache d'eau, du régulateur LC, de l'indicateur de température TI, et de l'indicateur de niveau LI est représenté en Fig.4.13 (b).

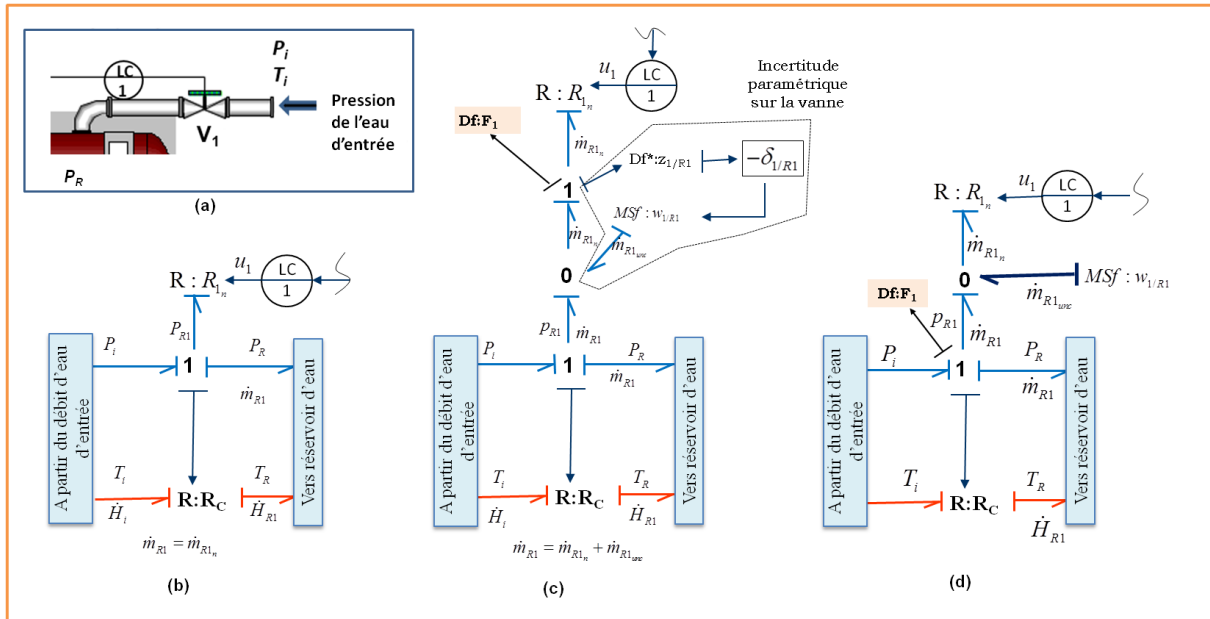


Fig.4.12. (a) Conduite avec vanne (b) BG du sous-système (c) BG-LFT du sous-système (d) BG-LFT simplifié

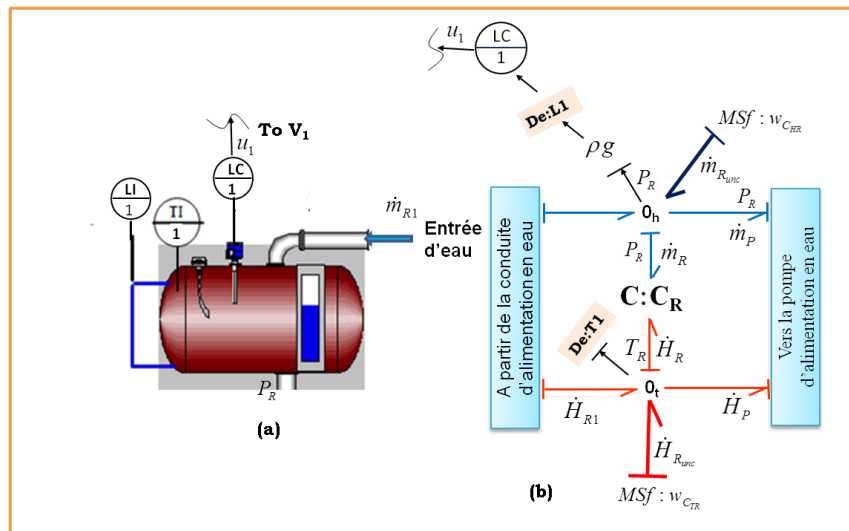


Fig.4.13. (a) Bache d'eau avec capteurs (b) BG-LFT simplifié

Le troisième sous-système et son modèle BG-LFT sont représentés en Fig.4.14 (a) et (b), respectivement. Fig.4.15 représente le dernier sous-système et son modèle BG-LFT.

Le modèle bond graph sous forme LFT global avec une causalité dérivée (nommé également BG de diagnostic) est illustré en Fig.4.16. Ce modèle concerne le système global à surveiller. Cependant, il y a à chaque mode de fonctionnement un ensemble de

composants qui sont activés. De ce fait, un sous modèle BG-LFT est associé à chaque mode.

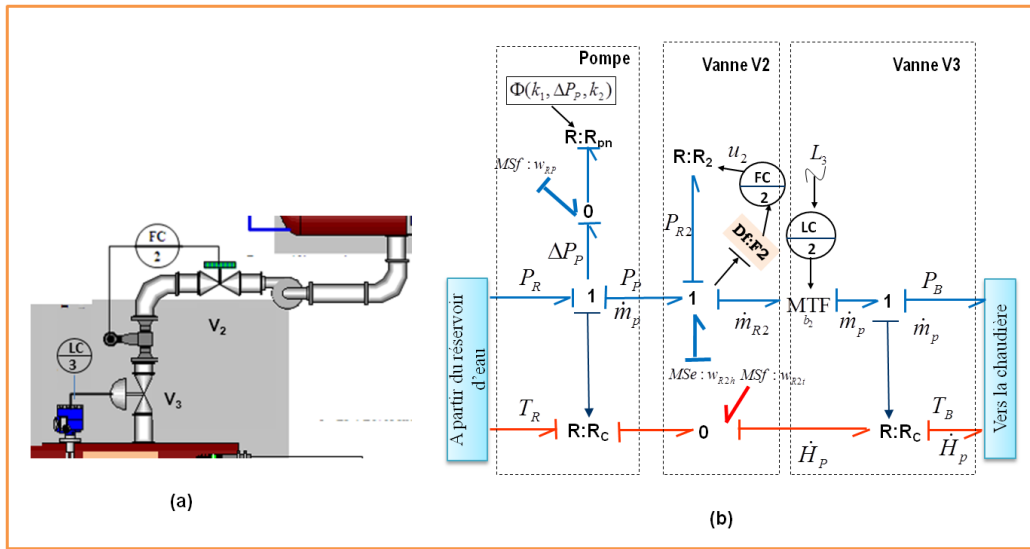


Fig.4.14. (a) Du réservoir d'eau vers la chaudière (b) BG-LFT du sous système

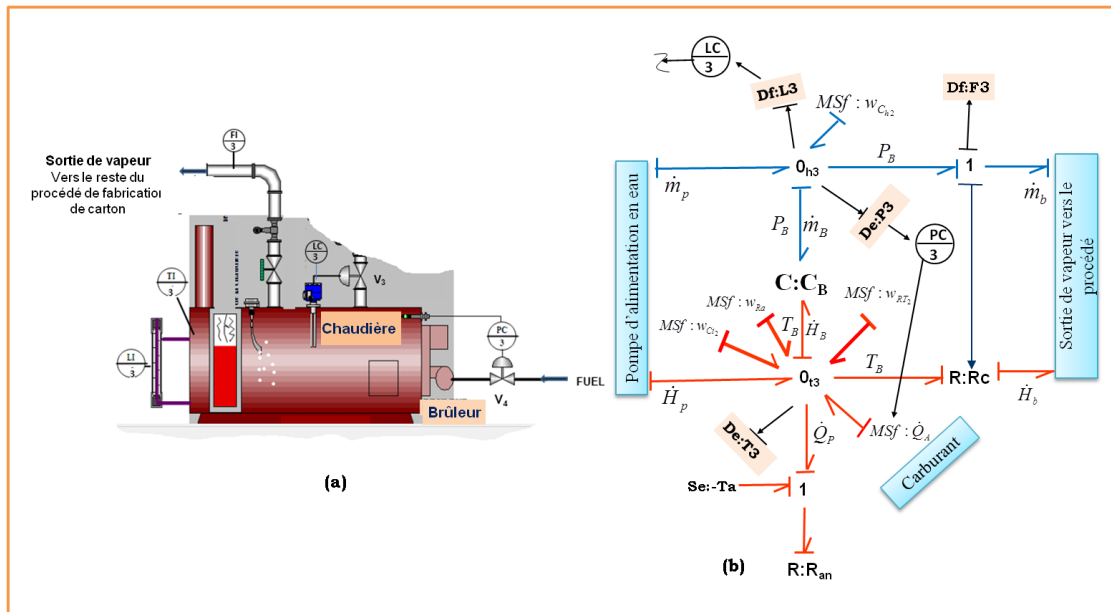


Fig.4.15. (a) Chaudière avec sortie de vapeur (b) son BG-LFT

4.5.6.4 Génération des indicateurs de défauts robustes

En se basant sur l'algorithme développé en [153], des indicateurs de défauts robustes (à savoir les RRAs) sont générés à partir de différentes jonctions connectées à au moins un détecteur. Pour plus de clarté, cela se fera de façon modulaire.

a) Soupape d'alimentation en eau

La conduite d'alimentation en eau, se compose d'un tuyau et d'une vanne V_1 commandée par un régulateur de niveau tout ou rien LC_1 . La vanne V_1 est modélisée par l'élément bond graph $R : R_1$, représentant les pertes hydrauliques. R_1 est la résistance hydraulique modulée par le signal de contrôle booléen u_1 . La valeur du paramètre incertain R_1 est: $R_1 = R_{1n} + \Delta R_1$. Le débit massique \dot{m}_{R_1} à travers la vanne est calculé par la loi non linéaire de Bernoulli:

$$\dot{m}_{R_1} = u_1 \cdot \frac{1}{R_{1n}} \cdot \sqrt{P_i - P_R} + \delta_{1/R_1} \cdot u_1 \cdot \frac{1}{R_{1n}} \sqrt{P_i - P_R} = \dot{m}_{R_{1n}} + \dot{m}_{R_{1unc}} \quad (4.1)$$

Où δ_{1/R_1} est l'incertitude multiplicative relative.

Le couplage de l'énergie thermique avec l'énergie hydraulique est modélisé par l'élément multiport $R : R_C$. Le flux d'enthalpie à travers le tuyau convecté par le fluide est alors:

$$\dot{H}_{R_1} = T_1 \cdot c_p \cdot \dot{m}_{R_1} \quad (4.2)$$

T_1 et c_p sont respectivement la température et la capacité thermique de l'eau.

b) Réservoir d'eau

La première RRA est générée à partir de la jonction 0_{h1} connectée au détecteur de niveau $SSe:L_1$ dans le reservoir. Ainsi, la RRA candidate est générée à partir de la loi de conservation de masse:

$$RRA_1 : \dot{m}_{R_1} - \dot{m}_R - \dot{m}_p - \dot{m}_{R_{unc}} = 0 \quad (4.3)$$

Les variables inconnues sont éliminées en utilisant des chemins causaux de couverture (de causes à effets) à partir des variables inconnues jusqu'aux variables connues. Cette procédure conduit à un graphe orienté:

$$\dot{m}_{R_1} \rightarrow \text{Jonction } 1_{h1} \rightarrow P_i$$

$$\dot{m}_{R_1} \rightarrow \text{Jonction } 0_{h1} \rightarrow SSe : L_1$$

$$\dot{m}_R \rightarrow C : C_R \rightarrow P_R \rightarrow SSe : L_1$$

$$\dot{m}_p \rightarrow SSf : F_2$$

Le résultat de cette élimination de variables inconnues est donné par:

$$\begin{cases} \dot{m}_{R_1} = \frac{1}{R_{1n}} u_1 \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} + \delta_{1/R_1} \cdot \frac{1}{R_{1n}} \cdot u_1 \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} = \dot{m}_{R_{1n}} + \dot{m}_{R_{1unc}} \\ \dot{m}_R = C_{h_n} \cdot \frac{dL_1}{dt} + \delta_{C_{h_1}} \cdot \frac{dL_1}{dt} = \dot{m}_{R_n} + \dot{m}_{R_{unc}} \\ \dot{m}_p = F_2 \end{cases} \quad (4.4)$$

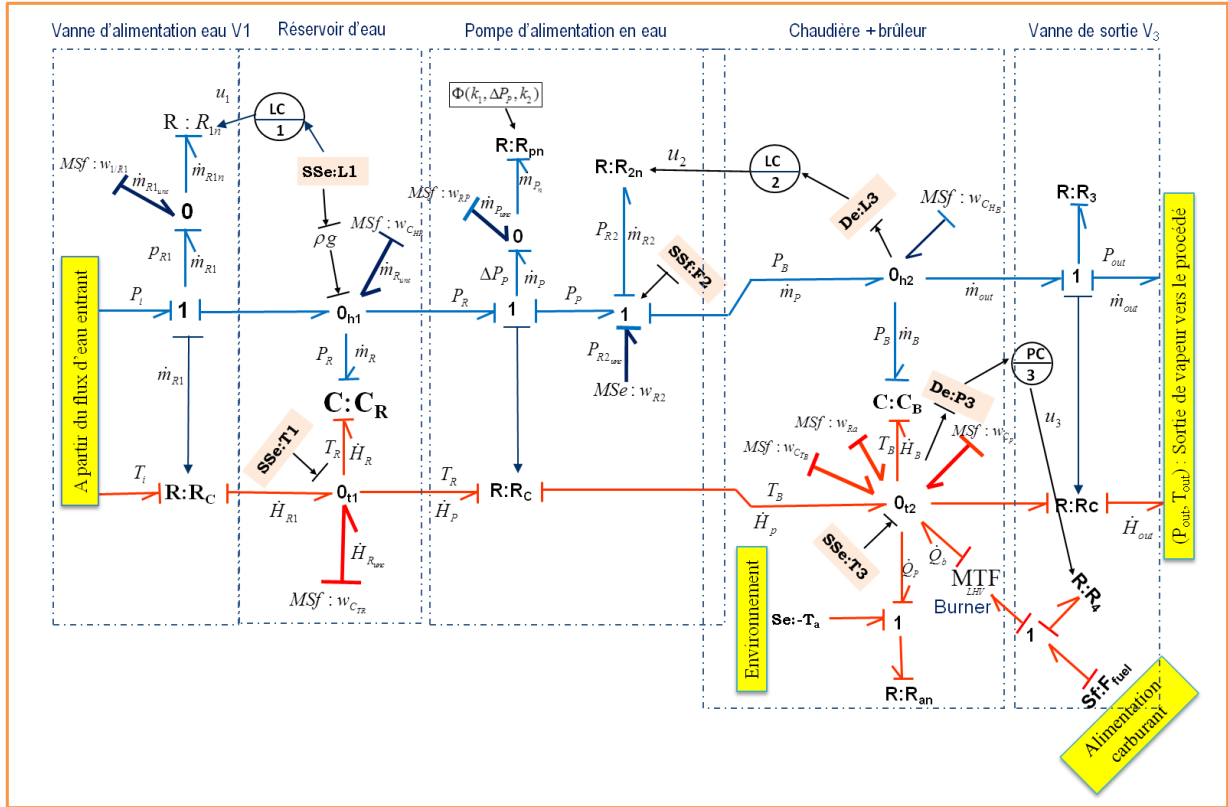


Fig.4.16. Modèle bond graph de diagnostic en mode de fonctionnement nominal
 En substituant les expressions des variables inconnues, nous obtenons la partie nominale (r_1) et la partie incertaine (a_1) (seuil) de RRA_1 :

$$RRA_1 : \begin{cases} r_1 = \frac{1}{R_{1n}} u_1 \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} - C_{h_n} \frac{dL_1}{dt} - F_2 \\ a_1 = |w_{C_{h_1}}| = \left| \delta_{1/R_1} \frac{1}{R_{1n}} u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \right| + \left| \delta_{C_{h_1}} \frac{dL_1}{dt} \right| \end{cases} \quad (4.5)$$

L'énergie thermofluide couplée stockée dans le réservoir est modélisée par l'élément BG à deux-ports C: C_R . Ce multiport a une capacité hydraulique C_{h_1} et une capacité thermique C_{t_1} . Concernant la capacité hydraulique, le réservoir est sous saturé, du fait que l'eau est à température ambiante. Donc, seul le thermique $C:C_{t_1}$ est modulé par la variable de puissance d'effort hydraulique (cela signifie que l'énergie interne totale dépend de la

masse stockée, mais la masse stockée ne dépend pas de l'énergie thermique): le réservoir n'est pas chauffé.

Sachant que le réservoir étudié est cylindrique, C_h peut être exprimé comme suit:

$$C_h = A_T \cdot (\rho_T \cdot g)^{-1} \quad (4.6)$$

Où A_T est la section du reservoir, ρ_T est la densité du fluide et g est la constante de gravité.

La relation entre C_{h_n} et δ_{C_h} est donnée par l'expression suivante:

$$C_h = C_{h_n} + \delta_{C_h} \cdot C_{h_n} \quad (4.7)$$

Où C_{h_n} est la valeur nominale de C_h .

La deuxième RRA candidate est générée à partir de la loi de conservation d'énergie, au niveau de la jonction $0_{t_1} : RRA_2 : \dot{H}_{R_1} - \dot{H}_R - \dot{H}_p - \dot{H}_{R_{unc}} = 0$. En utilisant le même algorithme de chemin causal de couverture, nous obtenons:

$$RRA_2 : \begin{cases} r_2 = \frac{1}{R_{1n}} \cdot u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \cdot C_{p_n} \cdot T_i - T_1 \cdot C_{p_n} \cdot F_2 - C_{t_{1n}} \frac{d}{dt} [L_1 \cdot T_1] \\ a_2 = \left| \delta_{1/R_1} \cdot \frac{1}{R_{1n}} u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \right| + \delta C_p + \delta C_{t_1} \end{cases} \quad (4.8)$$

c) Pompe d'alimentation en eau:

Le système d'alimentation en eau se compose d'une pompe et d'une vanne de débit V_2 commandée par la variable booléenne u_2 fournie par le contrôleur ON/OFF de niveau LC_2 dans la chaudière. Dans le modèle bond graph (Fig.4.16), la pompe et la vanne V_2 avec la conduite sont représentées par deux résistances. La pompe est modélisée par une

résistance R_p , modulée par la caractéristique de la pompe, donnée par l'équation (4.9). Cette dernière est donnée sous la forme d'une courbe entre la pression ΔP_p et le débit massique généré par la pompe \dot{m}_p :

$$\dot{m}_p = k_1 \cdot (P_p - P_R) + k_2 \quad (4.9)$$

P_R et P_p sont respectivement les pressions d'entrée et de sortie de la pompe. k_1 et k_2 sont les paramètres caractéristiques de la pompe.

L'incertitude sur le débit massique à la sortie de la pompe est due aux incertitudes δ_{k_1} et δ_{k_2} sur les paramètres k_1 et k_2 . Leurs valeurs nominales sont données par le constructeur avec une incertitude de $\pm 5\%$. Alors, la source modulée $MSf : w_{R_p}$ sur le modèle du bond graph de la figure 4.16 représente l'incertitude sur le débit massique à la sortie de la pompe et est modulée par l'expression suivante:

$$w_{R_p} = -[\delta_{k_1} \cdot k_{1_n} \cdot (P_R - P_P) + \delta_{k_2} \cdot k_{2_n}] \quad (4.10)$$

Le paramètre de débit de la vanne V_2 (modélisée par $R:R_2$) dépend des détails de la tuyauterie et il est fonction de l'ouverture de la vanne. La valeur nominale R_{2n} et l'incertitude w_{R_2} sur sa valeur peuvent être déterminées comme pour la vanne V_1 .

Le débit massique \dot{m}_{R_2} et son flux d'enthalpie correspondant \dot{H}_p à travers la vanne modélisée par l'élément modulé R_2 sont:

$$\begin{cases} \dot{m}_{R_2} = \frac{1}{R_2} \cdot \sqrt{P_B - P_{R_2}} \\ \dot{H}_p = T_1 \cdot c_p \cdot \dot{m}_{R_2} \end{cases} \quad (4.11)$$

L'incertitude sur l'énergie thermique transmise à la chaudière est due à la variation de la chaleur spécifique à pression constante c_p en fonction de la température du fluide. Cette dernière température est considérée comme une variation entre la température de l'eau dans la cuve (donnée par le détecteur T_1) et la température ambiante T_a , alors l'incertitude sur l'énergie thermique transmise par le système de pompage d'eau à la chaudière est donnée par l'équation suivante

$$w_{R_{2t}} = -\delta_{c_p} \cdot (T_2 \cdot c_{p_n} \cdot F_2) \quad (4.12)$$

À partir de la jonction 1 associée à la pompe et à la conduite et selon la causalité affectée, nous obtenons la RRA_3 , comme suit:

$$RRA_3 : \begin{cases} r_3 = -(u_3 \cdot R_{2n} \cdot F_2)^2 - \frac{k_2}{k_1} - P_3 - \frac{F_2}{k_1} + \rho_w \cdot g \cdot L_1 \\ a_3 = \left| \frac{w_{R_p}}{k_1} \right| + |w_{R_2}| \end{cases} \quad (4.13)$$

d) Chaudière

La chaudière est considérée comme un accumulateur thermo-fluide saturé en configuration de mélange liquide-vapeur monophasique homogène.

Le stockage des énergies hydrauliques et thermiques est modélisé par l'élément à deux ports C: C_B. De: L₃, De: T₃, De: P₃ sont respectivement des capteurs de niveau, de température et de pression dans la chaudière, tandis que P_{out} est la pression imposée par la charge et supposée connue. La dissipation du flux de chaleur \dot{Q}_p de la chaudière vers l'environnement de température Ta à travers sa paroi est modélisée par l'élément R: Ra. Elle peut être déterminée en utilisant la conductivité thermique λ , l'épaisseur e_B et la section A_B de la paroi de la chaudière, par la relation suivante:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_p &= \lambda \frac{A_B}{e_B} \cdot (T_B - Ta) = Ka \cdot (T_B - Ta) \\ &= (Ka_n + \delta \cdot ka) \cdot (T_B - Ta) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Le coefficient de transfert thermique ($Ka = 1 / Ra$) est difficile à évaluer analytiquement. Par conséquent, la valeur nominale Ka_n et son incertitude δ_{ka} ont été identifiées expérimentalement en utilisant, l'équation de conservation de l'énergie de la jonction 0_{t2} du BG de la chaudière, et les données mesurées à partir du système lors d'un fonctionnement sain.

Donc, la source de flux de chaleur $MSf : w_{Ra} = \delta_{ka} \cdot (T_3 - Ta)$ de la figure 4.16 représente le flux supplémentaire fourni par l'incertitude sur les flux de pertes de chaleur thermiques.

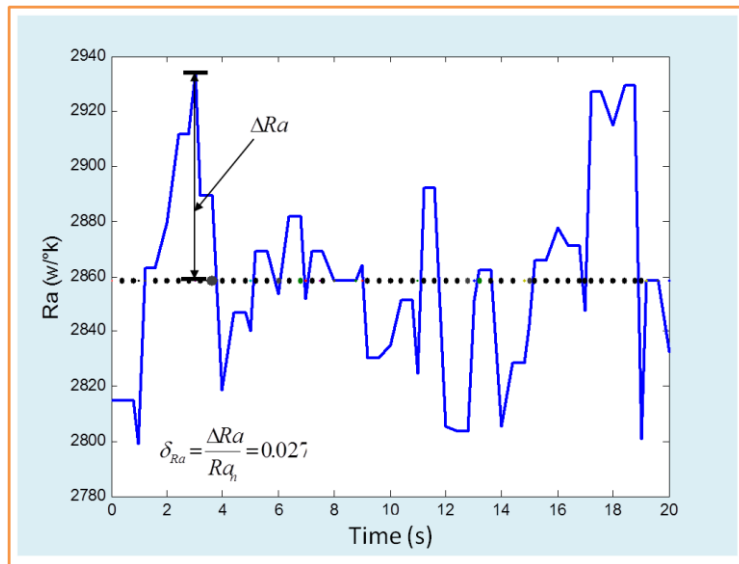


Fig.4.17. Valeur expérimentale des pertes thermiques du coefficient de transfert de chaleur

Les flux de masse (\dot{m}_B) et d'énergie (\dot{H}_B) stockés par la chaudière (modélisée par l'élément à deux ports C : C_B) dépend de la variation de la masse du mélange vapeur-liquide dans la chaudière, comme indiqué dans les équations (4.15).

$$\begin{aligned}\dot{m}_B &= \frac{d}{dt}(\rho_l \cdot V_l + \rho_v \cdot V_v) \\ \dot{H}_B &= \frac{d}{dt}(\rho_l \cdot h_l \cdot V_l + \rho_v \cdot h_v \cdot V_v \cdot V_B)\end{aligned}\quad (4.15)$$

Où $\rho_l(P_B), h_l(P_B), V_l(P_B)$ et $\rho_v(P_B), h_v(P_B), V_v(P_B)$ sont respectivement la densité, l'enthalpie spécifique et le volume du liquide et de la vapeur dans le mélange de la chaudière. Toutes ces variables sont fonctions de la variable de pression P_B (mesurée par le capteur $P_{3sensor}$) dans le régime thermodynamique saturé.

Les RRAs candidates associées à la chaudière sont générées à partir des jonctions 0_{h2} et 0_{l2} représentant la loi de conservation de masse: $\dot{m}_p - \dot{m}_B - \dot{m}_{out} = 0$, et la loi d'énergie: $\dot{H}_p - \dot{H}_B - \dot{H}_{out} - \dot{Q}_p + \dot{Q}_b = 0$, respectivement. En se basant sur l'algorithme d'élimination des variables inconnues précédent, nous obtenons les RRAs suivantes:

$$RRA_4 : \begin{cases} r_4 = F_2 - \frac{d}{dt}[\rho_l(P_3) \cdot L_3 + \rho_v(P_3) \cdot (V_B - L_3)] - \frac{1}{R_3} \sqrt{P_3 - P_{out}} \\ a_4 = |w_{C_{HB}}| \end{cases}\quad (4.16)$$

$$RRA_5 : \begin{cases} r_5 = F_2 \cdot c_{p_n} \cdot T_1 + Q_b - \frac{d}{dt}[\rho_l(P_3) \cdot h_l(P_3 \cdot L_3) + \rho_v \cdot h_v(P_3) \cdot (V_B - L_3)] - \frac{1}{Ra_n} \cdot (T_3 - T_0) - \\ F_3 \cdot c_{p_n} \cdot T_3 \\ a_5 = |w_{Ra}| + |w_{C_{TB}}| + |w_{c_p}| \end{cases}\quad (4.17)$$

La puissance fournie par le brûleur Q_b dépend du débit massique du combustible S_f : F_f contrôlé par la vanne Tout Ou Rien (TOR) V_4 , la valeur calorifique inférieure (PCI) du carburant et le signal booléen de contrôle u_3 fourni par le régulateur de pression PC_3 :

$$Q_b = F_f \cdot PCI \cdot u_3 \quad (4.18)$$

Le volume du liquide V_l est donné par le capteur de niveau L_3 , le volume de la vapeur V_v est égal à la différence entre le volume géométrique total de la chaudière V_B et V_l ($V_v = V_B - V_l$). ρ_l, ρ_v, h_l et h_v sont calculés en utilisant un algorithme d'interpolation polynomiale. En prenant en compte les incertitudes sur les variables $\rho_l, h_l, V_l, \rho_v, h_v$ et V_v , les incertitudes sur la capacité hydraulique ($w_{C_{HB}}$) et la capacité thermique ($w_{C_{TB}}$) (modélisées dans le bond graph par des sources de flux modulées) sont données comme suit:

$$w_{C_{HB}} = \delta_{C_{h2}} \cdot \frac{d}{dt}(\rho_{l_n} \cdot V_{l_n} + \rho_{v_n} \cdot V_{v_n}) \quad (4.19)$$

$$w_{C_{TB}} = \delta_{C_{12}} \cdot \frac{d}{dt} (\rho_{l_n} \cdot h_{l_n} \cdot V_{l_n} + \rho_{v_n} \cdot h_{v_n} \cdot V_{v_n}) \quad (4.20)$$

Où: $\delta_{C_{h2}} = \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{V_l} + \delta_{\rho_l} + \delta_{V_l} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{V_v} + \delta_{\rho_v} + \delta_{V_v}$

$$\delta_{C_{12}} = \delta_{h_l} + \delta_{V_l} \cdot \delta_{h_l} + \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{h_l} + \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{V_l} \cdot \delta_{h_l} + \delta_{h_v} + \delta_{V_v} \cdot \delta_{h_v} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{h_v} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{V_v} \cdot \delta_{h_v}$$

δ_{xx} représente les erreurs d'estimation de l'algorithme d'interpolation polynomiale, déduites de la table thermodynamique.

Selon le modèle de la figure 4.16, le flux d'enthalpie de sortie de la chaudière vers le reste de l'usine peut être calculé comme suit:

$$\dot{H}_{out} = T_B \cdot c_p \cdot \dot{m}_B \quad (4.21)$$

Où c_p est la capacité thermique de la vapeur à une pression constante. L'incertitude sur le flux de chaleur à la sortie de la chaudière est due à l'incertitude δ_{c_p} . Cette dernière correspond à l'erreur d'estimation de l'algorithme d'interpolation polynomiale utilisé pour calculer c_{p_n} . Donc, la source de flux MSf: w_{c_p} est modulée comme suit:

$$w_{c_p} = -\delta_{c_p} \cdot (T_3 \cdot c_{p_n} \cdot F_3) \quad (4.22)$$

Les capteurs de température et de pression (De: T_3 et De: P_3) ne peuvent pas être dualisés tous les deux, donc, ils forment une redondance matérielle:

$$RRA_6 : T(P_3) - T_3 \quad (4.23)$$

$T(P_3)$ est la fonction de température saturée de la pression, calculée en utilisant un algorithme d'interpolation polynomiale.

D'autres RRAs qui concernent les régulateurs sont également générées :

$$\begin{cases} RRA_7 = u_1 - LC_1(L_1, L_{1ref}) \\ RRA_8 = u_2 - LC_2(L_2, L_{2ref}) \\ RRA_9 = u_3 - PC_3(P_3, P_{3ref}) \end{cases} \quad (4.24)$$

4.5.6.5 Système de surveillance en mode de démarrage

Dans ce mode, l'eau est chauffée jusqu'à évaporation, la qualité de l'eau (x) est égale à zéro. Il n'y a pas de vapeur qui coule vers le reste de l'usine. Les indicateurs de défauts (RRAs) générés du modèle BG sont donnés par les équations (4.25).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 RRA_1 = \frac{1}{R_1} \cdot u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} - C_{h_n} \cdot \rho_w \cdot g \cdot \frac{dL_1}{dt} - F_2 \\
 RRA_2 = \frac{1}{R_1} \cdot u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \cdot C_{p_n} \cdot T_i - T_1 \cdot C_{p_n} \cdot F_2 - C_{t_n} \cdot \rho_w \cdot g \cdot \frac{d}{dt} [L_1 \cdot T_1] \\
 RRA_3 = -(u_3 \cdot R_{2_n} \cdot F_2)^2 - \frac{k_2}{k_1} - P_3 - \frac{F_2}{k_1} + \rho_w \cdot g \cdot L_1 \\
 RRA_4 = F_2 - C_{h_n} \cdot \frac{dP_3}{dt} \\
 RRA_5 = F_2 \cdot c_{p_n} \cdot T_1 + Q_b - c_{p_n} \cdot \rho_w \cdot g \cdot \frac{d(L_3 T_3)}{dt} \\
 RRA_6 = \frac{P_3}{\rho_w \cdot g} - L_3 \\
 RRA_7 = u_1 - LC_1(L_1, L_{1ref}) \\
 RRA_8 = u_2 - LC_2(L_2, L_{2ref}) \\
 RRA_9 = u_3 - PC_3(P_3, P_{3ref})
 \end{array} \right. \quad (4.25)$$

4.5.6.6 Analyse de la surveillabilité

La capacité de détecter et d'isoler les défauts est évaluée hors ligne par la Matrice de Signatures des fautes (FSM). Les spécifications techniques (quel composant doit être surveillé) sont déterminées au préalable, en faisant une analyse fonctionnelle du système. Cette analyse peut être réalisée à l'aide d'une boîte à outils dédiée FDIpad [23]. Les RRAs et la FSM dans ce cas, sont générées automatiquement à partir d'un modèle bond graph.

Ce modèle est construit à partir de l'interconnexion de différents sous-systèmes sous une forme iconique, tirés d'une bibliothèque générique de modèles BG (Fig.4.18).

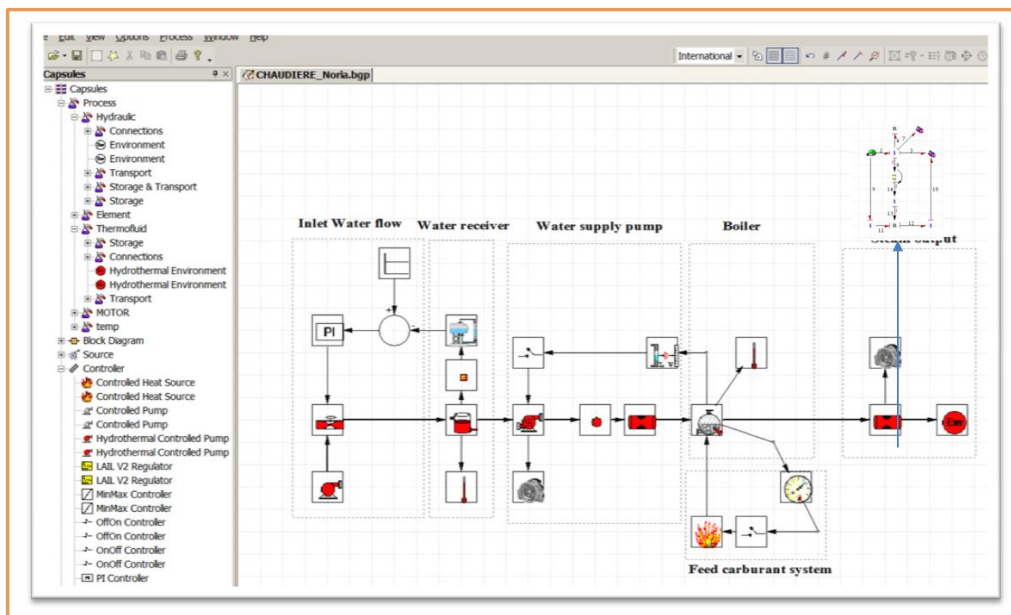


Fig.4.18. Générateur de modèles à base de graphes fonctionnels et de bond graphs

La FSM déduite du modèle bond graph dans les modes nominal et de démarrage est donnée en Fig.4.19.

En mode nominal 8 composants pertinents peuvent être détectés et isolés et 7 composants en mode de démarrage. Cependant, un placement de capteur graphique peut être proposé dans le logiciel, pour améliorer les performances de la surveillance. Par exemple, on peut ajouter un capteur de débit de carburant supplémentaire (Fig.4.20 (b)). Ainsi, tout défaut pouvant affecter le brûleur devient désormais détectable et isolable (Fig.4.20 (a)), 10 composants pertinents peuvent être détectés et isolés.

4.5.6.7 Résultats expérimentaux

Le scénario de simulation consiste en une implémentation réelle des résidus robustes générés en utilisant le système Dspace de Matlab Simulink. Les seuils des résidus ($|a|$) sont acquis à partir des données réelles du processus. L'objectif est de tester la robustesse du module FDI et sa capacité à fournir l'état des composants en temps réel, et en particulier la liste des composants défectueux.

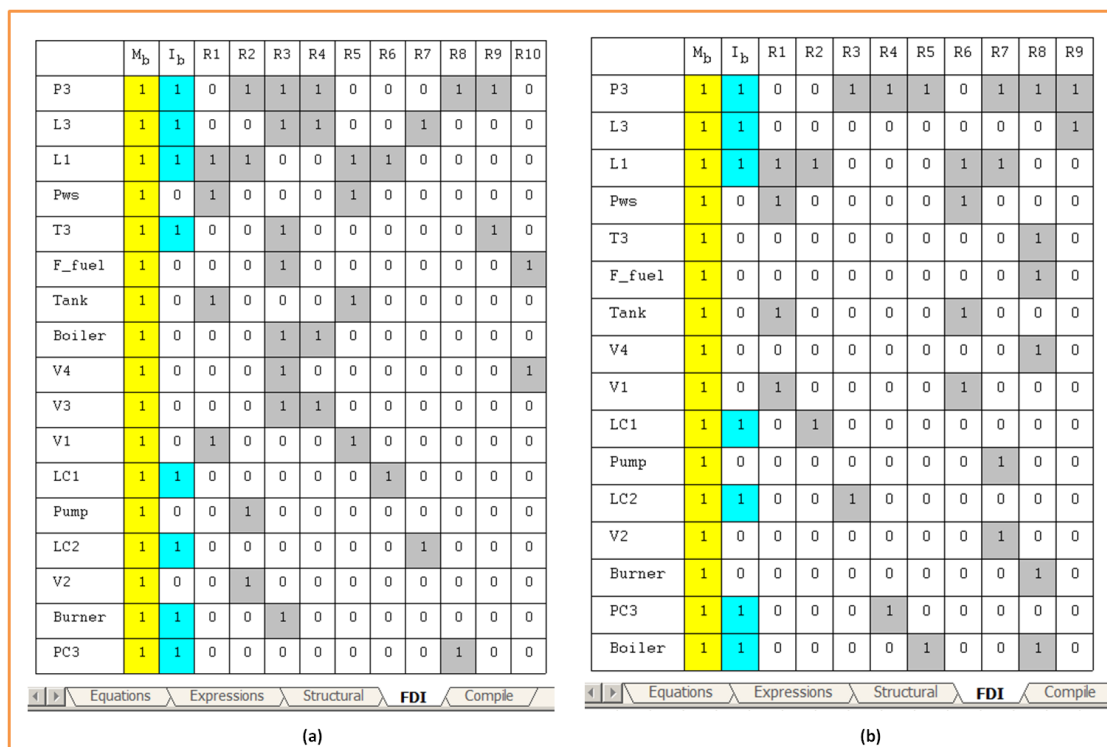


Fig. 4.19. Analyse de la surveillabilité des modes de fonctionnement (a) nominal et (b) de démarrage

La valeur détectable du défaut Y_D peut être évaluée. Cette valeur représente la capacité du résidu à détecter un défaut physique (c'est-à-dire, qu'elle permet d'évaluer la valeur à partir de laquelle le défaut est sûrement détectable), où son énergie est supérieure à celle introduite par les l'ensemble des incertitudes: Y_D peut être défini comme suit: $Y_D = \sum |w_i|$.

La figure 4.21 montre la réaction des résidus r_1, r_2, r_4 et r_5 dans une situation saine. Rappelons que le résidu r est l'évaluation de la RRA ($r = \text{eval}(\text{RRA})$). Les résidus sont à l'intérieur des seuils fixés (représentant les incertitudes des paramètres).

La première situation de défaut est testée en introduisant une fuite d'eau dans le réservoir (en ouvrant la vanne de vidange), la première RRA (RRA_1) générée de la loi de conservation de masse (jonction 0_{h1}) est sensible à ce défaut. La valeur détectable de la fuite du fluide est évaluée en utilisant l'incertitude $|w_{C_{h1}}|$ (Equ. 4.5). En Fig.4.21 est donnée la réaction du résidu. Ce défaut est détectable mais pas isolable (sa signature (Fig.4.19 (a)) n'est pas unique, c'est-à-dire, $I_b=0$).

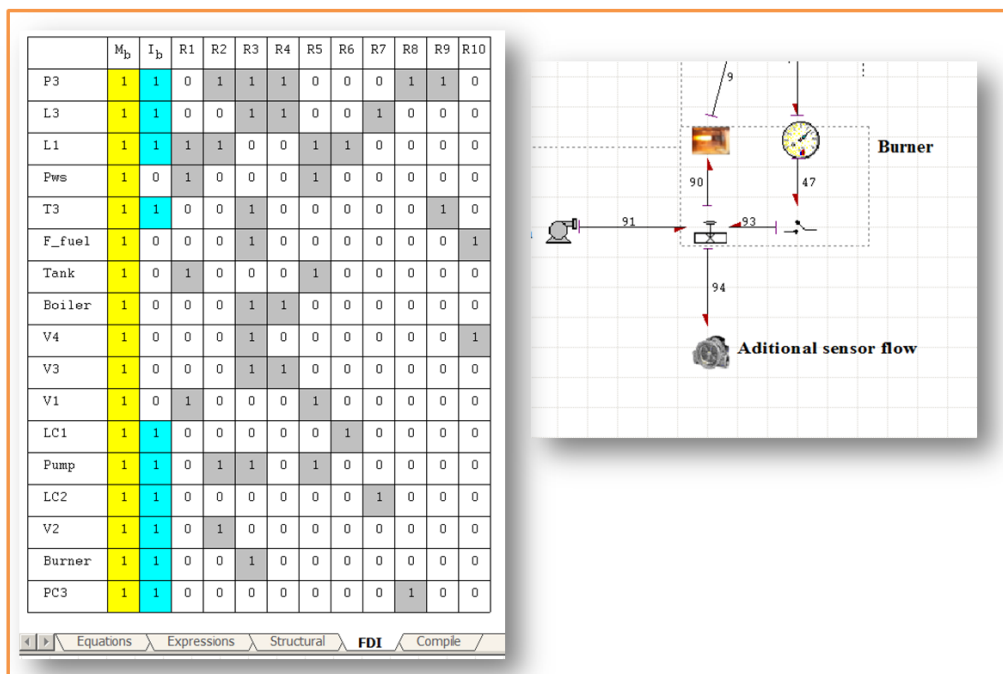


Fig.4.20. (a) Placement de capteurs additionnels (b) Analyse de la surveillabilité après ajout de capteurs

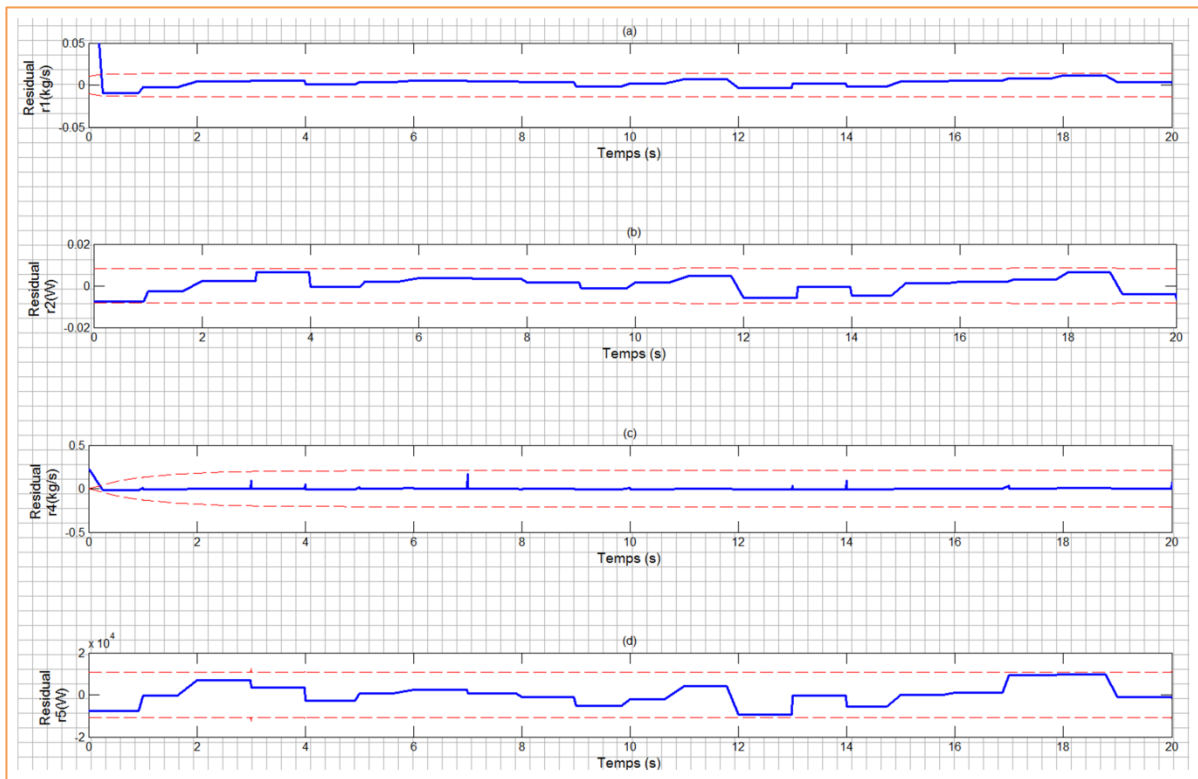


Fig.4.21. Réaction des résidus en mode de fonctionnement sain

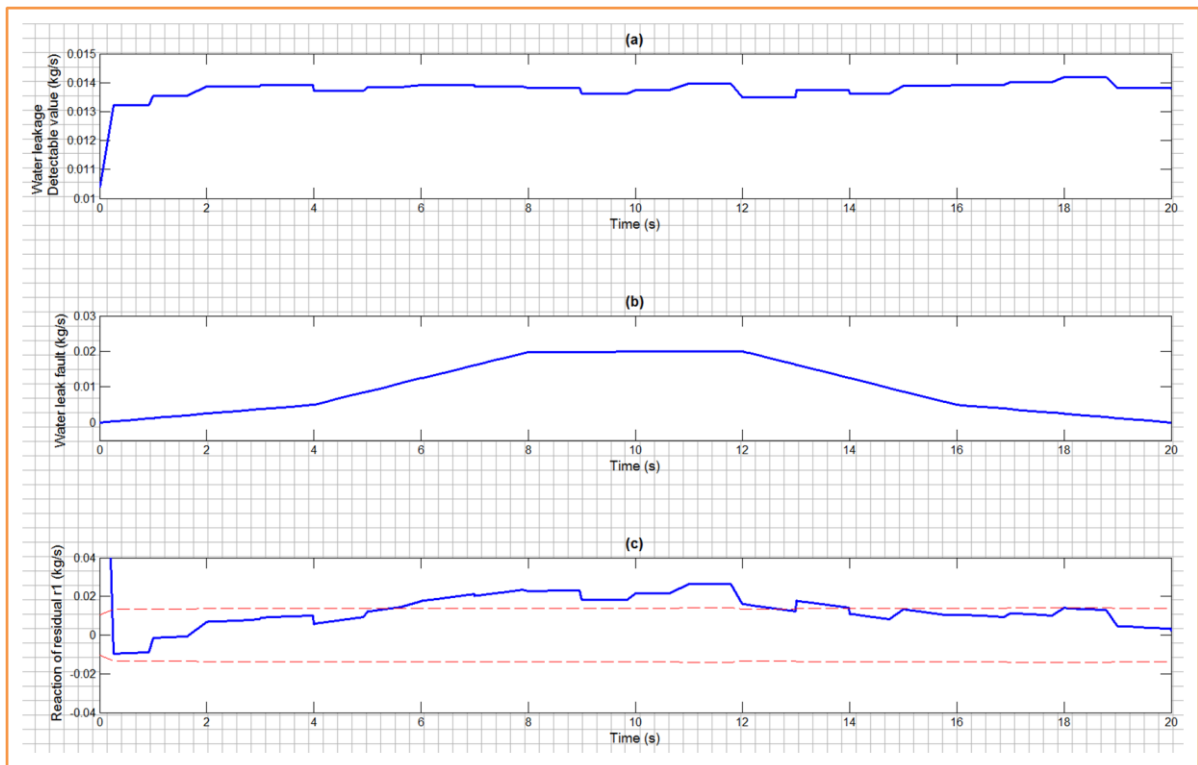


Fig.4.22. Valeur détectable de la fuite du réservoir (a), défaut introduit (b) et réaction du résidu r_1 (c)

Dans la suite de ce chapitre, nous avons choisi d'appliquer l'approche de supervision développée, dans son intégralité sur le brûleur industriel. Le choix de ce composant est motivé par l'importance et la criticité de ce dernier dans le processus de génération de vapeur considéré. La description technique de l'équipement et le principe de son fonctionnement seront présentés dans ce qui suit.

4.5.7 Composition du brûleur

La fonction principale d'un brûleur est de réaliser le triangle du feu (combustible, comburant et chaleur). Ceci en assurant :

- l'amenée du gaz et de l'air,
- le mélange entre carburant et air comburant avec les bonnes proportions pour permettre une combustion efficace,
- l'arrivée du mélange à la température d'inflammation afin de le brûler et enfin,
- le maintien de la flamme, en continuant d'amener l'air et le gaz en bonne proportion.

Le brûleur utilisé dans l'installation étudiée est un brûleur Weishaupt gaz à air soufflé, il est composé de quatre circuits (Fig.4.23):

- Le circuit d'alimentation en gaz naturel, appelé aussi rampe de gaz (détendeur, filtres, électrovannes,...).
- Le circuit d'alimentation en air (ventilateur, volet, ...).
- Le circuit électrique (électrodes d'allumage, moteur, ...)
- Le circuit de mélange (tête de combustion).

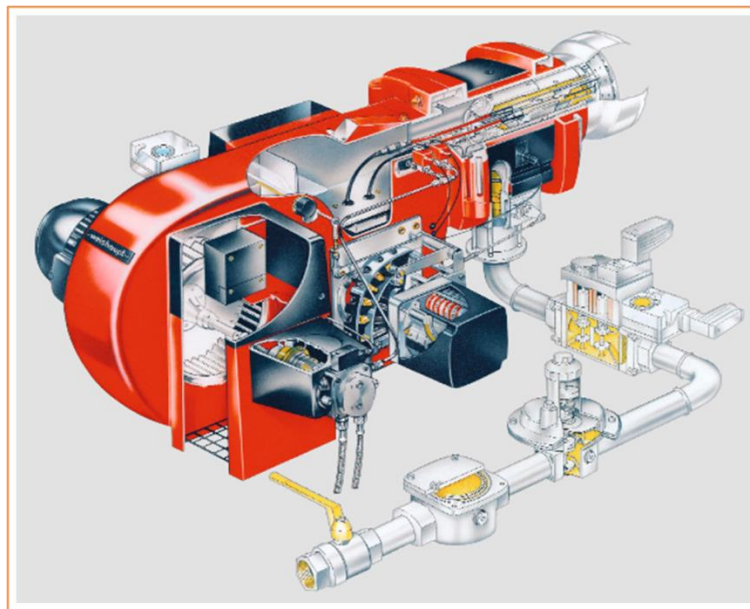


Fig. 4.23. Composants du brûleur Weishaupt

Le brûleur Weishaupt utilisé est raccordé également avec des organes externes, qui lui

fournissent des éléments nécessaires à son bon fonctionnement [208]. Le schéma synoptique de Fig.4.24 représente ces raccordements.

Le brûleur utilisé échange avec l'extérieur un ensemble de flux de matière (air, gaz) et de signaux. Ces derniers proviennent des organes externes qui lui sont raccordés. Trois servomoteurs permettent de contrôler et de réguler les débits du carburant et du comburant reçus par le brûleur. Des signaux électriques sont échangés entre le brûleur et l'automate programmable industriels (API), afin de permettre de suivre et de gérer les différents modes qui constituent le cycle de fonctionnement du brûleur.

Les différents détecteurs du brûleur envoient les informations acquises du système vers l'API, afin de lui fournir une image en temps réel de l'état des organes de ce dernier. Les actionneurs à retour de positions tels que les électrovannes envoient également des signaux à l'API, pour l'informer de leur état (exemple pour les vannes : ouvertes ou fermées, angle d'ouverture, diamètre d'ouverture, ...).

L'automate industriel envoie à son tour des signaux électriques vers les actionneurs du brûleur permettant d'agir sur le système. Ceci sera exploité par la suite, pour la tolérance aux fautes.

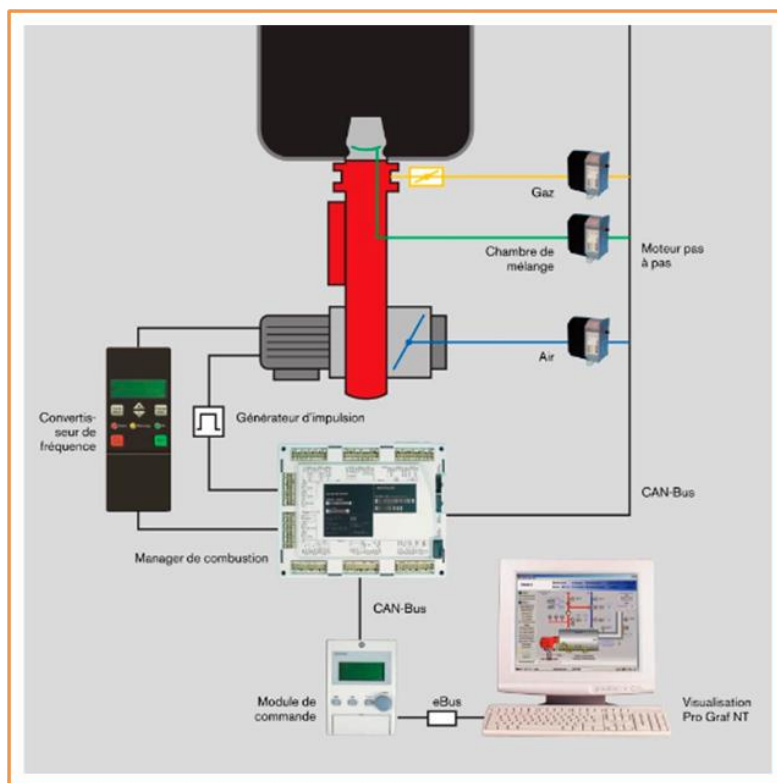


Fig. 4.24. Brûleur gaz avec raccordements externes [209]

4.5.8 Supervision du brûleur

L'un des taux les plus élevés de défauts touchant les systèmes à chaudières, concerne l'alimentation en combustible, qui est la principale source d'expulsion de produits dangereux et d'explosions. Cinq des accidents courants concernant l'alimentation en combustible sont à l'origine d'une explosion au niveau du foyer de la chaudière dû à un mélange entre l'air et le gaz dans la zone d'explosivité [297]. Ces conséquences peuvent être suivies par de considérables effets d'accès de pression extérieure ainsi que le jet de débris sur de longues distances.

Par conséquent, nous avons porté notre plus grande attention dans ce travail à la supervision des trois premiers circuits du brûleur, et en particulier la chaîne d'alimentation en gaz naturel.

Dans ce qui suit, nous allons décrire chacun de ces circuits, en énumérant ses différents composants et en présentant son principe de fonctionnement.

a) Rampe de gaz

Sur cette chaîne, nous pouvons distinguer les éléments suivants (Fig.4.25) :

- Un robinet d'isolement (à bille), permettant la coupure de l'arrivée du gaz du réseau de distribution.
- Un filtre gaz
- Un régulateur de gaz basse pression (BP) : permettant de maintenir une pression constante, en dépit des variations de pression dans le réseau de distribution.
- Des pressostats gaz Min et Max : ce sont des appareils qui permettent de signaler l'atteinte ou le dépassement de la pression minimale ou maximale, lorsque ceci se produit.
- Deux vannes magnétiques de classe A (vanne double DMV): permettant le réglage du débit de gaz, fourni au brûleur.
- Une électrovanne d'allumage
- Un clapet gaz, commandé par un servomoteur.
- Un contrôleur d'étanchéité : permettant de vérifier l'étanchéité des deux vannes magnétiques.
- Un manomètre avec robinet à poussoir : permettant de connaître la pression de gaz à la demande.

Dans la phase d'allumage, le gaz est libéré par la vanne d'allumage pilote. Après l'écoulement d'une temporisation de 10s, la vanne magnétique principale (DMV) s'ouvre, et la vanne d'allumage se referme. Le clapet gaz s'ouvre progressivement (en un temps de 20s) grâce au servomoteur qui le commande. La régulation du débit peut être obtenue par l'ouverture ou la fermeture du clapet.

Il est à noter que la pression du gaz au niveau de la soupape d'entrée est de 300mbar (pression fournie par le réseau de distribution).

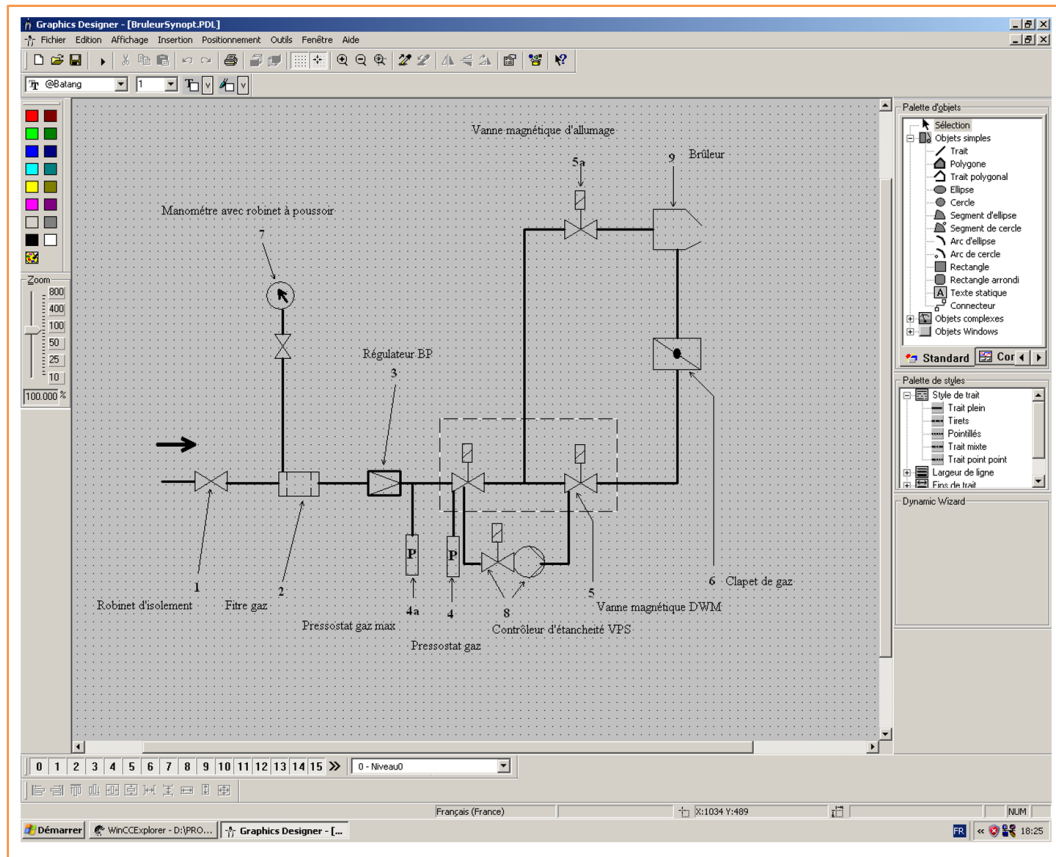


Fig.4.25. PID de la rampe de gaz (avec Graphics Designer)

b) Circuit d'air

Le rôle du circuit aéraulique est d'amener suffisamment d'air pour la combustion, et d'en régler le débit.

L'air comburant doit être mélangé avec une quantité strictement nécessaire à la combustion complète du gaz ; dans le pire des cas, un très faible excès de l'air est observé. Aux conditions normales de température et de pression (0°C et 1013 mbar), le débit d'air pour brûler 1m³ de gaz naturel varie entre 10 et 13 m³.

La chaine d'alimentation en comburant est constituée principalement d'un ventilateur (moteur électrique + turbine) centrifuge, qui puise l'air ambiant de l'usine, avec une vitesse de rotation constante égale à 2900tr/min, et d'un volet d'air commandé par un servomoteur, permettant de régler le débit d'air entrant. Ce débit est adapté en continu au débit de gaz (selon la puissance souhaitée).

Il est à noter qu'il est possible de régler la tête de combustion, grâce à un servomoteur qui lui est associé. Ceci augmentera la quantité d'air circulant vers la chambre de mélange, ce qui est essentiel au bon fonctionnement du brûleur.

c) Circuit électrique

Le mélange air-gaz est allumé, grâce à un arc électrique produit à l'extrémité des électrodes d'allumage, suite au passage d'un courant électrique d'une tension élevée. En effet, le transformateur (haute tension) élève la tension de 230V à 10000V environ pour pouvoir créer cet arc. Tous les organes raccordés par des fils conducteurs font partie également du circuit électrique du brûleur.

4.5.9 Principe de fonctionnement du brûleur

Le principe général de fonctionnement d'un brûleur à air soufflé peut être résumé dans le diagramme de la figure 4.26. Le brûleur considéré par notre étude est de type Weishaupt RGL70, progressif à 2 allures ; le passage entre le petit débit et le grand débit se fait d'une façon progressive.

Le démarrage du brûleur se fait avec un petit débit, la flamme s'établit alors d'une façon stable. Après l'écoulement d'une temporisation, le grand débit est alors libéré. Avant l'arrêt, le brûleur revient au petit débit.

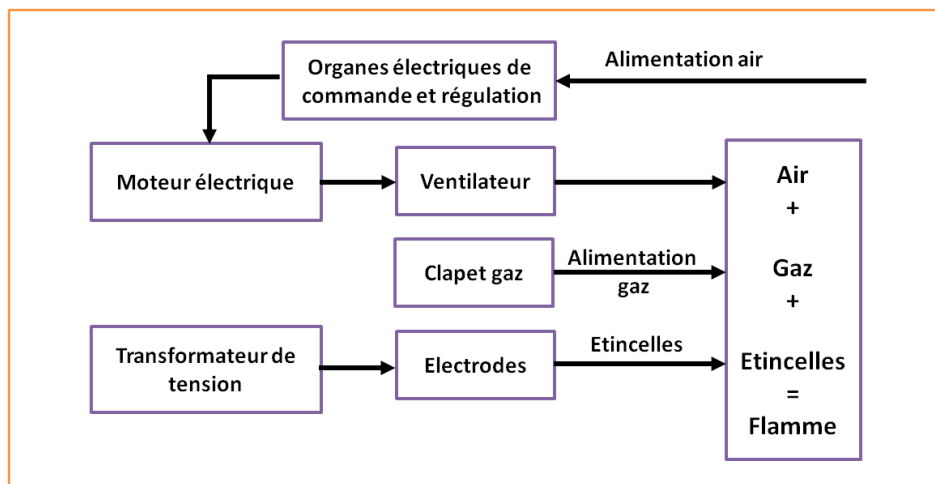


Fig. 4.26. Principe de fonctionnement d'un brûleur à air soufflé [210]

4.5.10 Modélisation du fonctionnement du brûleur

Afin de bien gérer le fonctionnement du brûleur, nous avons modélisé ce dernier par un automate hybride, qui décrit les différents modes de fonctionnement par lesquels transite le brûleur afin d'assurer ses fonctions.

Nous pouvons distinguer 30 phases qui constituent le cycle de fonctionnement (en commençant par le mode 10, et en terminant par le mode 78), dont 2 sont réservées aux cas de défauts qui ne sont pas tolérables ; ce sont les modes de sécurité relatifs au brûleur (modes 00 et 01).

La représentation du comportement du brûleur par un AH, nous permettra de suivre l'évolution de l'exécution du cycle de fonctionnement, étape par étape. Nous nous sommes basés principalement sur le diagramme représentant la séquence de fonctionnement gaz avec allumage pilote [208] (voir Annexe), pour établir ce modèle.

Les contraintes ont été mises sous une forme adaptée au principe de fonctionnement des APIs : utilisation des variables Tout Ou Rien, temporisations, bornage des variables.

Pour une raison de clarté et de visibilité du modèle, nous avons choisi de représenter ici seulement un extrait du modèle global (Fig 4.27). La représentation des autres modes se base sur le même principe.

L'AH obtenu permet de gérer le fonctionnement nominal du brûleur, avec la prise en considération de certains défauts critiques, où les composants affectés ne sont pas redondants. Ces défauts ne sont donc pas tolérables. Leur apparition déclenchera automatiquement la transition vers un mode, où le système sera mis en sécurité. L'autre type de défauts, c'est à dire, celui que nous pouvons tolérer, n'est pas représenté dans ce modèle.

Le comportement du système de supervision dans ce cas de figure sera décrit par la suite.

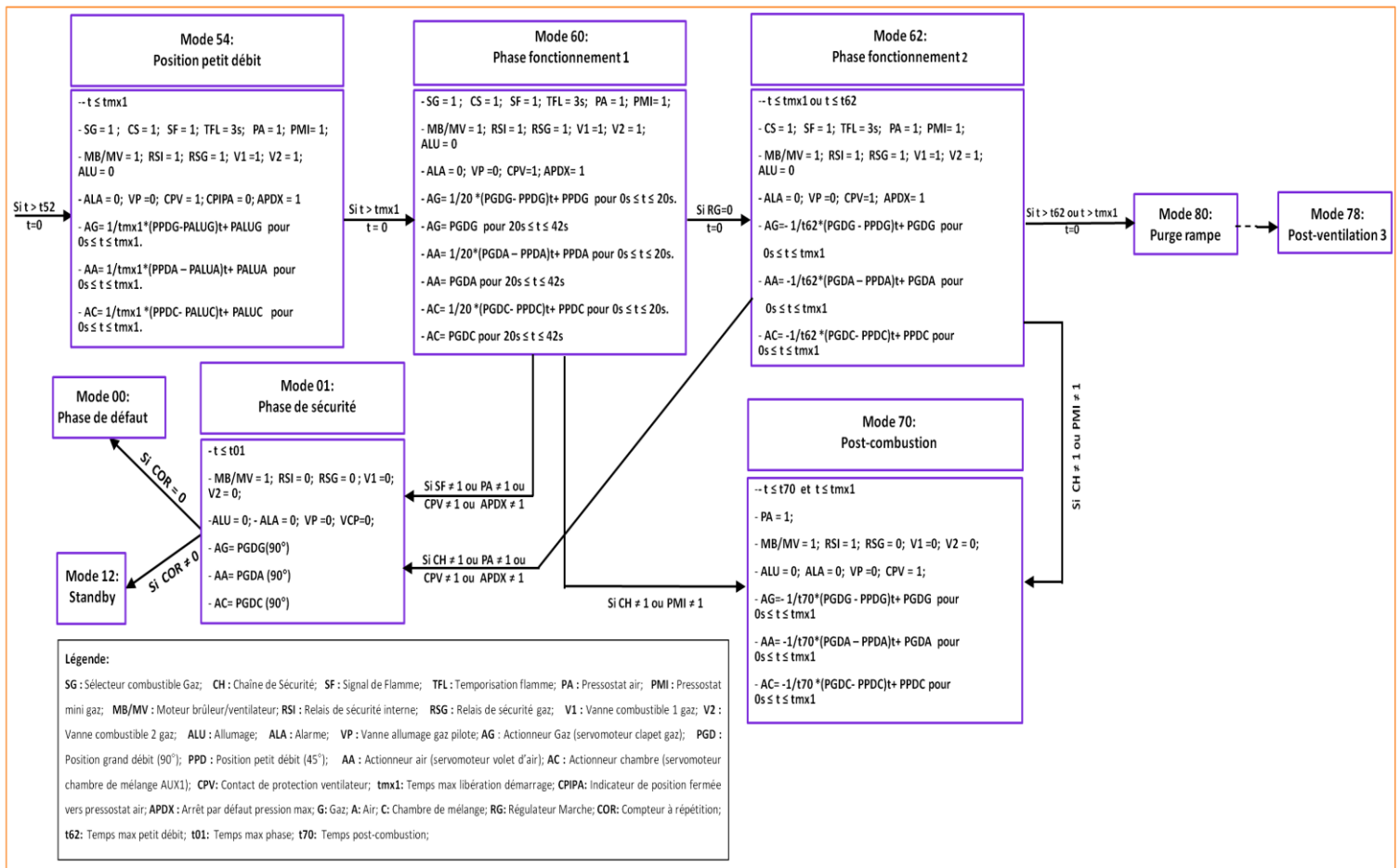


Fig.4.27. Extrait du modèle de gestion des modes de fonctionnement du brûleur

4.5.11 Modélisation du brûleur pour la surveillance

4.5.11.1 Système considéré pour la surveillance

Pour la surveillance du brûleur, nous avons considéré les sous-systèmes illustrés dans les figures 4.28, 4.29 et 4.30, qui représentent respectivement les composants à surveiller au niveau des circuits de gaz, d'air et du circuit électrique. Nous voulons également surveiller le sous-système de réglage de la chambre de mélange, constitué d'un servomoteur permettant le déplacement vers l'avant ou vers l'arrière de la tête de combustion, afin de permettre à une plus grande quantité d'air de circuler.

Les différents composants faisant partie de la rampe de gaz considérée pour la modélisation bond graph sont montrés dans le schéma suivant :

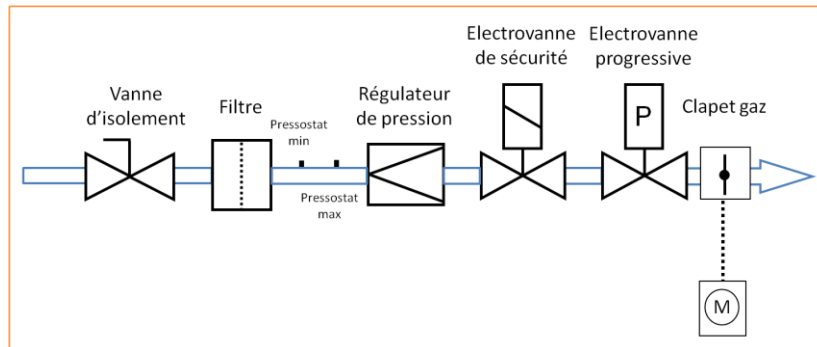


Fig. 4.28. Partie considérée de la rampe de gaz

La partie considérée pour la modélisation bond graph en vue de surveillance, dans le circuit aéraulique est donnée en Fig. 4.29.

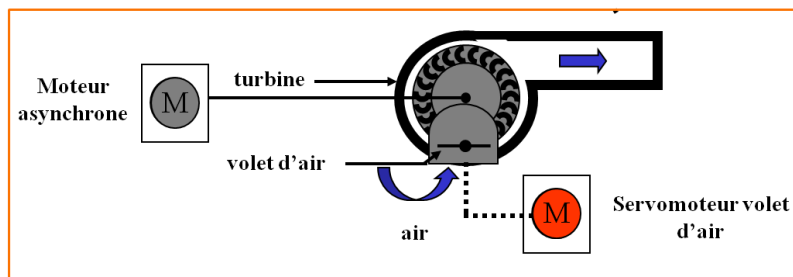


Fig. 4.29. Partie considérée du circuit aéraulique

La partie considérée pour la surveillance, dans le circuit électrique est donnée en Fig. 4.30.

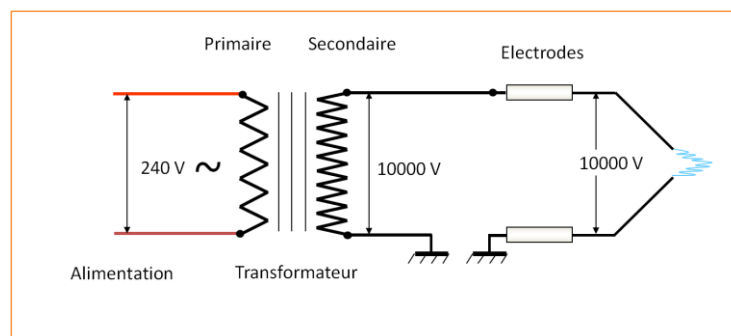


Fig. 4.30. Schéma de principe du transformateur haute tension [211]

4.5.11.2 Modèle Bond graph du système

Vu que les étapes de modélisation par bond graph ont été bien détaillées pour le processus de génération de vapeur, dans les sections précédentes. Nous allons présenter dans cette section directement les modèles obtenus pour le brûleur.

Le bond graph à mots du brûleur est représenté dans la figure 4.31.

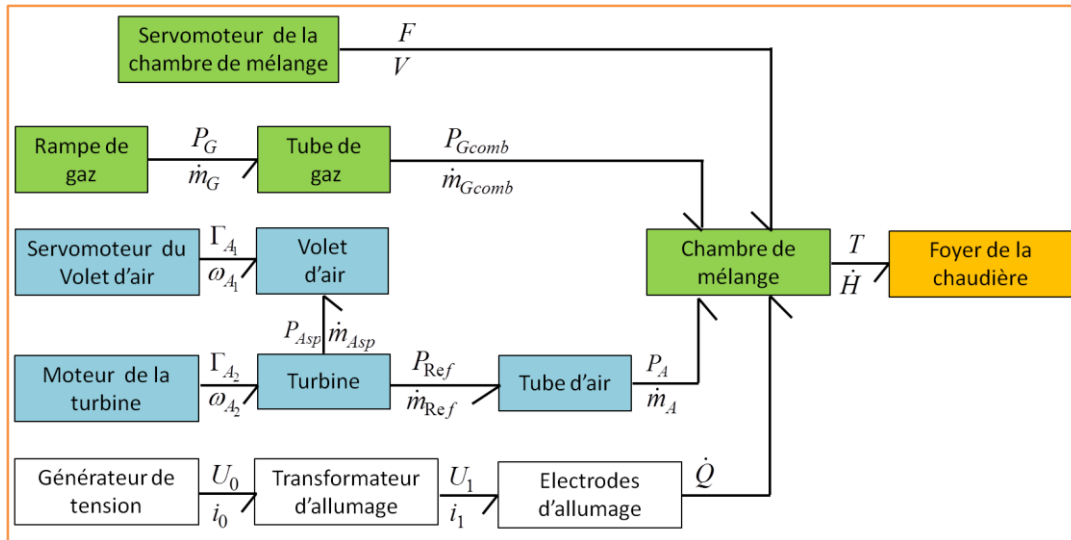


Fig.4.31. BG à mots du brûleur

Le modèle BG global du brûleur est donné en figure 4.32. Pour la représentation BG-LFT nous avons choisi de présenter ici le modèle de la rampe de gaz (Fig. 4.33), en considérant les incertitudes sur les deux vannes magnétiques (DMV) et sur le clapet gaz. En effet, nous nous intéressons dans cette section à la surveillance de ces trois éléments.

Par conséquent, nous avons obtenu deux RRAs de ce modèle, en suivant la même procédure décrite en détail pour l'ensemble du procédé de génération de vapeur.

À partir de la jonction $J_1(1:\dot{m}_{G_1})$, nous obtenons les relations suivantes :

$$\begin{cases} Se - e_{R_I} - e_{R_{fz}} - e_{R_{BP}} - e_{R_{V1}} - e_2 = 0 \\ f_{R_I} = f_{R_{fz}} = f_{R_{BP}} = f_{R_{V1}} = f_2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} P_G - P_{R_I} - P_{R_{fz}} - P_{R_{BP}} - P_{R_{V1}} - P_2 = 0 \\ \dot{m}_{R_I} = \dot{m}_{R_{fz}} = \dot{m}_{R_{BP}} = \dot{m}_{R_{V1}} = \dot{m}_2 \end{cases} \quad (4.26)$$

Afin d'éliminer les variables inconnues, nous parcourons les chemins causaux suivants :

$$\begin{aligned} P_G &\rightarrow Se_G : P_{G_1} \\ P_{R_I} &\rightarrow C_{R_I} \rightarrow \dot{m}_{R_I} \rightarrow C_{m_1} \rightarrow SSf : \dot{m}_{G_1} \\ P_{R_{fz}} &\rightarrow C_{R_{fz}} \rightarrow \dot{m}_{R_{fz}} \rightarrow C_{m_1} \rightarrow SSf : \dot{m}_{G_1} \\ P_{R_{BP}} &\rightarrow C_{R_{BP}} \rightarrow \dot{m}_{R_{BP}} \rightarrow C_{m_1} \rightarrow SSf : \dot{m}_{G_1} \\ P_{R_{V1}} &\rightarrow C_{R_{V1}} \rightarrow \dot{m}_{R_{V1}} \rightarrow C_{m_1} \rightarrow SSf : \dot{m}_{G_1} \\ P_2 &\rightarrow C_{J_0} \rightarrow P_{G_1} \rightarrow C_{m_2} \rightarrow SSe : P_{G_2} \end{aligned}$$

Après substitution des variables inconnues dans l'équation 4.26, nous obtenons la première RRA nominale (sans incertitudes), comme suit :

$$RRA_{1Bn} = P_{G_1} - R_I \cdot \dot{m}_{G_1} - R_{fz} \cdot \dot{m}_{G_1} - R_{BP} \cdot \dot{m}_{G_1} - R_{V1} \cdot \dot{m}_{G_1} - P_{G_2} \quad (4.27)$$

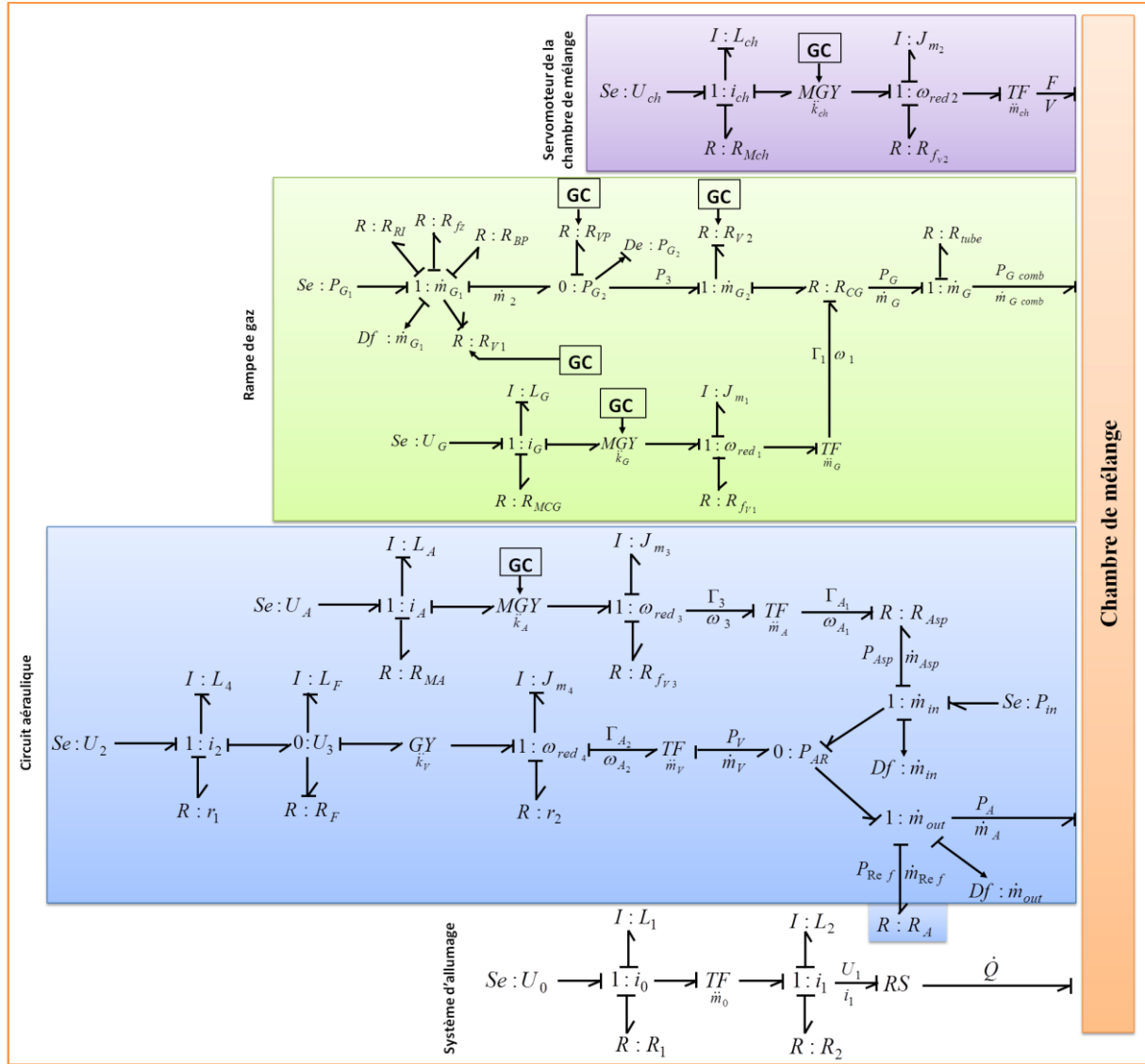


Fig. 4.32. Modèle BG global du brûleur

La deuxième RRA nominale est obtenue à partir de la contrainte de structure de la jonction $J_2(1:\dot{m}_{G_2})$:

$$RRA_{2Bn} = P_{G_2} - \left(R_{CG} + \frac{1}{R_{V_2}} \right) \left(\dot{m}_{G_1} - \frac{1}{R_{VP}} \cdot P_{G_2} \right) \quad (4.28)$$

En prenant en compte les incertitudes paramétrique, nous obtenues les RRAs robustes suivantes :

$$RRA_{1B} = P_{G_1} - R_I \cdot \dot{m}_{G_1} - R_{fz} \cdot \dot{m}_{G_1} - R_{BP} \cdot \dot{m}_{G_1} - R_{V1} \cdot \dot{m}_{G_1} - P_{G_2} + \delta_{R_{V1}} \cdot R_{V1} \cdot \dot{m}_{G_1} \quad (4.29)$$

$$RRA_{1B} = RRA_{1Bn} + w_1$$

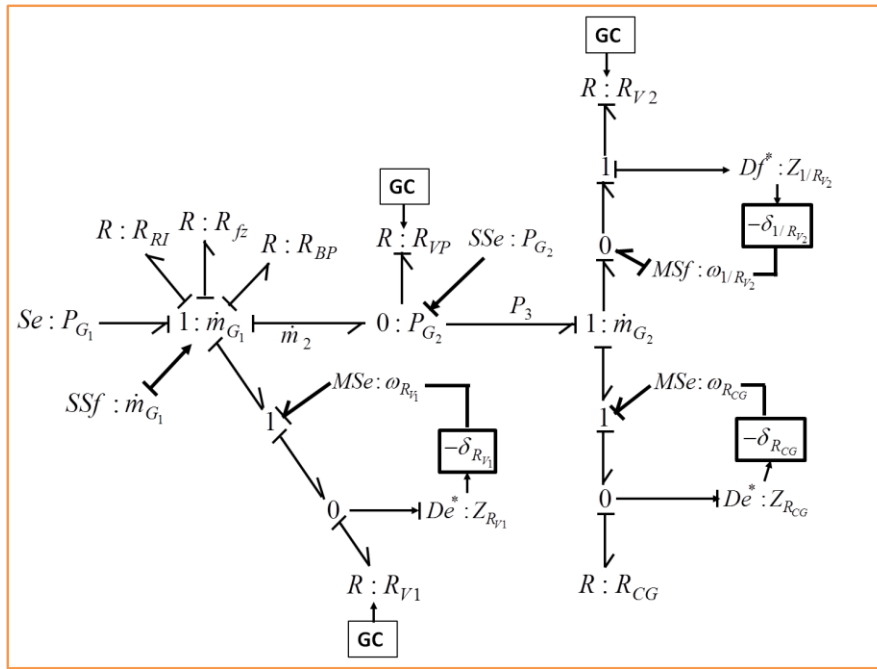


Fig. 4.33. BG-LFT de la rampe gaz en causalité dérivée

$$\begin{aligned}
 RRA_{2B} = P_{G_2} - \left(R_{CG} + \frac{1}{R_{V_2}} \right) \left(\dot{m}_{G_1} - \frac{1}{R_{VP}} \cdot P_{G_2} \right) + \delta_{CG} \cdot R_{CG} \cdot \left(\dot{m}_{G_1} - \frac{1}{R_{VP}} \cdot P_{G_2} \right) + \\
 \delta_{1/R_{V_2}} \cdot \frac{1}{R_{V_2}} \cdot \left(\dot{m}_{G_1} - \frac{1}{R_{VP}} \cdot P_{G_2} \right) \quad (4.30)
 \end{aligned}$$

$$RRA_{2B} = RRA_{2Bn} + w_2$$

Le seuil adaptatif $a = \sum |w_i|$ est choisi tel que : $-a \leq r \leq a$. Pour la rampe de gaz, les seuils pour les deux RRAs sont :

$$a_1 = \left| \delta_{R_{V_1}} \cdot R_{V_1} \cdot \dot{m}_{G_1} \right|$$

$$a_2 = \left| \delta_{CG} \cdot R_{CG} \cdot \left(\dot{m}_{G_1} - \frac{1}{R_{VP}} \cdot P_{G_2} \right) \right| + \left| \delta_{1/R_{V_2}} \cdot \frac{1}{R_{V_2}} \cdot \left(\dot{m}_{G_1} - \frac{1}{R_{VP}} \cdot P_{G_2} \right) \right|$$

Avec :

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R_n} \quad \text{et} \quad \delta_{1/R} = \frac{-\Delta R}{R_n + \Delta R}, \quad \text{où } \Delta R \text{ est l'incertitude additive. Dans notre cas, puisqu'il s'agit}$$

de composants matériels (vannes), la valeur nominale de R est donnée par le constructeur avec une incertitude bornée.

4.5.12 Tolérance aux fautes au niveau du brûleur

Afin de bien illustrer l'approche de tolérance aux fautes proposée, et bien décrite dans

les premières sections de ce chapitre, nous avons décidé de l'appliquer sur le brûleur, dans ses deux phases de fonctionnement (modes 60 et 62). Les contraintes à respecter pour exécuter ces deux modes en cas de fonctionnement nominal sont représentées en Fig 4.27. Le cas où des défauts non tolérables apparaissent est également pris en compte par l'AH de gestion de fonctionnement.

Nous allons donc considérer dans cette section, le cas des défauts tolérables, c'est à dire, pour lesquels nous avons prévu des techniques nous permettant de maintenir le fonctionnement du système, le plus proche du cas nominal, en attendant de corriger le défaut apparu.

Le bon déroulement du cycle de fonctionnement du brûleur nécessite la satisfaction d'un bon nombre de contraintes. Certaines d'entre elles concernent les modes de fonctionnement, d'autres concernent les transitions entre ces modes.

Parmi ces contraintes, il y en a certaines qu'il faut impérativement satisfaire, et sur les quelles on ne peut accepter de dégradation, parce qu'elles sont soit satisfaites ou pas, il n'y a pas d'autres alternatives. Par exemple : la chaîne de sécurité doit être activée dans ces deux modes, le contact qui lui est associé doit être alors fermé, la valeur envoyée à l'automate industriel dans ce cas est 1(cette valeur ne peut être que 0 ou 1). Un défaut sur la chaîne de sécurité ne peut être toléré. Si la contrainte n'est pas satisfaite, le brûleur ne démarre pas, ou s'arrête s'il était en fonctionnement pour des raisons de sécurité.

Un autre exemple est l'absence du signal de flamme dans ces deux phases, alors qu'il devait être présent. Nous avons programmé dans ce cas un arrêt de sécurité. L'objectif étant d'éviter d'admettre du gaz dans la chaudière sans le brûler. En effet, l'allumage inattendu de ce dernier pourrait conduire à une explosion

L'autre type de contraintes, est celui qui nous intéresse pour la tolérance aux fautes. Il s'agit de contraintes sur lesquelles on peut tolérer une certaine dégradation, à condition qu'elle ne dépasse pas un seuil d'acceptation. Cette dégradation sera acceptée en dernier recours après l'apparition d'un défaut, c'est à dire, lorsqu'il n'est pas possible d'agir sur les autres composants non défectueux faisant partie de la même chaîne de fonctionnement, pour faire revenir le système à l'état nominal. Dans ce cas, on essaye de minimiser la dégradation au maximum.

En se basant sur les données techniques fournies dans [208] et [209] (en particulier les figures représentées en Annexe) qui définissent la plage de fonctionnement du brûleur établie selon les normes EN 676 et EN 267 pour une température d'air de 20°C et une altitude de 500m. Et, en exploitant également d'autres données présentées dans [209], nous avons pu extraire quelques contraintes qui vont nous servir pour la tolérance aux fautes.

Pour le mode 60 (phase de fonctionnement 1) ; nous avons les contraintes suivantes à respecter, en plus de celles spécifiées dans le modèle de la figure 4.27 :

$$PF = \frac{9}{800} * PB + 2 \text{ avec } PB \in [800, 2400] \quad (4.31)$$

$$PG = PF + PG \text{ min avec } PG \text{ min} = 239 \text{ mbar} \quad (4.32)$$

$$ViV = 2900 \quad (4.33)$$

$$DG = \frac{[321,7/20t + 393,2]}{F} = 13,15t + 321,5 \text{ avec } t \in [0, 20s] \quad (4.34)$$

$$DG = \frac{PB}{PCI * F} = \frac{PB}{12,65} \text{ avec } PB \in [800, 2400], PCI = 10,35 \quad (4.35)$$

$$DA = DG * 12 \quad (4.36)$$

$$Q_{Geq} = C_{v_{eq}} * \sqrt{\frac{\Delta P_{eq}}{\rho}} \text{ avec } \frac{1}{C_{v_{eq}}} = \left(\frac{1}{C_{v_1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_{v_2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_{v_{CG}}}\right)^2 ; \Delta P_{eq} = \Delta P_{V_1} + \Delta P_{V_2} + \Delta P_{CG} \quad (4.37)$$

Où : PF : pression foyer (mbar) ; PB: puissance brûleur (Kw) ; PG : pression gaz (mbar) ; PBmin : pression brûleur minimale (mbar). ViV: vitesse ventilateur (tr/min) ; DG : débit gaz (m³/h) ; PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur du gaz naturel (Kwh/m³) ; F : facteur de correction ; DA : débit d'air (m³/h) ; Q_{Geq} : débit volumique final du gaz (m³/h) ; C_{v₁}, C_{v₂}, C_{v_{CG}}, C_{v_{eq}} : coefficients dépendants des profils internes (formes internes des corps des vannes) des vannes V₁, V₂, CG (clapet gaz), et le coefficient final, respectivement. ρ : masse volumique du fluide (kg/m³) ; ΔP_{V₁}, ΔP_{V₂}, ΔP_{CG}, ΔP_{eq} : pertes de charge des vannes V₁, V₂, CG, et la perte de charge finale (mbar), respectivement.

Pour le mode 62 (phase de fonctionnement 2) ; nous avons les contraintes suivantes :

$$PF = 20 \text{ mbar avec } PB \in [2400, 5400] \quad (4.38)$$

$$DG = \frac{714,9}{F} = 584,54m^3 / h \text{ avec } t \in [20, 42s] \quad (4.39)$$

$$DG = \frac{PB}{PCI * F} = \frac{PB}{12,65} \text{ avec } PB \in [2400, 5400], PCI = 10,35 \quad (4.40)$$

Les contraintes (4.32), (4.33), (4.36) et (4.37) sont valables également pour ce mode.

Si on prend le cas où un défaut surgisse au niveau de la vanne V₂ de la rampe de gaz ; V₂ est bloquée en position ouverte par exemple, alors qu'elle devait être mi-ouverte. Le module de surveillance détecte alors et localise le défaut, les retours de positions des éléments de la rampe peuvent être utilisés, pour augmenter la précision de la localisation.

Une fois, cette phase terminée, on passe à la phase de prise de décision sur les actions que nous pouvons exécuter, pour régler le problème ou minimiser les dégâts dans le pire des cas.

Le défaut apparu provoque une augmentation du débit de gaz délivré par le circuit gaz, par rapport à celui requis par le brûleur. Ce défaut peut être toléré, à condition que la pression ne dépasse pas la pression du pressostat max (pression maximale).

L'unique solution possible dans ce cas pour tolérer ce défaut, sans dégradation, consiste à agir sur les composants qui se trouvent en aval de la vanne défectueuse, il s'agit là du clapet gaz, afin de réduire le débit fourni au brûleur. Ceci est réalisé par la réduction de l'angle d'ouverture du clapet.

Dans le cas où cette solution n'est plus possible, parce que le clapet gaz est également défectueux, nous passons à un autre niveau de tolérance, où nous serons contraints d'accepter une certaine dégradation dans le fonctionnement du système, à condition qu'il n'y est aucun risque en termes de sécurité, même si la situation dure un peu plus de temps pour corriger le défaut.

La dégradation que nous pouvons accepter dans notre cas de figure, est le débit élevé de gaz, à condition qu'il y est une quantité adéquate d'air, pour assurer la combustion complète de ce dernier, ce qui nous assurera l'absence du moindre risque d'explosion, sans arrêter le système. Cependant, nous devons remédier au problème le plus tôt possible.

L'amenée de la quantité d'air nécessaire dans ce cas est assurée par la manipulation du volet d'air, ceci en agissant sur le servomoteur associé qui nous permet de contrôler l'angle d'ouverture de ce volet. Une autre possibilité pour augmenter la quantité d'air est la manipulation du servomoteur de la chambre de mélange.

Un deuxième exemple de tolérance aux fautes que nous pouvons prendre sur la rampe de gaz, représente l'opposé du premier cas de figure. En effet, si on prend le cas où la vanne V_2 et bloquée en position mi-ouverte alors qu'elle devait être complètement ouverte, nous aurons également un problème de débit qui n'est pas conforme, mais cette fois-ci un manque de gaz.

Dans ce cas là, le défaut est toléré à condition que la pression ne soit pas inférieure à la valeur indiquée par le pressostat min (pression minimale). La seule solution possible pour tolérer ce défaut est en acceptant la dégradation du fonctionnement causé par le débit réduit de gaz, mais en assurant un débit d'air en proportion adéquate pour maintenir la combustion.

Les deux cas de figures cités comme exemples peuvent apparaître dans les phases 1 et 2

du fonctionnement du brûleur (mode 60 et 61), les techniques de tolérance appliquées seront les mêmes dans les deux modes.

Si nous revenons aux contraintes citées précédemment, nous pouvons dire que pour les deux exemples que nous avons pris, nous pouvons accepter une certaine dégradation sur la puissance du brûleur, la pression au foyer et, le débit du gaz mais nous ne pouvons accepter aucune dégradation sur le rapport entre le débit de gaz et le débit d'air qui assure le maintien de la flamme mais également la sécurité.

4.5.13 Implémentation logicielle

Nous nous sommes basés sur le logiciel SIMATIC WinCC flexible de Siemens [212], [213], [214] pour développer notre système de supervision en ligne. Ce logiciel nous permet de créer une interface homme-machine (IHM) graphique interactive qui servira comme pupitre de contrôle/commande à l'opérateur et aux ingénieurs de la maintenance. Ce pupitre sera connecté à un automate programmable industriel (API) de la famille SIMATIC, dans notre cas, nous avons utilisé le CPU319-3PN/DP. Ceci nous permettra par la suite d'agir sur le système supervisé.

En fait, en utilisant ce logiciel nous créons un système IHM qui représentera l'interface entre l'opérateur et le processus industriel (installation). Le contrôle du processus est réalisé dans ce cas grâce au système d'automatisation (API). En effet, l'interfaçage est assuré en deux sens, entre l'opérateur et WinCC flexible (sur son pupitre), d'un côté, et entre WinCC flexible et le système d'automatisation d'un autre côté.

La réalisation d'un système IHM du processus, en utilisant WinCC flexible, nous permettra d'assurer les fonctionnalités suivantes [212] :

- Représentation du procédé à superviser sur le pupitre opérateur, en assurant une mise à jour continue ; ce qui nous permettra de suivre l'évolution de son état en temps réel.
- Commande du processus à travers l'interface utilisateur graphique. L'opérateur peut par exemple démarrer un moteur, fermer une vanne, définir une valeur de consigne pour l'API qui lui est associé.
- Visualisation des alarmes, qui se déclenchent lorsqu'un défaut est détecté dans le processus, par exemple : lorsqu'un seuil limite est franchi. Ceci dépendra bien évidemment de ce que nous avons programmé auparavant.
- Gestion des paramètres de processus et des machines

D'autres fonctionnalités peuvent également être assurées par le système IHM développé, telles que : l'archivage des valeurs du processus et des alarmes, la documentation de valeurs du processus et des alarmes, etc.

Notre objectif à travers le développement d'un tel système est la maîtrise du processus supervisé à tout instant et le maintien de l'installation en bon état de fonctionnement. Ceci en assurant les tâches de surveillance, et du contrôle/commande sur le procédé.

Notre choix de ce logiciel est justifié par les avantages qu'il offre, en particulier, son ouverture et sa flexibilité.

4.5.13.1 Présentation du WinCC flexible [214]

Nous allons présenter dans ce qui suit le principe sur lequel repose le développement logiciel en utilisant le WinCC flexible.

Le WinCC flexible est un logiciel IHM pour la réalisation, par des outils d'ingénierie efficaces, de concepts d'automatisation évolutifs, au niveau des machines. Ce logiciel nous permet de créer des interfaces utilisateurs pour le contrôle-commande des installations. C'est un logiciel modulaire, constitué de deux principales composantes logicielles :

- **Système d'ingénierie** : grâce auquel nous pouvons réaliser toutes les tâches de configuration nécessaires. Nous disposons d'un éditeur spécifique pour chaque tâche de configuration (il y a plus de 20 éditeurs). Par exemple, pour la configuration de l'interface utilisateur graphique d'un pupitre opérateur, nous utilisons l'éditeur « Vues ». Pour le déplacement entre ces vues, nous utilisons l'éditeur de navigation de vues. Pour la configuration des alarmes, nous utilisons l'éditeur « Alarmes de bit ». Au niveau de chaque éditeur, nous disposons des commandes de menu ou des barres d'outils correspondants, afin de créer tous les objets du projet et réaliser toutes les fonctions dont nous avons besoin.

Toutes les données de configuration d'un projet sont sauvegardées dans une base de données de projet. En effet, un projet WinCC flexible comprend toutes nos données de configuration d'une installation ou d'un pupitre opérateur. Ces données sont principalement:

- des vues du processus qui représentent le système
- des variables qui permettent le transfert des données entre l'automate et le pupitre opérateur au Runtime
- des alarmes qui indiquent les états de fonctionnement au Runtime
- des archives qui gardent une trace des valeurs du processus et des alarmes

C'est dans le système d'ingénierie que nous pouvons visualiser et même gérer la structure de notre projet.

- Runtime : c'est la deuxième composante logicielle du WinCC flexible. Grâce à ce logiciel, nous pouvons visualiser le processus. Dans le Runtime, nous exécutons le projet en mode process, l'opérateur peut alors réaliser le contrôle-commande du système. Parmi les tâches pouvant être exécutées, nous pouvons citer :
 - La communication avec les automates
 - L'affichage des vues à l'écran
 - La commande du processus, par exemple, spécification des consignes, ouverture et fermeture des vannes,
 - L'archivage des données actuelles de Runtime, par exemple, des valeurs processus et évènements d'alarmes.

4.5.13.2 Concepts d'automatisation avec WinCC flexible [213]

Le WinCC flexible nous permet d'assurer la configuration de différents concepts d'automatisation. Cependant, nous allons présenter ici seulement les concepts que nous avons exploités dans notre projet.

Le premier concept utilisé est celui du système d'automatisation avec un pupitre opérateur (Fig.4.34), que nous appelons également système monoposte. Dans ce système, un pupitre opérateur est directement relié à un automate par le bus système.

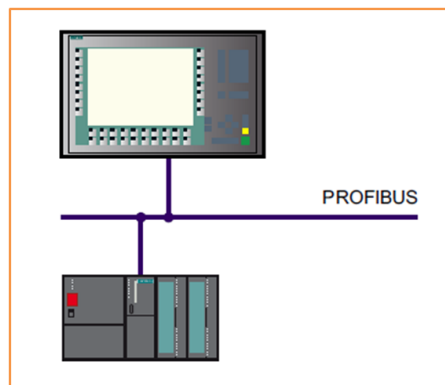


Fig. 4.34. Système monoposte

En plus d'un système IHM créé avec WinCC flexible, une solution d'automatisation complète est constituée également d'autres composants, par exemple: un système d'automatisation (API), un bus système et une périphérie.

En utilisant toujours WinCC flexible, nous pouvons assurer d'une manière globale la configuration et la programmation, la gestion globale des données et de la communication de l'ensemble du système automatisé. Ceci est possible grâce à SIMATIC STEP7, qui est intégré dans le logiciel, et en particulier dans l'interface de configuration. En effet, la liaison pour la communication entre le système d'automatisation et le système IHM est

assurée principalement par les variables du processus. Le STEP 7, nous permet alors de spécifier les mnémoniques qui définissent les points de données (par exemple, adresses ou types de données) que nous avons paramétrées au préalable, lors de la création du programme de commande. STEP 7 nous permet également de définir les paramètres de communication, ces derniers contiennent les adresses de bus ainsi que les protocoles de communication, en utilisant NetPro par exemple.

Pour la création des vues, nous disposons d'éditeurs graphiques qui nous offrent des outils nous permettant de créer nos propres objets. Ces derniers peuvent être enregistrés dans une bibliothèque (globale ou spécifique), afin de pouvoir les réutiliser à volonté, sans devoir les configurer de nouveau.

Il est également possible de programmer une liste de fonctions qui permet d'exécuter des fonctions système lorsqu'un événement configuré survient. Cet événement ne peut se produire que lorsque le projet est en Runtime. Par exemple ; modification de la valeur d'une variable, activation d'un bouton, apparition d'une alarme... . Ce concept est utilisé pour tester le bon fonctionnement du système développé, en mode simulation.

Cependant, nous avons utilisé ce concept dans notre cas pour permettre à l'opérateur d'agir sur le procédé, afin d'assurer son contrôle-commande en fonctionnement normal, mais également et surtout en cas d'apparition de défaut.

Une fois le projet achevé, nous pouvons le simuler directement sur le PC de configuration, afin de tester son bon fonctionnement. Ceci en agissant sur les valeurs des variables. Une autre alternative très intéressante consiste à faire communiquer le système développé avec un système d'automatisation réel.

4.5.13.3 Application développée

L'application logicielle obtenue à partir de l'implémentation du système de supervision développé, en utilisant WinCC flexible nous permet de contrôler en temps réel le processus de génération de vapeur. Elle nous permet de contrôler en particulier, la séquence de fonctionnement des deux composants critiques à savoir : la chaudière et le brûleur. Ceci en absence et en présence de défauts.

Cette application nous offre la possibilité de surveiller en ligne l'ensemble de l'installation de génération de vapeur et surtout la chaudière et le brûleur. Elle nous permet également d'agir sur les différents actionneurs (électrovannes, servomoteurs, ...) pour tolérer un défaut, lorsque ceci est possible.

L'application peut être exécutée en mode simulation, où nous pouvons provoquer l'un des différents défauts prévus et voir la réaction du système de supervision. Ceci nous

permettra de tester son efficacité en termes de détection et de localisation des composants défectueux.

Pour l'utilisation sur le terrain, nous assurons la communication entre l'interface graphique (GUI : Graphic User Interface) et l'automate programmable (API), qui va gérer l'ensemble des tâches de supervision. En effet, cet automate sera raccordé à l'ensemble des détecteurs et des actionneurs du procédé, d'un côté, et au pupitre opérateur contenant l'interface utilisateur, de l'autre côté.

La communication entre l'API et la GUI est assurée dans les deux sens. Par conséquent, les informations acquises à partir du système supervisé, à travers les capteurs sont traitées par le programme de gestion du processus de génération de vapeur, que nous avons injecté auparavant dans l'automate. Les résultats du traitement sont affichés au niveau de l'interface graphique. Par ailleurs, les actions que nous effectuons sur l'interface pour activer un actionneur ou le désactiver, ou changer sa position par exemple, sont transmises vers l'automate comme des ordres à exécuter. Ce dernier envoie donc des signaux de commande aux actionneurs concernés, qui vont être ajustés électroniquement. Leurs signaux retour de position, qui sont surveillés en permanence, confirmeront l'arrivée à la bonne position.

L'application logicielle développée nous permet le déclenchement d'une alarme en temps réel, et le traitement du problème à temps, ce qui contribue énormément à la réduction des temps d'immobilisation imprévus. Ceci réduit considérablement les pertes en temps et par conséquent en argent, engendrées par les pannes des machines, causées par des défauts non traités à leur apparition. Et le plus important encore, est que cette application nous permet d'augmenter la sécurité d'exploitation de l'installation supervisée.

Nous allons présenter dans ce qui suit, quelques vues graphiques de notre application. Dans la première vue (Fig. 4.35), nous distinguons les différents composants du processus de génération de vapeur sur lesquels nous pouvons agir. L'accent a été mis sur les éléments qui nous permettent de contrôler les différents paramètres de la chaudière, à savoir, le niveau d'eau, la pression et la température qui sont étroitement liées et enfin la conductivité de l'eau. La manipulation de ces composants peut être réalisée pour différents objectifs : un objectif de régulation, un objectif de simulation de défauts et de surveillance, ou encore un objectif de tolérance aux fautes.

Les figures 4.36 et 4.37 représentent les vues graphiques qui nous permettent de contrôler l'évolution du niveau d'eau dans la chaudière, elles nous permettent également de sélectionner la pompe qui va assurer l'alimentation de la chaudière en eau. Cette redondance matérielle (raccordement de deux pompes en parallèle) va être exploitée par la suite pour la tolérance aux fautes.

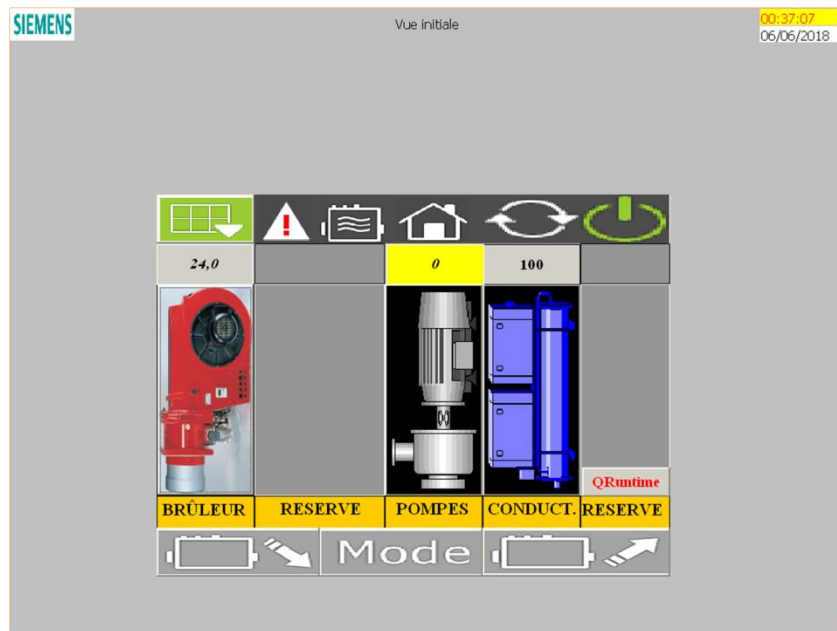


Fig. 4.35. Commande générale de la chaudière

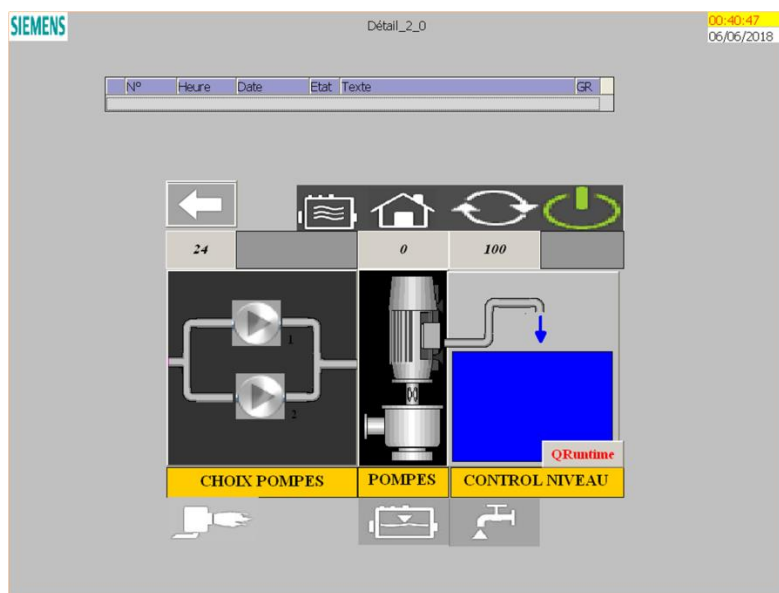


Fig. 4.36. Contrôle de niveau d'eau dans la chaudière

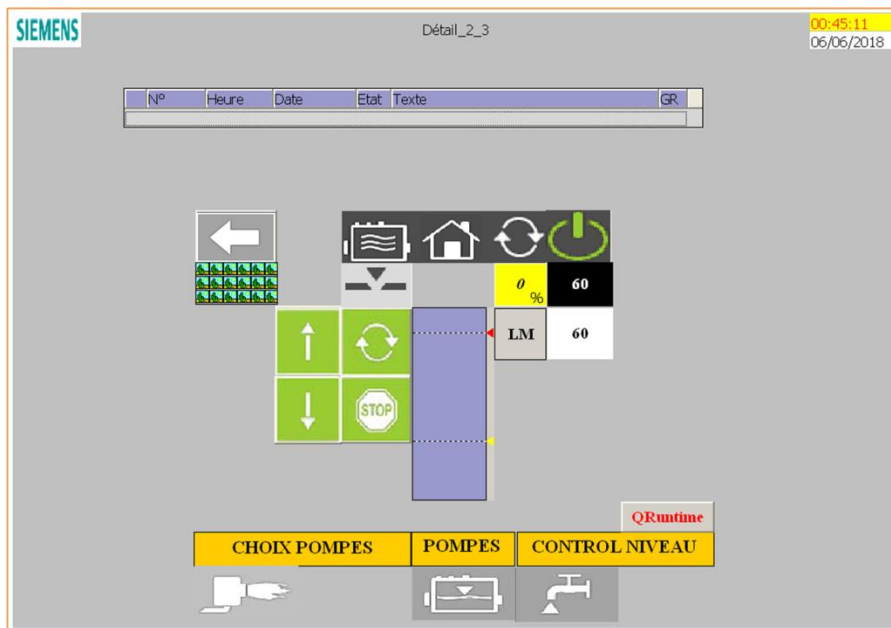


Fig. 4.37. Régulation du niveau d'eau dans la chaudière

La figure 4.38 illustre la vue graphique qui nous permet de contrôler et de réguler la conductivité de l'eau de la chaudière.

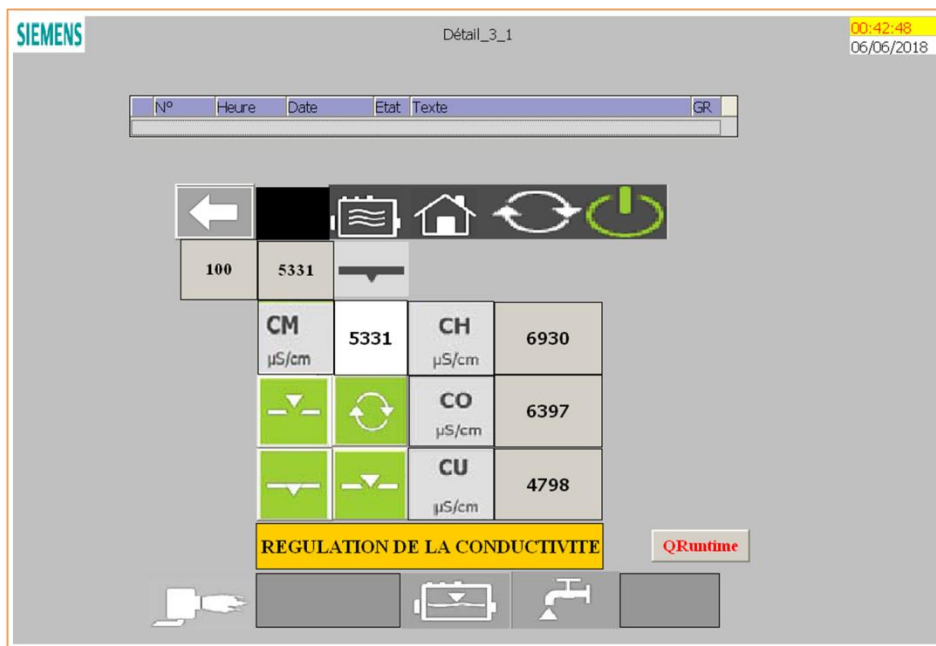


Fig. 4.38. Régulation de la conductivité de la chaudière

Les figures 4.39, 4.40 et 4.41 représentent des vues graphiques de l'interface utilisateur, qui nous offrent la possibilité de mettre en marche le brûleur, de le surveiller, de le commander et de bien contrôler son cycle de fonctionnement.

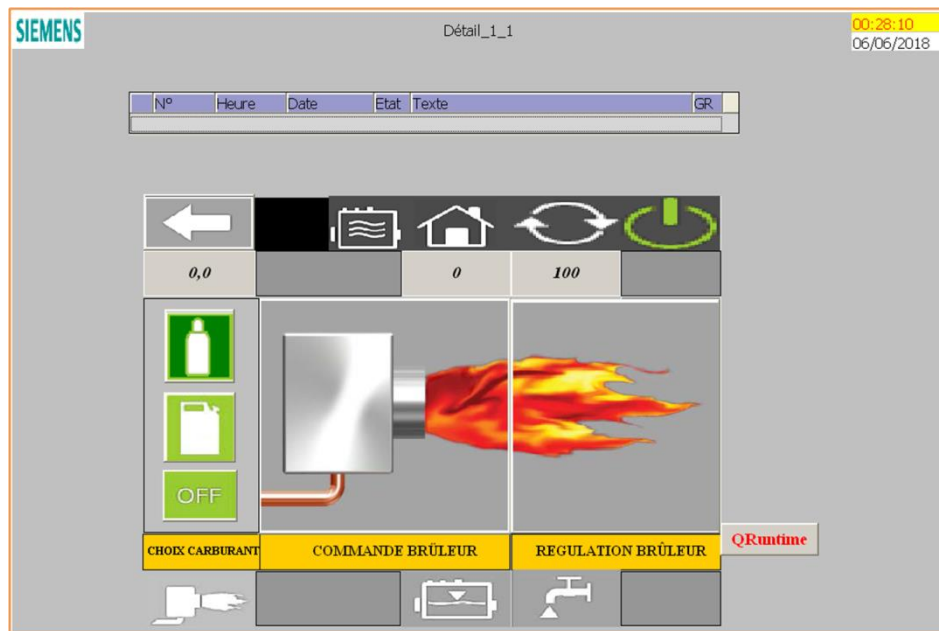


Fig. 4.39. Contrôle de fonctionnement du brûleur

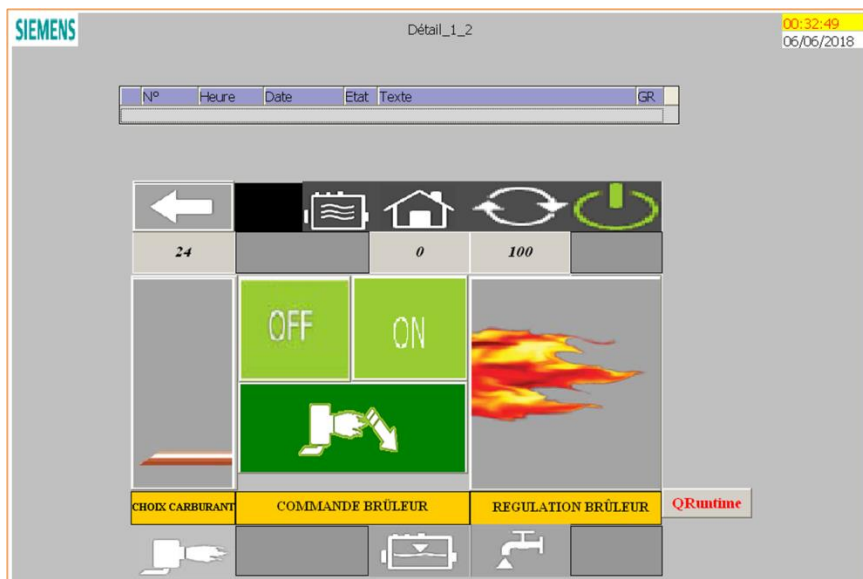


Fig. 4.40. Commande de la mise en/hors service du brûleur



Fig. 4.41. Régulation du brûleur

La vue graphique montrée dans la figure 4.42 nous fournit les outils qui nous permettent de choisir la plage de régulation du brûleur et de contrôler sa puissance. Cette dernière nous permet d'activer les deux allures possibles (petite allure, et grande allure) du brûleur selon le besoin en chaleur de la chaudière. Il est également possible de contrôler la puissance de flamme du brûleur même entre ces deux allures, afin de la faire adapter à la puissance requise pour la chaudière.

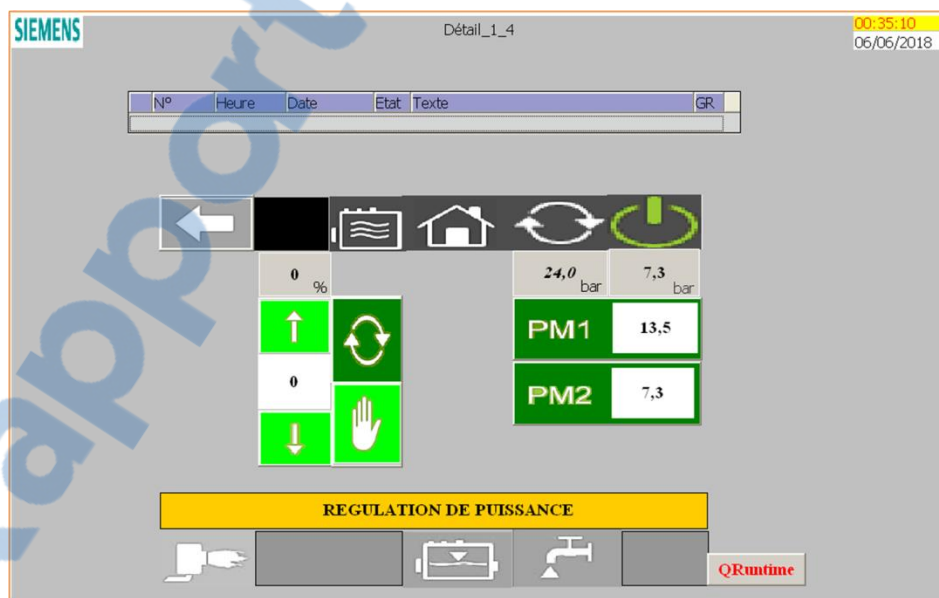


Fig. 4.42. Régulation de la puissance du brûleur

La figure 4.43 nous montre un extrait du programme global gérant le fonctionnement du processus de génération de vapeur, dans tous les modes de fonctionnement. Il s'agit ici d'une partie du programme qui gère le fonctionnement du brûleur.

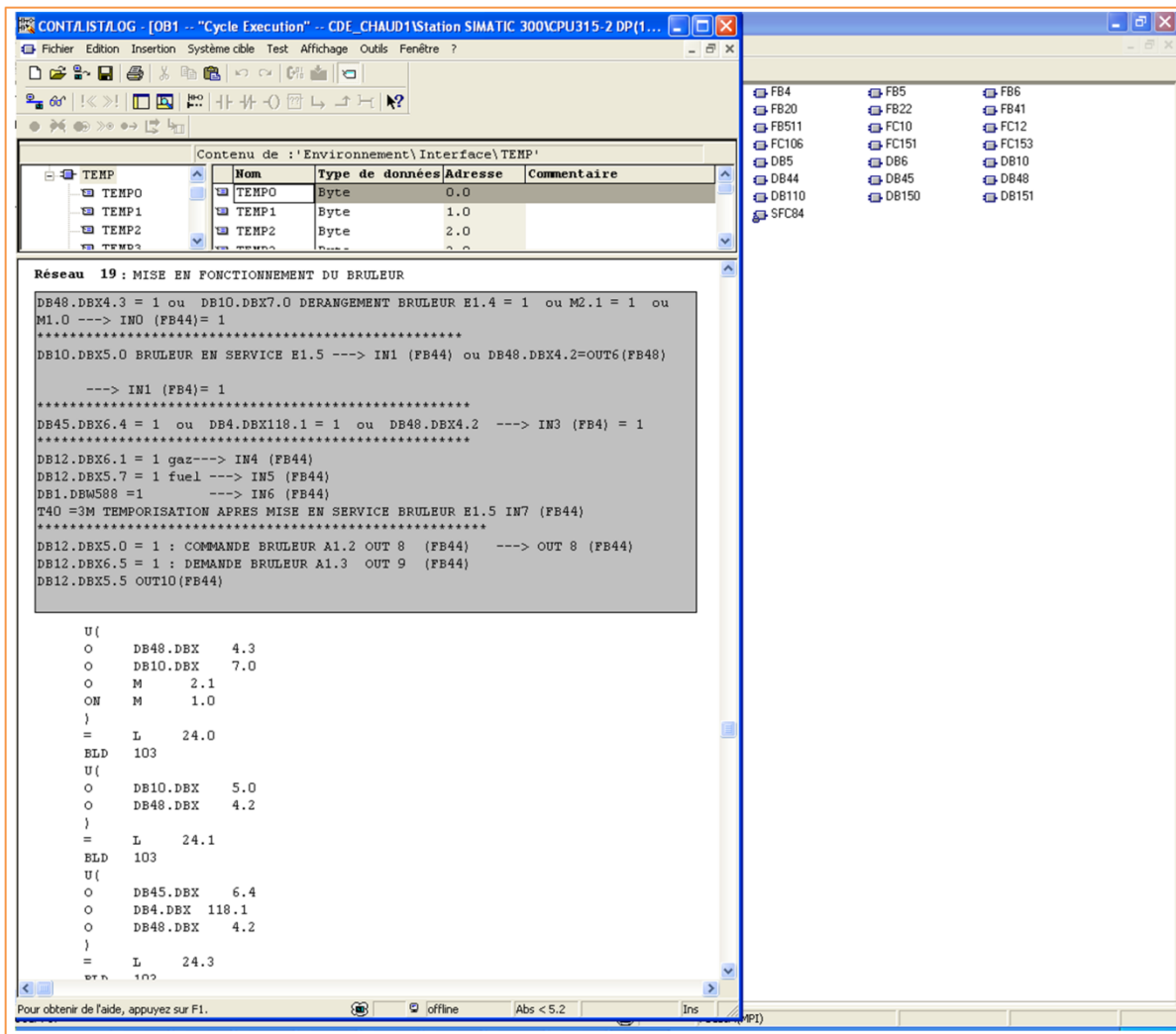


Fig. 4.43. Extrait du programme principal

La vue graphique de la figure 4.44, nous permet de visualiser le déroulement du programme global grâce à un automate virtuel, qui remplace parfaitement l'automate réel pour la simulation du programme. Grâce aux blocs apparaissant sur l'interface, nous pouvons même agir sur le procédé. Ceci sera exploité pour simuler les différents défauts sur l'installation, dans un objectif de surveillance. Ils seront utilisés également pour agir sur les différents actionneurs du procédé, dans un objectif de tolérance aux fautes.

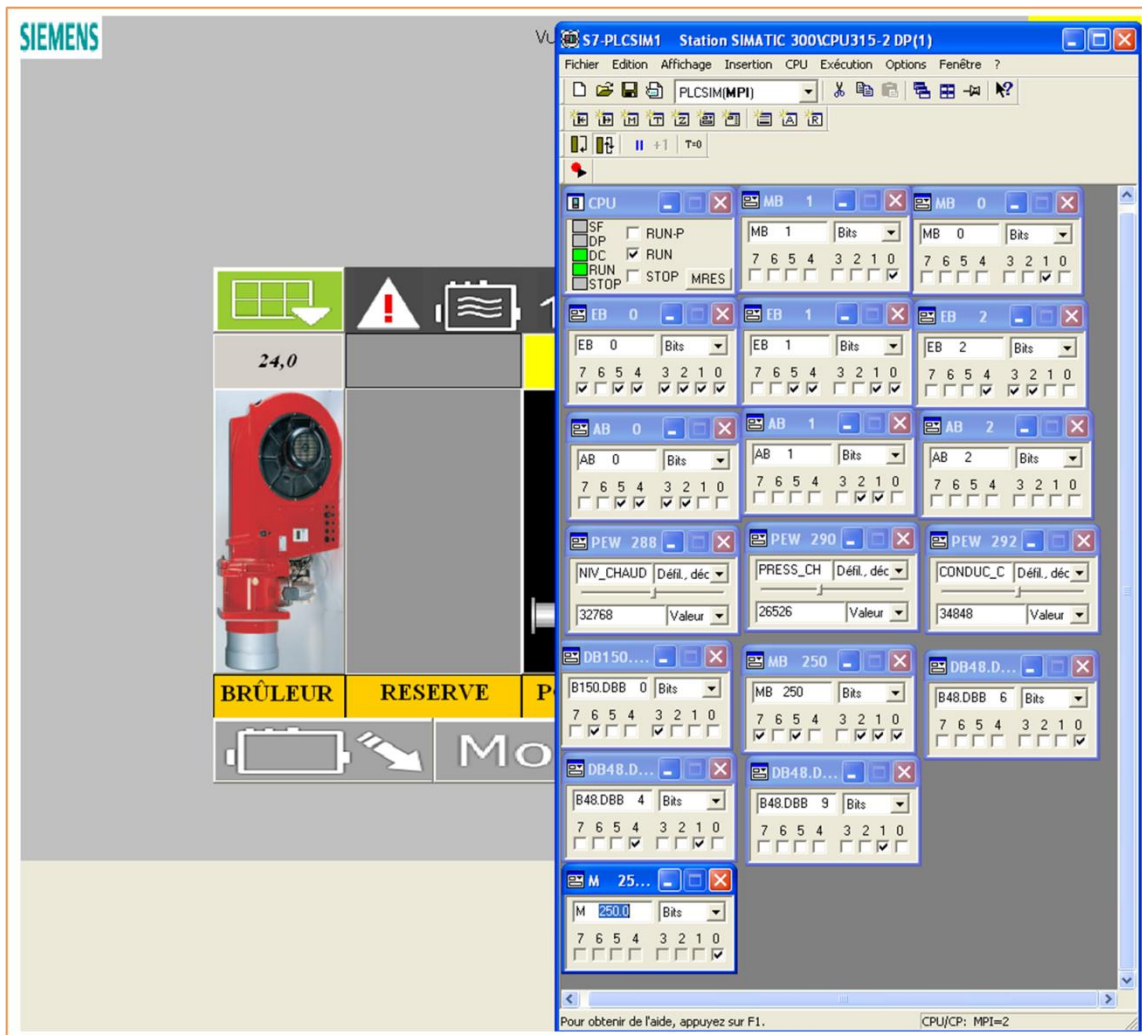


Fig.4.44. Visualisation du déroulement du programme principal

4.6 Conclusion

La supervision en ligne joue un rôle prépondérant dans l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, en général, et l'augmentation de la sécurité d'exploitation des processus, en particulier. Raison pour laquelle, nous avons consacré le début de ce chapitre à la mise en évidence du besoin accru de la supervision dans l'industrie, tous les secteurs confondus.

Les systèmes de supervision industrielle actuels, dans lesquels la surveillance est souvent assurée par le seuillage des variables et le déclenchement des alarmes lorsqu'un de ces seuils est dépassé ; et dans lesquels la tolérance aux fautes est assurée par la redondance des éléments critiques, ont commencé à montrer leurs limites dans un monde industriel où la complexité des procédés ne cesse d'accroître. Le besoin de précision et de robustesse dans la détection et la localisation des composants défectueux, et la nécessité d'assister l'opérateur dans ses prises de décision se fait ressentir de plus, en plus.

En effet, deux informations fiables doivent être affichées à l'opérateur dans sa tâche de supervision: la surveillance en ligne et les moyens de tolérance aux fautes.

Dans le but de répondre à ces exigences, nous avons proposé dans ce travail une approche unifiée et intégrée de la supervision combinant deux approches différentes: le bond graph sous sa forme LFT fournissant à l'opérateur une FDI (Fault detection and Isolation) robuste (aux incertitudes paramétriques) en ligne et, une gestion fonctionnelle des OMs offrant un outil d'aide à la décision en ligne pour la tolérance aux fautes. Nous donnons à l'opérateur également la possibilité d'appliquer les décisions prises.

Le reste du chapitre a été donc consacré à la présentation de notre approche de supervision. Nous avons insisté en premier sur l'apport de cette approche par rapport à l'existant, ensuite nous avons décrit en détails l'approche proposée, et nous avons expliqué son principe de fonctionnement.

Un cas d'étude pratique a été présenté à la fin du chapitre. En effet, la théorie développée a été illustrée à travers une application industrielle sur un générateur de vapeur qui représente une partie d'une usine de fabrication de carton ondulé (Maghreb-Emballage) installée à Oran.

Conclusion générale

L'objectif principal de notre présent travail est d'utiliser une méthodologie unifiée pour offrir à l'opérateur une aide précieuse dans sa tâche de supervision en ligne.

La plupart des travaux de recherche cités en littérature, traitent les deux aspects de la supervision ; FDI (Fault Detection & Isolation) et FTC (Fault Tolerant Control), séparément, en abordant l'un des deux tâches à la fois.

Cependant, nous nous sommes intéressés dans ce présent travail aux deux fonctions de la supervision : la FDI et la FTC

Diverses approches ont été proposées pour assurer la détection et la localisation des défauts en ligne, au sein d'un système industriel. Nous pouvons distinguer deux grandes familles de méthodes : approches à base de modèles (observateurs, graphes causaux, graphes biparti, bond graphs ...) et approches sans modèle (intelligence artificielle, reconnaissance de forme, systèmes experts...).

Les approches à base de modèles se basent généralement sur l'exploitation de la redondance présente au niveau d'un système, pour générer des indicateurs de défauts appelés également Relations de Redondance Analytique (RRAs). Ceci en comparant le comportement du système réel avec celui de référence, représenté par un modèle (qualitatif ou quantitatif).

Dans ce présent travail, nous avons utilisé le modèle bond graph pour assurer la surveillance. Cet outil possède des propriétés graphiques, comportementales et causales, qui nous permettent de bénéficier des avantages des deux types de modèles qualitatif et quantitatif.

Le modèle Bond Graph (BG), en tant qu'approche unifiée, multidisciplinaire et compréhensible, convient parfaitement pour la description des systèmes industriels. En effet, cet outil graphique les considère tous comme une interconnexion d'un ensemble de composants échangeant des flux d'énergie, ce qui le rend adapté à n'importe quel procédé.

En effet, les bonds graphs sont un outil de modélisation multi physiques, qui se base sur la représentation graphique de l'échange de puissance énergétique entre les composants de tout système, indépendamment de sa nature physique, mais en faisant l'analogie avec divers domaines physiques.

L'échange de puissance est représenté sur le graphe par un lien qui raccorde chacun des deux éléments concernés. Le produit des deux variables de puissance « effort » et « flux » portées par le lien représente la puissance instantanée transportée par ce dernier.

Par ailleurs, les bond graphs possèdent des propriétés causales puissantes pour l'analyse des systèmes de surveillance ; la représentation de la causalité sur le bond graph permet principalement de parcourir le BG comme un graphe. Concept sur lequel repose essentiellement la génération des indicateurs de défauts à base de ce modèle.

Afin de tirer profit de ces différentes caractéristiques intéressantes, nous avons proposé dans ce travail une approche de supervision industrielle, qui repose sur le modèle bond graph pour assurer une surveillance fiable du procédé. En effet, les propriétés structurelles et causales du BG peuvent être exploitées pour générer des indicateurs permettant de détecter et de localiser les défauts spécifiés dans le cahier des charges de la surveillance.

Par ailleurs, l'utilisation du BG sous sa forme LFT (Linear Fractional Transformation) permet de concevoir un système de surveillance robuste aux incertitudes paramétriques.

Concernant l'aspect tolérance aux fautes, différentes méthodes ont été proposées dans la littérature, afin de maintenir un système industriel en fonctionnement, dans un mode le plus proche du mode nominal, suite à l'occurrence d'un défaut. Parmi ces techniques nous pouvons citer l'accommodation des fautes, avec ces deux types : passive et active.

Les approches actives répondent bien aux objectifs attendus de notre système de supervision en termes de tolérance aux fautes, c'est-à-dire, l'élimination ou la réduction des effets des défauts sur le système. Ceci, en appliquant l'une des techniques appartenant à cette classe de méthodes, à savoir, la compensation, la reconfiguration ou la restructuration, selon le défaut survenu. De plus, l'application de ces approches nécessite un module de surveillance, ce qui va nous permettre de profiter des résultats fournis par notre module de surveillance en ligne.

D'un point de vue pratique, le développement d'un tel système de supervision ; côté surveillance, peut être réalisé en trois principales étapes, effectuées toutes hors ligne: la génération d'indicateurs de défauts, à savoir les relations de redondance analytiques (RRAs), en prenant en considération les incertitudes paramétriques, à l'aide du BG-LFT. La seconde étape consiste à implémenter ces relations et la dernière étape consiste à assurer un affichage à l'opérateur, lui indiquant les résultats de la FDI à travers l'interface utilisateur graphique (GUI).

Le résultat de l'implémentation par contre est vérifié, en ligne, lors d'apparition d'un défaut au niveau du procédé supervisé. Le système conçu permet une détection et une isolation robustes des composants défectueux.

Les activités FDI fournissent aux opérateurs des alarmes synthétiques et pertinentes, tandis que la commande tolérante aux fautes (FTC) leur indique comment maintenir le système en fonctionnement, suite à l'apparition de défauts, lorsque ceci est possible, c'est à dire, lorsque le défaut est tolérable.

Afin d'assurer la gestion du fonctionnement du système industriel dans toutes les situations ; saines et défectueuses, nous avons proposé une approche à base d'automates hybrides (AHs). Cette approche nous permet également d'assurer la tolérance aux fautes, pour les défauts tolérables.

Étant donné que le système industriel considéré est un système dynamique hybride (SDH) ; c'est –à-dire qui combine entre la dynamique continue et événementielle, il était nécessaire d'utiliser une approche de modélisation qui permet de prendre en compte les deux aspects continu et événementiel de la dynamique de ce système.

Différents formalismes ont été proposés dans la littérature, pour la description du comportement des SDHs, trois principales catégories peuvent être discernées : l'approche discrète, l'approche continue et l'approche mixte. Seule la dernière approche permet de modéliser dans une même structure les deux types de comportements continu et discret. En plus, elle ne fait aucune abstraction d'informations sur le procédé considéré. Ainsi, l'approche de modélisation que nous avons proposé d'utiliser dans notre travail fait partie de cette troisième catégorie.

De nombreux modèles ont été proposés dans l'approche mixte : tels que les réseaux de Pétri hybrides, les statecharts hybrides, les bond graphs hybrides, et les automates hybrides. C'est ce dernier outil que nous avons utilisé pour le développement de notre approche de supervision industrielle en ligne.

Le choix de cette représentation est justifié par le fait que ce formalisme représente explicitement les dynamiques continues et discrètes, par des équations différentielles et des modes ou des états discrets, respectivement. Les deux dynamiques sont donc clairement représentées sur le même graphe. En outre, ce modèle est bien adapté à la programmation des Automates Programmable Industriels (APIs), qui se basent sur le même principe général ; celui des étapes et des transitions, mais également de vérification des conditions permettant au système de rester dans un mode, et celles de franchissement des différentes transitions, pour l'activation des modes adéquats. Et enfin, pour la simplicité d'utilisation du modèle et sa clarté.

Le formalisme utilisé décrit le système industriel comme un ensemble de modes de fonctionnement, incluant des modes en cas de défauts.

Les transitions entre ces modes sont conditionnées par les résultats de la FDI. Ces conditions de passage sont évaluées en temps réel, fournissant à l'opérateur un système d'aide à la décision en ligne, via l'interface utilisateur graphique (GUI).

Pour l'implémentation du système de supervision développé, nous avons utilisé le logiciel SIMATIC WinCC flexible de Siemens. Le choix de ce logiciel est justifié par les avantages qu'il offre, en particulier son ouverture et sa flexibilité.

Par ces divers éditeurs (vues, navigation de vues, alarmes de bit...) et l'intégration du SIMATIC STEP7, ce logiciel nous a offert la possibilité de développer le programme complet de gestion de fonctionnement du procédé industriel considéré, et de créer également une interface homme-machine (IHM) graphique conviviale et interactive qui sert de pupitre de contrôle/commande à l'opérateur.

Ce système d'interfaçage nous permet de suivre en temps réel l'évolution de l'état du système industriel considéré. De plus, grâce à son interconnexion avec un Automate Programmable Industriel (API), cette interface permet à l'opérateur de disposer d'outils lui permettant de gérer les différentes alarmes, mais également d'agir sur le procédé à tout moment, en particulier lors d'occurrence de défauts, afin d'appliquer l'approche de tolérance aux fautes choisie.

La théorie développée a été illustrée par une application industrielle. En effet, la méthode de supervision développée a été utilisée sur un générateur de vapeur qui représente une partie d'une usine de fabrication de carton ondulé. Ceci, afin d'assurer la détection et l'isolation des différents défauts pouvant survenir au niveau du procédé, et permettre de récupérer les fonctions de celui-ci, lorsque cela est possible, ou de réduire le taux de dégradation au maximum ; le cas échéant.

Le choix de ce cas d'étude revient au fait que les installations à combustion sont des sources de dangers constantes, dont les conséquences peuvent être catastrophiques. Par conséquent, un niveau de supervision très élevé doit être assuré pour ce type de procédés, afin de garantir un degré suffisant de sûreté de fonctionnement et de sécurité d'exploitation du procédé.

La principale perspective que nous pouvons proposer pour ce travail, consiste à exploiter les méthodes d'optimisation, pour trouver la meilleure solution possible de tolérance aux fautes en temps réel. Il est même possible et l'appliquer en ligne, automatiquement, ce qui allègera considérablement la responsabilité des opérateurs.

Selon les critères d'optimisation choisis, de nombreuses approches d'optimisation peuvent être envisagées. Dans le domaine de la tolérance aux fautes, les critères les plus importants sont souvent le temps de calcul de la solution, et le taux de dégradation,

l'objectif étant de les minimiser. Parmi les méthodes d'optimisation, qui peuvent satisfaire au mieux ces deux critères, nous pouvons citer : le recuit simulé, la recherche taboue ou encore les algorithmes génétiques, reste encore à les évaluer en termes d'avantages et d'inconvénients, et à les comparer, afin de sélectionner une méthode.

Parmi les méthodes sans modèles, ceux de l'intelligence artificielle sont en vogue actuellement, notamment celles qui utilisent les réseaux de neurones et le deep learning. L'utilisation des systèmes d'aide à la décision, en incluant les décisions multicritères peuvent également s'imposer comme des outils intégrés (et/ou interfacés) pour offrir à l'opérateur humain le choix final de la stratégie à adopter en cas de défaut du système.

Une dernière perspective consiste à généraliser l'approche de supervision développée pour pouvoir l'appliquer sur d'autres types de systèmes industriels.

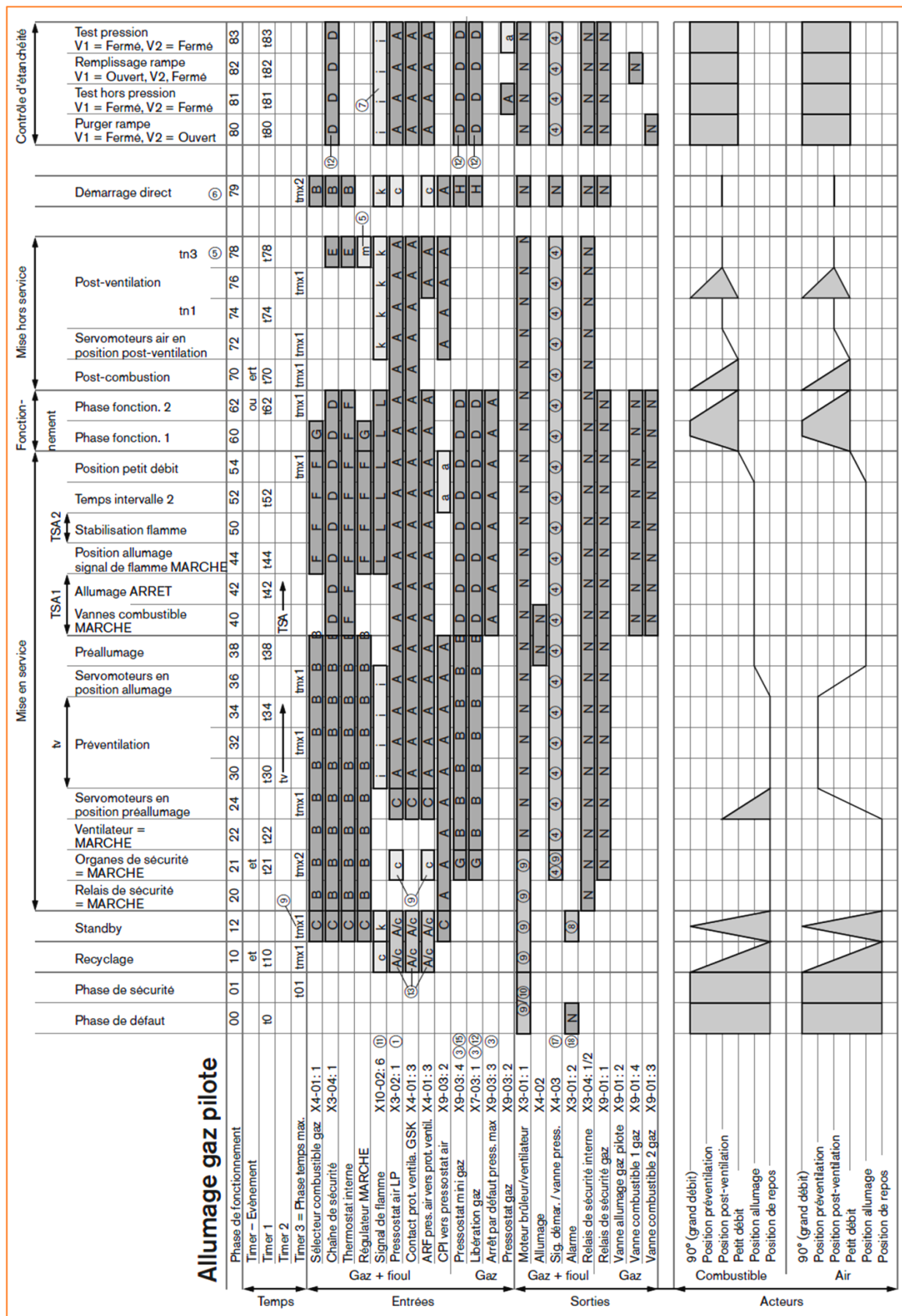


Fig. A.1. Cycle de fonctionnement gaz avec allumage pilote [208]

Sig. "MARCHE" Signal "ARRET" Réaction lorsque le signal ne réagit pas selon le cycle de fonctionnement

A	a	Pass. à la phase de fonct. 01, pour comp. à répétition = 0, rester en phase 00 sinon en Ph 12
B		Passage à la phase de fonctionnement 10
C	c	Stop jusqu'à écoulement des temps de phase max. (tmx), puis accès en phase 01
D	d	Passage à la phase de fonctionnement 70
E		Pour demande de chaleur du régulateur et démarrage direct paramétré passage en phase 79, sinon en phase 10
F		Sans contrôle d'étanchéité, accès en phase de fonctionnement 70, sinon en phase 80
G		Passage à la phase de fonctionnement 62
H		Stop jusqu'à écoulement des temps de phase max. (tmx), puis passage à la phase 10
	i 0...3 s	Pass. à la phase de fonct. 01, puis comp. à répét. = 0 rester en phase 00 sinon en phase Ph 12
	k 0...30 s	Pass. à la phase de fonct. 01, puis compt. à répét. = 0 rester en phase 00 sinon en phase Ph 12
L 0...3 s		Pass. à la phase de fonct. 01, puis comp. à répét. = 0 rester en phase 00 sinon en phase Ph 12
	i	Pour démarrage direct paramétré passage à la phase 79, sinon en phase 10
N		

Sortie : ARRET
 Entrée : aucune influence

Fig.A.2. Légende pour les cycles de fonctionnement [208]

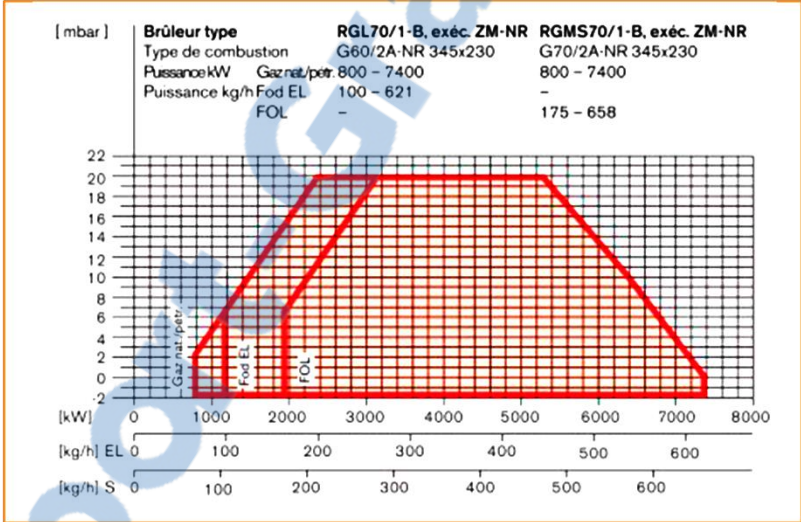


Fig. A.3. Plage de fonctionnement du brûleur [209]

Bibliographie

- [1] S.Evanno, Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour l'exploitation des chaudières industrielles au gaz DRA 71, RAPPORT D'ÉTUDE N° DRA-09-102957-01582B, INERIS, 2010.
<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/benchmark-chaudieres-web.pdf> Dernier accès 05/05/2018.
- [2] SCADA Systems, White paper, Schneider Electric Telemetry & Remote SCADA Solutions, March 2012.
- [3] M.Sayed Mouchaweh, Diagnostic des systèmes à événements discrets (SED) - État de l'art, Techniques de l'Ingénieur, 2012.
- [4] P.Berruet, J.F.Petin, F.Rigaud, A.K.Toguyeni et E.Zamaï, Architectures de pilotage de procédés industriels, 2007.
- [5] Ir. H. Lecocq, Les automates programmables, Tome I, Caractéristiques et méthodologie de programmation, Université de Liège, 2005.
- [6] P.Millot, Supervision des procédés automatisés et ergonomie, Edition Hermès, Paris, 1988.
- [7] B. Ould Bouamama, K. Medjaher, A.K. Samantaray, M. Staroswiecki, Supervision of an industrial steam generator; Part I: Bond graph modeling, Elsevier Science, Mars 2004.
- [8] H. Lawley. Operating study and hazard analysis. Chemical Engineering Progress, 4:45—56, 1974.
- [9] M. Basseville, I. Nikiforov, 'Detection of abrupt changes: Theory and applications', Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- [10] J.Ragot, D.Maquin, S.Gentil, "Diagnostic fondé sur un modèle quantitatif". In Supervision des procédés complexes, Sylviane Gentil ed., chapitre 5, 38 p., ISBN 978-2-7462-1510-8, Traité Information, Commande, Communication, IC2, Hermès Science Publications, Paris, 2007.
- [11] K. Medjaher, A.K. Samantaray, B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, Supervision of an industrial steam generator Part II: Online implementation, Elsevier Science, October 2004.
- [12] J.M. Maciejowski, Modelling and predictive control: Enabling technologies for reconfiguration, Annual Reviews in Control 23, 13-23, 1999.
- [13] A. Kobi , S. Nowakowski and J. Ragot, Fault detection-isolation and control reconfiguration. Mathematics and Computers in Simulation 37(2-3), 111-117, 1994.
- [14] K.W. Oh, and C. Quek, BBIPS: A blackboard-based integrated process supervision, Engineering Applications of Artificial Intelligence 14(6), 703-714, 2001.
- [15] V. Dardinier-Maron, F.Hamelin, and H .Noure, "A Fault-Tolerant Control Design Against Major Actuator Failures: Application to a Three-Tank System", IEEE 38th Conference on Decision and Control, pp: 3569-3574, 1999.
- [16] P. Charbonnaud, Supervision, surveillance et diagnostic, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tarbes, 2004.
- [17] M. Staroswiecki and A. Gehin. From control to supervision. Safeprocess, page 312:323, 2000.
- [18] F.A. Evan et J.C. Willcox. Experimental stapdown redundant sensor inertial navigation systems. Journal of Spacecraft Rockets, 7(9), Sept. 1970.
- [19] R. J. Patton, Fault-tolerant control: The 1997 situation, IFAC Safeprocess'97, pages 1033—1055, 1997.
- [20] F. Busson, « Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille1, France 2002.
- [21] E. Chow. Failure Detection System Design Methodology. PhD thesis, M.I.T., Lab. Information and Detection System, Cambridge, M.A., 1980.
- [22] J. Potter and M. Suman. Tresholdless redundancy management with array of skewed instruments. Electronic Flight Control Systems, 224:15—25, 1977.

- [23] R. Iserman. Process fault detection based on modeling and estimation methods. *A Survey Automatica*, 20(4):387–404, 1984.
- [24] J. Ragot et D. Maquin. An algorithm for obtaining redundancy equation of LTI systems. *Automatica*, 30(3):537–542, 1994.
- [25] E.Y. Chow. *Failure Detection System Design Methodology*. PhD thesis, M.I.T., Lab. Information and Detection System, Cambridge, M.A., 1980.
- [26] I. Isermann and P. Balle. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control engineering practice*, pages 5:709—719, 1997.
- [27] J. Brunet, D. Jaume, M. Labarrère, A. Rault et Vergé M. *Détection et Diagnostic de Pannes. Approches Par Modélisation*. Paris (France), série diagnostic et maintenance édition, 1990.
- [28] E. H. Shortliffe. Mycin: A rule-based computer program for advising physicians regarding anti-microbial therapy selection. *Memo AIM*, (251), 1974.
- [29] A.K.Samantaray et B. Ould Bouamama, *Model-based Process Supervision. A Bond Graph Approach*, Springer Verlag, Series: Advances in Industrial Control, p490. ISBN: 978-1-84800-158-9, 2008.
- [30] L.Trave-Massuyes, P. Dague et F. Guerrin, *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Paris : Hermès, p505, 1997.
- [31] M. Blanke, M. Kinnaert, M.Lunze and M. Staroswiecki, “Diagnosis and fault tolerant control”, Springer, New York, 2003.
- [32] D.Hissel et A. Hernandez et R.Outbib, *Méthodes de diagnostic de systèmes multiphysiques Techniques de l'Ingénieur*, 2008.
- [33] P.M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge based redundancy- a survey and some new results. *Automatica*, 26(3):459–474, 1990.
- [34] B. Dubuisson. *Diagnostic et Reconnaissance des formes*. Hermès, Paris, 1990.
- [35] D.Koenig, *Génération de résidus robustes pour une approche intégrée de diagnostic des systèmes linéaires déterministes ou stochastiques*, Thèse de doctorat, Université de Henry Poincaré Nancy 1, 1998.
- [36] H. Jamouli, « Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2003.
- [37] G. Zwingelstein. *Diagnostic Des Défaillances: Théorie et Pratique Pour Les Systèmes Industriels*. Hermès,Paris, hermès édition, 1995.
- [38] J. Brunet, L. M. Jaume, D., A. Rault, and M. Vergé. *Détection et Diagnostic de Pannes: Approche Par Modélisation*. Hermès, hermès édition, 1990.
- [39] B.Ould Bouamama et G.Dauphin-Tanguy, *Modélisation par Bond Graph. Application aux systèmes énergétiques*, Techniques de l'Ingénieur, Vol. BE2° BE8281, 2006.
- [40] B.Ould Bouamama, M. Staroswiecki et A.K.Samantaray, *Software for Supervision System Design In Process Engineering Industry*, 6th IFAC, SAFEPROCESS, pp.691-695, Beijing, China, 2006.
- [41] N. Belkherchi, *Contribution à l'étude du diagnostic et de la commande tolérante aux fautes par l'approche structurelle – application aux procédés biologiques*, Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2011.
- [42] O. Lurye, I. Kromov, A. Traechtler, *Automated Design of Reconfiguration Strategies Increases Reliability, Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings-Annual*, pages 1-6, 2012.
- [43] M. Blanke and T. Lorentzen, “Satoool- a software tool for structural analysis of complex automation systems”, In 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Beijing, 2006.
- [44] T. Denoeux. Analysis of evidence-theoretic decision rules for pattern classification. *Pattern recognition*, pages 1095—1107, 1997.
- [45] T. Denoeux. Analysis of Evidence-Theoretic Decision Rules For pattern Classification. *Pattern Recognition*, 30(7):1095-1107, 1997.



-
- [46] Y.Zhang and J.Jiang, Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, IFAC Symp. On Fault Detection, Supervision and safety for technical Processes-SAFEPROCESS'03, (PP. 265-276), 2003.
- [47] D. Pomorski. Apprentissage Automatique Symbolique et Numérique. Construction et Évaluation D'un Ensemble de Règles À Partir Des Données. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, Paris, 1992.
- [48] A.Oustaloup, The great principles of CRONE Control, IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic, 1993.
- [49] R. Iserman et B. Freyermuth. Process fault diagnosis based on process model knowledge-Part I: Principe for fault diagnosis with parameter estimation. Transaction of the ASME, 113:620, 1991.
- [50] P. M. Frank. Fault advanced fault detection and isolation schemes using nonlinear and robust observers. 10th World Congress on AutomaticControl, IFAC, RFA, pp63-68, juillet 1987.
- [51] R. J. Patton, P. M. Frank, and R. N. Clark. Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ, 1989.
- [52] G. Delemaire, J. P. Cassar, et M. Staroswiecki. Comparaison of identification and parity space approaches for failure detection in single-input single-output. In 33th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, pages 2279-2285, 1994.
- [53] D.C.Youla, J.J.Bongiorno , et C.N.LU, Single-loop feedback-stabilization of linear multivariable dynamical plants, Automatica, 10:159-173, 1974.
- [54] A. S. Willsky. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. Automatica, Vol 12, pp601-611, 1976.
- [55] J.F.Magni, P.Moyon. A generalized approach to observers for fault diagnosis. Proceedings of 30th IEEE CDC, Brighton, UK, December 1991.
- [56] D.G.Luenberger. An introduction to observers. IEEE Transactions on automatic control. Vol AC-16, pp 596-602, Décembre 1971.
- [57] P.M.Frank. Fault diagnosis on the basis of dynamic process models. Proceedings IMACS, 12th World Congress on Scientific Computation, Paris, France: 414-419, 18-22 juillet 1998.
- [58] X. Ding, E. Ding, and T. Jeinsch. An approach to analysis and design of observer and parity relation based FDI systems. Proc. of the 14th IFAC World Congress, pages 37—42, 1997.
- [59] E.M. Assaf, R.C. Giordano, and C.A. Nascimento. Thermal runaway of ethylene oxidation reactors: Prevision through neural networks. Chemical engineering science, 3:107—112, 1996.
- [60] A.F. Cubillos and L.E. Lima. Adaptive hybrid neural models for process control.Computers Chemical Engineering, 22:989—992, 1998.
- [61] Y. Power and A.P. Bahri. A two-step supervisory fault diagnosis framework. Computers Chemical Engineering, 28:2131—2140, 2004.
- [62] N. Boudaoud. Conception D'un Système de Diagnostic Adaptatif En Ligne Pour la Surveillance Des Systèmes Évolutifs. PhD thesis, l'Université de Technologie de Compiègne, France, 1997.
- [63] A.E.P. Brown. Risk analysis: An investment in engineering. Process Safety Progress, 18:121—125, 1999.
- [64] A. Laurent. Sécurité Des Procédés Chimiques, Connaissance de Base et Méthodes D'analyse de Risques. TecDoc. Lavoisier, Paris, 2003.
- [65] J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, and D. Gaston. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention Process Industries, 15:291—303, 2002.
- [66] Y.Zhang and J.Jiang, Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault tolerant control systems, 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'06), P.R. China, Beijing, 2006.
- [67] A. Ghariani, L. Nabli, Génération automatiques des procédures de reconfiguration au sein des systèmes automatisés de production, 8^{ème} Conférence Internationale de Modélisation et SIMulation – MOSIM'10, 10 au 12 Mai 2010, Hammamet, Tunisie.

-
- [68] A. Gehin and M. Staroswiecki, Reconfiguration analysis using Generic Component Models, IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and humans, Vol. 38, No.3, May 2008.
- [69] J. P. Cassar, R. Litwak, V. Coquemot, and M. Staroswiecki. Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour les procédés industriels complexes. JESA, RAIRO-APII, 31(9):179—202, 1994.
- [70] S. Rajaraman, J. Hahn, and M. SamMannan. Sensor fault diagnosis for nonlinear processes with parametric uncertainties. Journal of Hazardous Materials, 130:1—8, 2006.
- [71] R. Patton and J. Chen. A review of parity space approaches to fault diagnosis. In Proc.IFAC/IMACS Symposium SAFEPROCESS'91, volume 1, pages 238—255, Baden-Baden, Sept. 1991.
- [72] M. Staroswiecki. Cours de DEA : Analyse structurelle. Rapport technique, Université des sciences et technologies de Lille1, 2002.
- [73] J.F.Magni et PH.Mouyon. On residual generation by observer and parity space approaches. IEEE Transactions on Automatic Control, 39(7):441-447, 1994.
- [74] J.Ragot, F. Kratz, and D. Maquin, Espace de parité pour les systems linéaires incertains. Synthèse, quelques résultats nouveaux et mise en œuvre. Seizième Colloque GRETSI, Grenoble, France, 15-19 septembre 1997.
- [75] G. Rouchouse, Sécurité des Automatismes: comment assurer la sécurité, la disponibilité, la maintenabilité des Automatismes industriels: les Méthodes Disponibles et les Réglementations, Publications CETIM, Mécanique et Productique, 1992.
- [76] S. Sojoudi, J. Lavaei, and R. M Murray, Fault-tolerant controller design with applications in power systems and synthetic biology, In Proc. American Control Conference, 2011.
- [77] F.I. Khan and P.R. Amyotte. How to make inherent safety practice a reality. Canadian Journal of Chemical Engineering, 81:2—16, 2003.
- [78] F. Guenab, W. Schön, J-L. Boulanger, Synthèse d'une méthode de reconfiguration et/ou restructuration intégrant la fiabilité de certains composants, Journal européen des systems automatisés (JESA). Volume 43, pp 1149-1178, 2009.
- [79] R.V.Beard. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. Thèse de doctorat, MIT, Dep, Aero, Astro Cambridge, février 1971.
- [80] T. Carpentier and R. Litwak. Algorithms and criteria for sensors location in view of supervision. In CESA'96 IMACS Multiconference, pages 684—689, Lille, France, 1996.
- [81] D. Pomorski. Apprentissage Automatique Symbolique et Numérique Construction et Évaluation D'un Ensemble de Règles À Partir Des Données. Thèse de doctorat, Université de sciences et technologies de Lille, 1992.
- [82] P.E. Dumont, Tolérance active aux fautes des systèmes d'instrumentation, thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2006.
- [83] T. K. Bera, R. Merzouki. B. Ould Bouamama and A. K. Samantary, S. K. Ghoshal, S. Samanta and A. K. Samantary, Design and validation of a reconfiguration strategy for a redundantly actuated intelligent autonomous vehicle, Proc IMechE Part 1: J Systems and Control Engineering, Volume 226, Issue 8, pp 1060-1076, September 2012.
- [84] S.Dash, R. Rengaswamy, and V. Venkatasubramanian. Uzzy-logic based trend classification for fault diagnosis of chemical processes. Computers and Chemical Engineering, 27:347—362, 2003.
- [85] M. Staroswiecki and D. Berdjag, Passive / active fault tolerant control for LTI systems with actuator outages, European Control Conference 2009 - ECC'09, Budapest, Hungary, 2506-2511, 2009.
- [86] M. Staroswiecki &D. Berdjag, A general fault tolerant linear quadratic control strategy under actuator outages, International Journal of Systems Science, 41:8, 971-985, 2010.
- [87] D.L. Yu, J.B. Gomm, and D. Williams. Sensor fault diagnosis in a chemical process via RBF neural networks. Control Engineering Practice, 7:49—55, 1999.
- [88] J.A. Barton. Runway reactions in batch reactors, the protection of exothermic reactors and pressurized storage vessels congress. Institution of Chemical Engineers, pages 11—15, 1984.
-

-
- [89] E. Deschamps, Diagnostic de services pour la reconfiguration dynamique de systèmes à évènement discrets complexes, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [90] AFNOR. Techniques de l'analyse de la fiabilité des systèmes - procédures d'analyse des modes de défaillances et de leur effets (amde). Technical report, Norme nf x 60 510,1.
- [91] E.M. Assaf, R.C. Giordano, and C.A. Nascimento. Thermal runaway of ethylene oxidation reactors: Prevision through neural networks. *Chemical engineering science*, 3:107—112, 1990.
- [92] F. F. De Lamotte, Proposition d'une approche haut niveau pour la conception, l'analyse et l'implantation des systèmes reconfigurables, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [93] R. Isermann. On the applicability of model-based fault detection for technical processes. *Control Engineering Practice*, 2(3):439-450, 1994.
- [94] J.U. Thoma. *Introduction to Bond Graphs and their Applications*. Pergamon Press, Oxford ; New York, 1975.
- [95] A.Mukherjee and R. Karmakar. *Modelling and Simulation of Engineering Systems through Bond Graphs*. Alpha Sciences International, Pangbourne, UK, 2000.
- [96] J.F. Broenink. 20-sim software for hierarchical bond-graph/block-diagram models. *Simulation Practice and Theory*, 7(5-6):481-492, 1999.
- [97] A. Mukherjee and A.K. Samantaray. System modelling through bond graph objects on SYMBOLS 2000. In J. J. Granda and G. Dauphin-Tanguy, editors, *International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'01)*, volume 33, pages 164-170. Phoenix, Arizona, SCS Publishing, Simulation Series, Vol.33, No.1, ISBN 1-56555-103-6, 2001.
- [98] M. Tagina, J.Ph. Cassar, G. Dauphin-Tangy, and M. Staroswiecki. Monitoring of systems modelled by bond graph. In F. E. Cellier and J. J. Granda, editors, *International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'95)*, pages 275-280, Las Vegas, 1995. Simulation Series, Vol.27, No.1, ISBN 1-56555-037-4, 1995.
- [99] D. Linkens and H. Wang. Qualitative bond graph reasoning in control engineering: Fault diagnosis. In F. E. Cellier and J. J. Granda, editors, *International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'95)*, pages 189-194. Simulation Series, Vol.27, No.1, ISBN 1-56555-037-4, 1995.
- [100] P.J. Mosterman and Biswas G. Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 29(6):554-565, 1999.
- [101] B. Ould Bouamama, K. Medjaher, M. Bayart, A.K. Samantaray and B. Conrard, Fault detection and isolation of smart actuators using bond graphs and external models, *Control Engineering Practice* 13(2), 159-175, 2005.
- [102] D.C. Karnopp, D. Margolis, and R. Rosenberg. *Systems Dynamics: A Unified Approach*, John Wiley, New York, second edition, 1990.
- [103] F.T. Brown. Direct application of the loop rule to bond graphs. *Journal of Dynamics systems, measurements and control*, pages 253–261, 1972.
- [104] A. Rahmani, C. Sueur et G. Dauphin-Tanguy. Pole assignment for systems modelled by bond graph. *Journal of the Franklin Institute*, 331B(3):299–314, 1994.
- [105] S. Rimaux. *Etude Des Propriétés Structurelles de Certaines Classes de Systèmes Physiques Non Linéaires Modélisés Par Bond Graph*. Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 1995.
- [106] C. Sueur et G. Dauphin-Tanguy, Bond graph approach for structural analysis of MIMO linear systems. *Journal of the Franklin Institute*, 328(1):55–70, 1991.
- [107] M.Tagina, Application de la modélisation bond graph à la surveillance des systèmes complexes, thèse de doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 1995.
- [108] W. El Osta, « Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles bond graph couplés », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2005.
- [109] G. Dauphin-Tanguy, A. Rahmani, and C. Sueur. Bond graph aided design of controlled systems. *Simulation Practice and Theory*, 7(5-6):493—513, 1999.
- [110] P.J. Gawthrop. Physical interpretation of inverse dynamics using bicausal bond graphs. *Journal of the Franklin Institute*, 337(6):743—769, 2000.
-

-
- [111] R. Fotsu Ngwompo, S. Scavarda, and D. Thomasset. Inversion of linear time-invariant siso systems modelled by bond graph. *Journal of the Franklin Institute*, 333(2):157–174, 1996.
- [112] A. Lichiardopol, L’approche bond graph pour la découverte technologique, Thèse de Doctorat, École centrale de Lille, 2007.
- [113] A. Jardin, Contribution a une méthodologie de dimensionnement des systèmes mécatroniques : analyse structurelle et couplage a l’optimisation dynamique, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2010.
- [114] A. Bregon, C. Alonso, G. Biswas, B. Pulido, N. Moya, Fault Diagnosis in Hybrid Systems using Possible Conicts, *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes* Proceeding, Volume # 8 | Part# 1, pp 132-137.
- [115] N.A. Marrison et P.J.Gawthrop. Fault detection, location and identification in dynamic systems. In *European Control Conference, ECC’91*, pages 1911–1916, Grenoble, France, 2-5 July 1991.
- [116] B. Lucas et J.M. Evrard. An improved diagnosis method using a mixed model. In *TOOLDIAG’93 Conference on Fault Diagnosis*, pages 1071–1079, Toulouse, France, December 1993.
- [117] M. Verge et D. Jaume. Fault detection and bond graph modeling. In *Ifac Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 748–753, Espoo, Finland, June 1994.
- [118] T. Kohda, K. Inoue, and H. Asama. Computer aided failure analysis using system bond graphs. In *International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM’01)*, pages 71–76. Simulation Series, Vol.33, No.1, ISBN 1-56555-103-6, 2001.
- [119] P. Haves, T. Salsbury et J. Wright. Condition monitoring in HVAC subsystems using first principles models. *ASHRAE Transactions (Part 1)*, pages 519–527, 1996.
- [120] B.Ould Bouamama, F. Busson, G. Dauphin-Tanguy et M. Staroswiecki. Analysis of structural properties of thermodynamic systems. In A. Edelmayer, éditeur, *4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, volume 2, pages 1068–1073, Budapest, 14-16 June 2000. IFAC.
- [121] W. Lee, C. Park et G. Kelly. Fault detection in an air-handling unit using residual and recursive parameter identification methods. *ASHRAE Transactions (Part 1)*, pages 528–539, 1996.
- [122] D. Linkens et A.Wang. Fault diagnosis based on a qualitative bond graph model, with emphasis on fault localisation. In *International Conference on Control’94*, volume 2, pages 1329–1334, 1994.
- [123] D. Linkens et H.Wang. Qualitative bond graph reasoning in control engineering.ii. fault diagnosis. *ICBGM’95, Proceedings of the 1995 Western Multiconference*, pages 189–194, 1995.
- [124] C. Ghiaus. Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bondgraph. *Energy and buildings*, 30:221–232, 1999.
- [125] J. Feenstra, P. J. Mosterman, Biswas G. et P. C. Breedveld. Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of complex flow processes. In *Proceedings of the Internatiol Conference on Bond Graph Modeling and Simulation*, pages 77–82, Phoenix Arizona, January 2001.
- [126] T. Kohda, H. Katsube, H. Fujihara et K. Inoue. Identification of system failure causes using bond graph models. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceedings*, 5:269–274, 1993.
- [127] M. Daigle, A. Bregon, G. Biswas, X. Koutsoukos, B. Pulido, Improving Multiple Fault Diagnosability Using Possible Conflicts *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Volume # 8 | Part# 1, pp144-149.
- [128] J.U Thoma and B. Ould Bouamama. *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach*. Springer Verlag, Telos, 2000.
- [129] B.Ould Bouamama. Bond graph approach as analysis tool in thermofluid model library conception. *Journal of the Franklin Institute*, 340(1):1–23, 2003.
- [130] A. Badoud, M. Khemliche, and S. Latreche, Modeling, Simulation and Monitoring of Nuclear Reactor Using Directed Graph and Bond Graph, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 49, 2009.
- [131] J. J. Gertler et Q. Luo. Robust Isolable Models for Failure Diagnosis. *AICHE Journal* vol.35, n°11, PP 1856-1861 , november 1989.
-

-
- [132] M. Staroswiecki, V. Coquempot et J. P. Cassar. Generation of analytical redundancy relations in linear interconnected system. In IMACS Annals on computing and Applied Mathematics Proceedings MIN-S2 90, Brussels, 1990.
- [133] J. J. Gertler et R. Monajemy, Generating Directional Residuals with Dynamic Parity Equations, 12th World Congress, IFAC, Sydney, Australie, Vol.7, pp505-510, 18-23 juillet 1993.
- [134] R.J. Patton. Robustness Issues In fault Tolerant Control. Toolfiag'93, Toulouse, France, volume 3 (late papers), April 5-7 1993.
- [135] M. Staroswiecki, J. P. Cassar, V. Cocquempot, A general Approach for Multicriteria Optimization of Structured Residuals, Tooldiag'93, Toulouse, France, vol2, pp800-807, april5-7, 1993.
- [136] V. Cocquempot. Surveillance Des Processus Industriels Complexes. Génération et Optimisation Des Relations de Redondance Analytique. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 1993.
- [137] B. Ould Bouamama, M. staroswiecki, G. Dauphin-Tanguy et A. K. samatary. Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. Control Engineering Practice (CEP) journal, 13 (7) pp. 875-891, 2005.
- [138] P.J. Gawthrop, Bicausal bond graphs, in ICBGM'95, pages 83-88, Las Vegas, USA, 1995.
- [139] D. Mosiek, M. Tagina, J. P. Cassar et G. Dauphin-Tanguy, Using of the junction structure matrix and the loops properties of a bond graph model to avoid implicit equations during the generation of ARRs and sensors placement. European Simulation Multiconference SCS, pages 818-824, june 1996.
- [140] D. Mosiek, Procédures Graphiques pour l'analyse structurelle de systems physiques modélisés par bond graph, thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2000.
- [141] H. Haffaf, Contribution à la resolution des problems combinatoires dans un bond-graph par la théorie des matroides, Phd thesis, Université d'Oran, 2000.
- [142] B. Ould Bouamama, K. Medjaher, A. K. Samantary et M. Staroswiecki, Supervision of an industrial steam generator; Part I et II: Control Engineering Practice, CEP (sous presse disponible sciences direct <http://www.sciencedirect.com/science>).
- [143] R. Loureiro, S. Benmoussa, Y. Touati, R. Merzouki, B. Ould Bouamama, Graphical Approach for State Reconstruction and Monitoring Analysis, 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012.
- [144] M. Khemliche, B. Ould Bouamama, A. Khellaf and M. Mostefai, Component supervision by sensor placement on bond graph model, Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Automation & information (ICAI'05), pp71-78, Wisconsin, USA, 2005.
- [145] L. J. De Miguel, L. F. Blazquez, 'Fuzzy logic-based decision-making for fault diagnosis in a DC motor', Engineering Applications of Artificial Intelligence. Vol.18. pp. 423-450, 2005.
- [146] K. Hsing-Chia, C. Hui-Kuo, 'A new symbiotic evolution-based fuzzy- neural approach to fault diagnosis of marine propulsion systems', Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.17. pp. 919-930, 2004.
- [147] A. P. Rothstein, M. Posner, H.B. Rakytyanska, 'Cause and effect analysis by fuzzy relational equations and a genetic algorithm', Reliability Engineering and System Safety, 2005.
- [148] O. Adort, D. Maquin, J. Ragot, 'Fault detection with model parameter structured uncertainties', European Control Conference ECC'99, 1999.
- [149] Z. Han, W. Li, S. L. Shah, 'Fault detection and isolation in the presence of process uncertainties', 15th IFAC World Congress. pp.1887-1892, 2002.
- [150] R. Mrani Alaoui, « Conception d'un module de diagnostic à base des suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques. Application en ligne à un générateur de vapeur », thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [151] C. Jiang, D. H. Zhou, 'Fault Detection and Isolation for Uncertain Linear Time-delay Systems'. Computer and Chemical Engineering. Vol. 30. pp. 228-242, 2005.
- [152] A. Johansson, M. Bask, T. Norlander, 'Dynamic Threshold Generators for Robust Fault Detection in Linear Systems with Parameter Uncertainty', Automatica.42 (2006). pp. 1095-1106, 2006.
-

-
- [153] X. G. Yan, C. Edwards, 'Nonlinear Robust Fault Recognition and Estimation using a Sliding Mode Observer', *Automatica* (2007). Vol. 43. pp. 1605-1614, 2007.
- [154] A. Zolghadri, D. Henry, M. Monsion, 'Design of nonlinear observers for fault diagnosis: A case study', *Control Engineering Practice*, pp. 1535-1544, 1996.
- [155] D. Henry, A. Zolghari, 'Norm-based design of robust FDI schemes for uncertain systems under feedback control: comparison of two approaches', *Control engineering practice* Vol. 14. pp. 1081-1097, 2006.
- [156] M. Basseville, 'On-board element fault detection and isolation using the statistical local approach', *Automatica*, vol. 34. No.11. pp. 1359-1373, 1998.
- [157] D. Henry, A. Zolghari, F. Gastang, M. Monsion, 'A New Multi-Objective Filter Design For Guaranteed Robust FDI Performance', *Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida USA. pp. 173-178, 2001.
- [158] L. Li, D. Zhou, 'Fast and Robust Fault Diagnosis for a Classe of Nonlinear Systems: Detectability analysis', *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 28. pp. 2635-2646, 2004.
- [159] M. A. Djeziri, A. Aitouche, B. Ould Bouamama, 'Sensor Fault Detection of Energetic System using Modified Parity Space Approach', *Proceeding of the 2007 Control and Decision Conference New Orleans, Louisiana, USA*, 2007.
- [160] M. A. Djeziri, *Diagnostic des Systèmes Incertains par l'Approche Bond Graph*, Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2007.
- [161] M. Vergé, D. Jaume, 'Fault Detection and Bond Graph Modeling', In *IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. pp.748-753, Espoo, Finland, 2004.
- [162] G. Dauphin-Tanguy, *Les Bond Graphs*. Hermès Science Publications Paris, ISBN 2-7462-0158-5, 2000.
- [163] B. Ould Bouamama, A. K. Samantaray, M. Staroswiecki, G. Dauphin-Tanguy, 'Derivation of constraint relations from bond graph models for fault detection and isolation', in: *Proc. ICBGM'03, Simulation Series*, vol. 35, no. 2, pp.104-109, ISBN. 1- 56555-257-1, 2005.
- [164] A. K. Samantaray, K. Medjaher, B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki and G. Dauphin-Tanguy, 'Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation', *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 14, Issue 3, April 2006. pp.237-262, 2006.
- [165] C. Sié Kam , G. Dauphin-Tanguy, 'Bond graph Tool for Standard Interconnection Structure Determination', *WMC SCS ICBGM 2001*, Phoenix-Arizona, USA, pp. 33-40, 2001.
- [166] W. Borutzky, G. Dauphin-Tanguy, 'Incremental bond graph approach to the derivation of state equations for robustness study', *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 12(1), 41-60, 2004.
- [167] C. Sié Kam , G. Dauphin-Tanguy, 'Bond graph models of structured parameter uncertainties', *Journal of the Franklin Institute*, Vol.342. pp. 379-399, 2005.
- [168] R. Redheffer, 'On a certain linear fractional transformation', *EMJ. Maths and phys.* 39, pp. 269-286, 1960.
- [169] C. Sié Kam, 'Les Bond Graphs pour la Modélisation des Systèmes Linéaires Incertains', Thèse de doctorat, USTLille1-ECLille, Décembre 2001. N° d'ordre 3065, 2001.
- [170] C. Sueur et G. Dauphin-Tanguy, 'Structural controllability observability of linear systems represented by bond graphs', *Journal of the Franklin Institute*, 326(6):869-883, 1989.
- [171] M. A. Djeziri, R. Merzouki, B. Ould Bouamama, G. Dauphin Tanguy, 'Fault Detection of Backlash Phenomenon in Mechatronic System with Parameter Uncertainties using Bond Graph Approach', *Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation Luoyang, China*. pp. 600-605, 2006.
- [172] M. A. Djeziri, R. Merzouki, B. Ould Bouamama, G. Dauphin Tanguy, 'Bond Graph Model Based For Robust Fault Diagnosis', *Proceeding of the 2007 American Control Conference New York City, USA*. pp. 3017-3022, 2007.
- [173] M.A. Djeziri, B. Ould Bouamama, R. Merzouki, 'Modelling and robust FDI of steam generator using uncertain bond graph model', *IFAC journal of Process Control* 19, pp 149-162, 2009.
- [174] M.A. Djeziri, B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, R. Merzouki, 'LFT Bond Graph Model-Based Robust Fault Detection and Isolation', *Bond Graph Modeling of Engineering Systems*, Springer New York , pp 105-133, 2011.
-

-
- [175] R. El-harabi, Supervision des Processus Chimiques à Base de Modèles Bond Graphs, Thèse de doctorat, université de Lille1, 2011.
- [176] B. Ould-Bouamama, R. El Harabi, M.N. Abdelkrim, M.K. Ben Gayed, Bond graphs for the diagnosis of chemical processes, Elsevier Computers and Chemical Engineering 36, pp 301–324, 2012.
- [177] Y.Touati, B. Ould Bouamam and R. Merzouki, Fault Estimation Using Bicausal Bond Graph and Linear Fractional Transformation, 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012.
- [178] S. K. Ghoshal, S. Samanta and A. K. Samantary, Robust fault detection and isolation of hybrid systems with uncertain parameters, Proc IMechE Part 1: J Systems and Control Engineering, Volume 226, Issue 8, pp 1013-1028, September 2012.
- [179] R. David, et H. Alla. 2010, Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets, Springer, Berlin Heidelberg.
- [180] M. Mendler, G. Lüttgen, « Statecharts: from visual syntax to model-theoretic semantics », Workshop on Integrating Diagrammatic and Formal Specification Techniques (IDFST 2001), pp.615–621, 2001.
- [181] P. J. Mosterman, Hybrid Dynamic Systems: a Hybrid Bond Graph Modeling Paradigm and its Application in Diagnosis, thèse de doctorat, université de Vanderbilt, 1997.
- [182] R.Alur, C. Courcoubetis, T.A. Henzinger et P.-H. Ho, « Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems », Hybrid Systems, LNCS, p.209-229, 1993.
- [183] S. Batis, Commande d'une classe de systèmes hybrides par automates hybrides rectangulaires, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [184] J. Zaytoon, Systèmes dynamiques hybrides, Hermès, 2001.
- [185] L.Ghomri, Synthèse de contrôleur de systèmes hybrides à flux continu par réseaux de Petri hybrides, thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2012.
- [186] C. Cassandras, S. Lafortune, Introduction to Discrete Event Systems, Second Edition, Springer, 2008.
- [187] Y. Chen, G. Provan, « Modeling and diagnosis of timed discrete event systems- a factory automation example », The American Control Conference, New Mexico, p. 31-36, 1997.
- [188] M.S. Branicky, V.S. Borkar, S. K. Mitter, « A unified framework for hybrid control », dans Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control, pp. 4228-4234,1994.
- [189] R. Brockett, « Language drive hybrid systems », dans Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control, pp. 4210-4214, 1994.
- [190] A.Puri, V. Borkar, P. Varaiya, « \mathcal{E} -Approximation of Differential Inclusions », Proceedings of Hybrid Systems III Workshop: Verification and Control, vol. 1066 of Lecture Notes in Computer Science, p. 362-376, 1996.
- [191] A.Bemporard, M. Morari, « Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints », *Automatica*, vol. 35, n°3, pp. 407-428, 1999.
- [192] C. A. Petri, Kommunikation mit automaten, thèse de doctorat, Université de Bonn, 1962.
- [193] H.Alla, R. David, « Continuous and hybrid petri nets », Journal of Circuits, Systems and Computer, vol. 8, n°1, p.159-188, 1998.
- [194] R. David, H. Alla, Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets, Springer, Berlin Heidelberg, 2010.
- [195] S. Pettersson, B. Lennartson, « Hybrid modeling focused on hybrid petri nets », dans Proceedings of the 2nd European Workshop on Real-Time and Hybrid Systems, Grenoble, France, pp. 303-309, 1995.
- [196] A. Giua, E. Usai, « High-level petri nets : A definition », Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control, Kobe, Japon, pp. 148-150, 1996.
- [197] P. Mosterman, G. Biswas, "A Theory of Discontinuities in Physical System Models" in Journal of the Franklin Institute, Volume 335B, Number 3, pp. 401-439, 1998.
- [198] P. J. Mosterman, Hybrid dynamic systems : a hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis, thèse de doctorat, université de Vanderbilt, Nashville, Tennessee, USA, 1997.
- [199] G. Biswas, X. Yu, A formal modeling scheme for continuous systems: Focus on diagnosis, Proceedings IJCAI-93, pp.1474-1479, Chambery, France, 1993.
-

- [200] R.Alur, C. Courcoubetis, T.A. Henzinger et P.-H. Ho, « Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems », Hybrid Systems, LNCS, pp.209-229,1993.
- [201] R. Alur, C. Courcoubetis, N. Halbwachs, T.A. Henzinger, P.H. Ho, A. Olivero, J. Sifakis et S. Yovine, “*The algorithmic Analysis of Hybrid Systems*” Theoretical computer science, (138): 3-34, 1995.
- [202] T. A. Henzinger, « The theory of hybrid automata », Hybrid Systems II, LNCS, vol. 999, pp. 278-292, 1996.
- [203] N.Tari, L.Sekhri, H.Haffaf, “A functional and bond graph models for robust supervision”, in: *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 166-171, ISSN 1582-5175.
- [204] <http://www.maghrebemballage.com>, dernière consultation 13/06/18.
- [205] A.Riou et J.P. Depauw, Différents types de chaudières industrielles, Techniques d’ingénieur, 1990, Référence B1480. <http://197.14.51.10:81/pmb/collections/Techniques%20de%20ingenieur/itcd2/be/Be3/b1480.pdf>. Dernier accès 05/05/2018.
- [206] H.Bahmane, Chaudière ou générateur de vapeur ? Lequel de ces deux moyens de production répond-t-il le mieux à mes besoins ?, FOIRE AUX QUESTIONS, 2015. <http://fr.scribd.com/doc/268413163/3j-facilitateur-faq-chaudieresvapeur-20120619-vba-jmi-doc#scribd>. Dernier accès 05/05/2018.
- [207] http://ww2.ac-poitiers.fr/sc_phys/IMG/pdf/Chaudières_a_vapeur_a_combustible.pdf.
- [208] Notice de montage et de mise en service Manager de combustion Weishaupt W-FM 100 et W-FM 200, no 83054804 –1, Weishaupt, 2009.
- [209] Information sur les brûleurs fioul, gaz et mixtes, Brûleurs industriels 1000-11700 kW. Flexibles et fiables, no 83211105, Weishaupt, Décembre 2013.
- [210] <https://www.energieplus-lesite.be>, dernière consultation 27/05/2018.
- [211] Brûleurs gaz à air soufflé, 2006, consultable sur le site : www.enrdd.com/documents/documents/Gaz-Fioul/lesbruleursgazàairsoufflé.pdf. Dernier accès 27/05/2018.
- [212] WinCC flexible Getting Started Débutants, Getting Started, siemens, Edition 04/2006, 6ZB5370-1CL03-0BA2.
- [213] WinCC flexible Getting Started Experts, Getting Started, siemens, Edition 04/2006, 6ZB5370-1CM03-0BA2.
- [214] WinCC flexible 2008 Compact / Standard / Advanced, Manuel d'utilisation, Siemens, 07/2008, 6AV6691-1AB01-3AC0.

A functional and bond graph models for robust Supervision

(Full text in English)

Nouria TARI¹, Larbi SEKHRI¹, Hafid HAFFAF¹

¹Industrial Computing and Networking Laboratory, Computer Science Department, University of Oran1 Ahmed Ben Bella, B.P. 1524, El-M'Naouer-31000 Oran, Algeria

Abstract

In this paper an unified and integrated approach combining behavioral and functional aspects of the process to ensure an efficient online supervision in industrial field is proposed. Linear Fractional Transformation Bond Graph (BG-LFT) methodology is used to provide an on line robust Fault Detection and Isolation (FDI). This methodology is based on the behavioral and causal properties of the model to monitor specified components of the processes. Functional operating modes management is used to offer a decision making tool for online reconfiguration. The developed strategy is illustrated through an industrial steam generator application representing a part of a cardboard factory.

Keywords: Supervision, Robust FDI, Structural Diagnosis, Bond Graphs, Functional model, Reconfiguration

Received: November, 17, 2016

To cite this article:

Nouria Tari, Larbi Sekhri, Hafid Haffaf, "A functional and bond graph models for robust supervision", in: *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 166-171, ISSN 1582-5175.

1. Introduction

FDI activities provide to the operators synthetic and relevant alarms [1], while Fault Tolerant Control (FTC) indicates how the system operations can be continued [2], [3], [4]. Both approaches are mainly based on mathematical models [5], [6]. However, in supervision tasks, human operators consider the processes they operate in terms of functions they achieve. Therefore, functional modelling approaches provide operators with a clear view of the system's functional organization [7]. The proposed formalism describes a system from services provided by its components, and their organization into coherent Operating Modes (OMs). BG Model [8], [9] is well adapted to describe the inputs/ outputs of a service and its inner procedure adding behaviour aspect to the functional aspect brought by the notion of service. Moreover, structural and causal properties of the BG can be exploited to generate robust fault indicators based on LFT [10], [11]. From detected and isolated faults, available services list is updated in real time and the conditions to go from an OM to another are evaluated providing on line decision support system. System supervision consists in generation of robust Analytical Redundancy Relations (ARR) using BG-LFT [12], [13], construction of OM management graph, detection and isolation of faulty components; and displaying FDI and FTC decisions making information via Graphical User Interface (GUI).

2. Behavioural and functional models

To describe a system our approach uses three viewpoints: functional aspect [14], physic architectural and behaviour model [15], [16]. The approach rests on Generic Component Model (GCM) and its interpretation in BG sense. BG model adds to the functional GCM representation, behavioural aspect [17], allowing services evaluation and operating modes (OM).

2.1. Generic Component Model (GCM)

A system component provides one or more services described by variables it consumes (*cons*), variables it produces (*prod*), and a procedure (*proc*) transforming the former into the latter. Services may be provided *unconditionally* or on specific requests (*rqst*). Resources (*res*) are a set of hardware and software elements required to the service realization.

Definition1. A service s_i is defined by the 5-tuple $s_i = \langle cons_i, prod_i, proc_i, rqst_i, res_i \rangle$.

2.2. Operating Modes (OMs)

Systems are expected to achieve different objectives at different times. The set of services of a given component is structured into several OMs, associated with specific objectives. The switching between OMs can result from a user request or be automatically performed when faults are detected to put the system in safety conditions.

Definition2. OMs of a system are managed by an automaton $A(M, \tau, m^0)$ where:

- $M = \{m_i, i \in I_m\}$ is the set of OMs represented by the automaton vertices.
- $\tau = \{\tau_{ij}, i, j \in I_m\}$ is a set of transitions defined by $\tau_{ij} = \{m_i, m_j, c_{ij}\}$ where m_i is the origin OM, m_j is the destination OM, and c_{ij} is a firing condition
- $m^0 \in M$ is the initial OM.

2.3. GCM in BG sense

Consumed and produced variables of a service can represent information data or energy flows. BG [1], [15] is adapted here to describe a service. Based on the BG topology, the set of vertices is divided into four sets of components able to provide specific services: active elements (provide power supply service), passive elements (provide services of transformation, and storage), transformer elements, measurement elements

and connection elements.

In GCM, higher level components, aggregate lower level ones. Sensors, actuators and process components represented by BG vertices constitute the (lowest) field level; they provide elementary services. Functional decomposition corresponds in fact to the topology of the BG model. Its graphical analysis is equivalent to the BG causal path covering set of components through power variables:

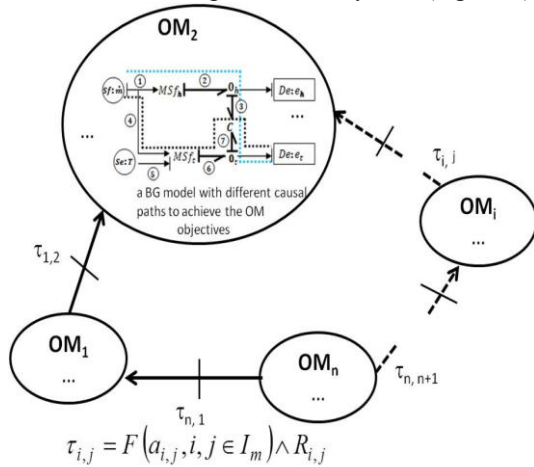
$$res(c) \subset R \cup C \cup I \cup TF \cup GY \cup Se \cup Sf \cup De \cup Df$$

The set of power variables are the consumed and produced variables: $cons(c) \cup prod(c) \subset \{e_i, f_i\}$

A causal path in the BG leads to a directed graph $G_p(C, A)$ where C is set of covered components and A corresponds to mutual influence: $proc(c) \subset G_p(C, A)$.

2.4. Model implementation

Automaton $A(M, \tau, m^0)$ is directly implemented to represent the OMs management of a system (Figure 1).



Legend: F : function. a_{ij} : availability of BG elements of the destination OM. R_{ij} : operator request.

Figure 1. Operating mode management

A BG corresponds to each OM. Reconfiguration possibilities result from the existence of paths in the BG model between consumed and produced variables of the higher level services corresponding to the OM objectives. If such path does not exist after a fault, OM switching must be considered to put the system in a OM for which the objective realization is possible.

3. BG-LFT theory for robust FDI

Any rational expression can be written in LFT form under two distinct parts (nominal and uncertain).

For simplicity, uncertain part will be presented just by modulated effort $MSe^*:w_R$. Any uncertain BG element can be represented by its BG-LFT [18], [19].

3.1. Robust ARR's generation from BG-LFT model

$i \in \{R, I, C, TF, GY\}$ in the LFT form consists in decoupling nominal element $i_n \in \{R_n, I_n, C_n, TF_n, GY_n\}$ part from its uncertain part $\delta_i \cdot i_n \in \{\delta_R \cdot R_n, \delta_I \cdot I_n, \delta_C \cdot C_n, \delta_{TF} \cdot TF_n, \delta_{GY} \cdot GY_n\}$. δ_i being a multiplicative uncertainty on the parameter i . BG in LFT form allows the ARR's generation composed of a nominal part (ARR_n) describing the system operation, and an uncertain part (ΔARR), used for residuals sensitivity analysis ($ARR =$

$ARR_n + \Delta ARR$) and for the calculation of detection thresholds. Thus, the idea is to transform diagnostic BG model into BG-LFT and to use algorithm developed in [5] for generating robust ARR's; the nominal part (n) is:

$$n = \Phi(\sum SSe, \sum SSf, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n) \quad (3.1)$$

and the uncertain part noted $b = \sum w_i$ with:

$$w_i = \Phi(SSe, SSf, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n, \delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_{RS}, \delta_{TF}, \delta_{GY}) \quad (3.2)$$

Where $\delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_{RS}, \delta_{TF}, \delta_{GY}$ are respectively the values of multiplicative uncertainties on the elements R, I, C, RS, TF and GY . Let us define a threshold of the residual r ($r = eval(ARR)$) noted a as:

$$a = \sum |w_i| \quad (3.3)$$

with $r \leq a$. Thus an adaptive threshold of the residual is generated in the form of an envelope:

$$-a \leq r \leq a \quad (3.4)$$

Boolean Faults Signatures Matrix (FSM) [18], [20] constructed from residuals; provide online information about availability of services equivalent to list of faulty physical BG elements.

4. Case study

The system to be supervised is the Steam Generation Process (SGP) implied in a process of corrugated cardboard manufacturing (Figure 2).

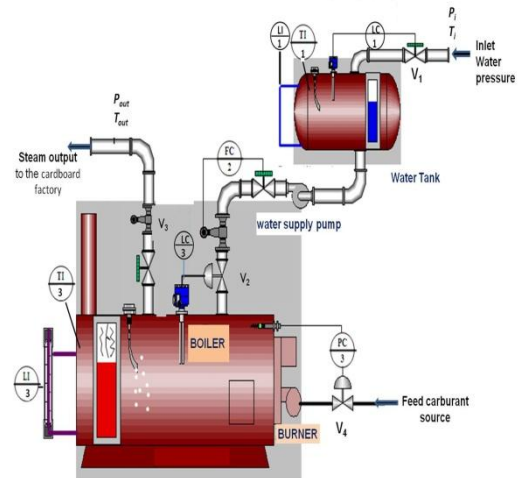


Figure 2. Overview and PID of the process

SGP is decomposed into a feed water tank, controlled flow water (measured by F_2), a supply pump system, a high pressure boiler heated by a burner through a controlled valve V_4 .

The produced steam via the outlet valve V_3 is used to form corrugated cardboard. Steam temperature, pressure in the boiler and water level are respectively measured by sensors T_3, P_3 and L_3 . The water receiver is filled by valve V_1 up to a nominal level. Level and temperature are respectively measured by sensors L_1 and T_1 . Operating Mode management Graph (OMG) of the global process is characterized by four main OMs:

OM1. No operation: no production of steam with temperature $T = T_{ambient}$ and a pressure $P = P_{atmospheric}$.

OM2. Starting Mode: reach an operating set point where it is possible to produce a steam ($T \geq 100^\circ C$ and

$P \geq 1$ bar). Temperature and pressure are independent and the steam quality is $x = 0$.

OM3. Steam Production: maintain temperature and pressure in the boiler in order to produce saturated steam with fixed quality. Temperature and pressure are dependent and linked by a thermodynamical relationship or Mollier charts: the steam quality is: $0 < x \leq 1$.

OM4. Emergency stop: put the system in safety conditions. Transition t_{ij} to switch from OM_i to OM_j is valid if every service belonging to OM_j is available and if the user has requested OM_j . The system is automatically switched to emergency stop OM as soon as the adjacent OM is unavailable. OM availability is evaluated on line by the FDI algorithm based on BG-LFT.

4.1. Word Bond graph (WBG)

SGP is modeled by considering the following hypothesis (i) water and steam in the boiler are in thermodynamic equilibrium, (ii) inside boiler mixture is with uniform pressure; (iii) boiler is bad insulated then subject to heat losses towards external environment; (iv) fluid in the feeding circuit is incompressible. WBG of the system is given in Figure 3.

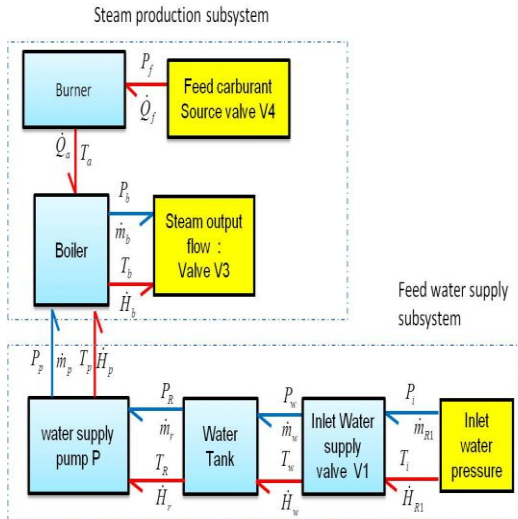


Figure 3. Word bond graph of the process

Global Bond Graph Model (BGM) in derivative causality (named diagnosis BG) is illustrated by Figure 4.

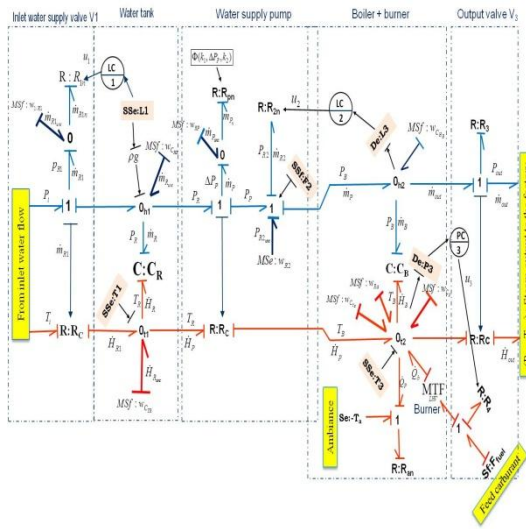


Figure 4. Diagnostic bond graph model in nominal operating mode

4.2. Faults Indicators generation

Robust ARR are generated from different junctions connected to at least one detector. Inlet water supply pipe: It consists in pipe and valve V_1 controlled by on-off LC1 level regulator. V_1 is modeled by R_1 modulated by the Boolean control signal u_1 . Uncertain parameter R_1 value is: $R_1 = R_{1n} + \Delta R_1$. The mass flow \dot{m}_{R_1} through the valve is calculated by nonlinear Bernoulli law:

$$\dot{m}_{R_1} = u_1 \cdot \frac{1}{R_{1n}} \cdot \sqrt{P_i - P_R} + \delta_{\frac{1}{R_1}} \cdot u_1 \cdot \frac{1}{R_{1n}} \sqrt{P_i - P_R} = \dot{m}_{R_{1n}} + \dot{m}_{R_{1unc}}$$

Where $\delta_{\frac{1}{R_1}}$ is the multiplicative relative uncertainty. Coupling of thermal energy with hydraulic one is modeled by R : R_C multiport element. Enthalpy flow through the pipe convected by the fluid is then:

$$\dot{H}_{R_1} = T_1 \cdot c_p \cdot \dot{m}_{R_1} \quad (4.1.)$$

T_1 and c_p are respectively the temperature and thermal capacity of the water. The first ARR is generated from junction 0h1:

$$ARR1: \dot{m}_{R_1} - \dot{m}_R - \dot{m}_p - \dot{m}_{R_{unc}} = 0 \quad (4.2.)$$

Unknown variables are eliminated using covering causal paths:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{R_1} &\rightarrow \text{Junction } 1_{h1} \rightarrow P_i \\ \dot{m}_{R_1} &\rightarrow \text{Junction } 0_{h1} \rightarrow SSe: L_1 \\ \dot{m}_R &\rightarrow C: C_R \rightarrow P_R \rightarrow SSe: L_1 \\ \dot{m}_p &\rightarrow SSf: F_2. \end{aligned}$$

Results of this elimination:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{m}_{R_1} &= \frac{1}{R_{1n}} u_1 \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} + \delta_{\frac{1}{R_1}} \frac{1}{R_{1n}} u_1 \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \\ &= \dot{m}_{R_{1n}} + \dot{m}_{R_{1unc}} \\ \dot{m}_R &= C_{h1n} \frac{dL_1}{dt} + \delta_{C_{h1}} \frac{dL_1}{dt} = \dot{m}_{R_n} + \dot{m}_{R_{unc}} \\ \dot{m}_p &= F_2 \end{aligned} \right. \quad (4.3.)$$

Substituting the expression of unknown variables, we obtain ARR1:

$$ARR1: \left\{ \begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{R_{1n}} u_1 \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} - C_{h1n} \frac{dL_1}{dt} - F_2 \\ a_1 &= |w_{C_{h1}}| = \left| \delta_{\frac{1}{R_1}} \frac{1}{R_{1n}} u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \right| + \left| \delta_{C_{h1}} \frac{dL_1}{dt} \right| \end{aligned} \right.$$

(4.4.)

Coupled stored thermofluid energy in the tank is modelled by the two-ports C : C_R , which consists in hydraulic capacity C_{h1} and thermal capacity C_{t1} . Because the receiver is under saturated, only thermal C : C_{t1} is modulated by hydraulic effort power variable. Knowing that the studied tank is cylindrical, C_h can be expressed as follows:

$$C_h = A_T \cdot (\rho_T \cdot g)^{-1} \quad (4.5.)$$

where A_T is the tank section ρ_T is the fluid density and g is the gravity constant. Relation between C_{h_n} and δ_{C_h} is given by the following expression:

$$C_h = C_{h_n} + \delta_{C_h} \cdot C_{h_n} \quad (4.6.)$$

where C_{h_n} is the nominal value of C_h . The second

ARR is generated from junction 0_{t_1} :

ARR2: $\dot{H}_{R_1} - \dot{H}_R - \dot{H}_p - \dot{H}_{R_{unc}} = 0$. Using the same covering causal path algorithm, we obtain:

ARR2:

$$\begin{cases} r_2 = \frac{1}{R_{1n}} \cdot u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \cdot C_{p_n} \cdot T_i - \\ T_1 \cdot C_{p_n} \cdot F_2 - C_{t_{1n}} \frac{d}{dt} [L_1 \cdot T_1] \\ a_2 = \left| \frac{\delta_1}{R_1} \frac{1}{R_{1n}} u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \right| + \delta C_p + \delta C_{t_1} \end{cases}$$

Water supply system: it consists of pump and flow valve V_2 controlled via the Boolean variable u_2 provided by level on off controller $LC2$ in the boiler. In BGM (Figure 4), the pump is modelled by a resistance R_p , modulated by the pump characteristic, given by equation (4.7.). This latter is given as a curve between the pressure ΔP_p and the mass flow generated by the pump:

$$\dot{m}_p = k_1 \cdot (P_p - P_R) + k_2 \quad (4.7.)$$

P_R and P_p are respectively the input and output pressures of the pump. k_1 and k_2 are the pump characteristic parameters.

The uncertainty on the mass flow at the output of the pump is due to the uncertainties δ_{k_1} and δ_{k_2} on the parameters k_1 and k_2 . Their nominal values are given by the constructor with an uncertainty of $\pm 5\%$: then the modulated source $MSf: w_{Rp}$ on the BGM of Figure 4 represents the uncertainty on this mass flow and is modulated by the following expression

$$w_{Rp} = -[\delta_{k_1} \cdot k_{1n} \cdot (P_R - P_p) + \delta_{k_2} \cdot k_{2n}] \quad (4.8.)$$

The flow parameter of the valve V_2 (modeled by R_2) depends on tubing details and is function of the valve opening. The nominal value R_{2n} and the uncertainty w_{R_2} can be determined as for the valve V_1 . The mass flow \dot{m}_{R_2} and its corresponding enthalpy flow \dot{H}_p are:

$$\begin{cases} \dot{m}_{R_2} = \frac{1}{R_2} \cdot \sqrt{P_B - P_{R_2}} \\ \dot{H}_p = T_1 \cdot c_p \cdot \dot{m}_{R_2} \end{cases} \quad (4.9.)$$

The uncertainty on the thermal energy transmitted by the water supply system to the boiler is due to the variation of the specific heat at constant pressure c_p according to the fluid temperature. It is given as follows:

$$w_{R_{2t}} = -\delta_{c_p} \cdot (T_2 \cdot c_{p_n} \cdot F_2) \quad (4.10.)$$

From junction 1 associated with pump and pipe, ARR3 is:

$$\begin{cases} r_3 = -(u_3 \cdot R_{2n} \cdot F_2)^2 - \frac{k_2}{k_1} P_3 - \frac{F_2}{k_1} + \rho_w \cdot g \cdot L_1 \\ a_3 = \left| \frac{w_{Rp}}{k_1} \right| + |w_{R_2}| \end{cases}$$

(4.11.)

Boiler is considered as a saturated thermofluid accumulator in homogeneous monophasic mixture liquid-steam configuration. The storage of hydraulic and thermal energies is modeled by the two ports element C : C_B . De : L_3 , De : T_3 , De : P_3 are level, temperature and pressure sensors in the boiler respectively, while P_{out} is the pressure imposed by the charge and supposed known. Dissipation of the heat flow \dot{Q}_p from the boiler

to the environment of T_a temperature via its wall is modeled by R : R_a . It can be determined using the thermal conductivity λ , thickness e_B and section A_B of the boiler wall, by the following relation

$$\dot{Q}_p = \lambda \frac{A_B}{e_B} \cdot (T_B - T_a) = Ka \cdot (T_B - T_a)$$

$$= (Ka_n + \delta \cdot Ka) \cdot (T_B - T_a) \quad (4.12.)$$

The heat transfer coefficient ($Ka = 1/Ra$) is difficult to evaluate analytically, this is why nominal value Ka_n and its uncertainty δ_{ka} have been identified experimentally using the equation of junction 0_{t_2} of the boiler BGM, and the measured data from the system during a healthy operation. Then the heat flow source MSf : $w_{Ra} = \delta_{ka} \cdot (T_3 - T_a)$ of Figure 4 represents the additional flow provided by the uncertainty on the thermal losses of heat flow. The mass (\dot{m}_B) and energy (\dot{H}_B) flow stored by the boiler depend on the variation of the mixture steam-liquid mass in the boiler as given in equations (4.13.).

$$\dot{m}_B = \frac{d}{dt} (\rho_l \cdot V_l + \rho_v \cdot V_v) \quad (4.13.)$$

$$\dot{H}_B = \frac{d}{dt} (\rho_l \cdot h_l \cdot V_l + \rho_v \cdot h_v \cdot V_v \cdot V_B)$$

Where $\rho_l(P_B)$, $h_l(P_B)$, $V_l(P_B)$ and $\rho_v(P_B)$, $h_v(P_B)$, $V_v(P_B)$ are respectively the density, the specific enthalpy and the volume of the liquid and the steam inside the boiler mixture. All those variables are function of the pressure variable P_B (measured by P3sensor) in the thermodynamical saturated regime. ARRr associated with the boiler are generated from junctions $0h_2$: $\dot{m}_p - \dot{m}_B - \dot{m}_{out} = 0$ and $0t_2$: $\dot{H}_p - \dot{H}_B - \dot{H}_{out} - \dot{Q}_p + \dot{Q}_b = 0$:

ARR4:

$$\begin{cases} r_4 = F_2 - \frac{d}{dt} [\rho_l(P_3) \cdot L_3 + \rho_v(P_3) \cdot (V_B - L_3)] - \\ \frac{1}{R_3} \sqrt{P_3 - P_{out}} \\ a_4 = |w_{CHB}| \end{cases}$$

ARR5:

$$\begin{cases} r_5 = F_2 \cdot c_{p_n} \cdot T_1 + Q_b - \\ \frac{d}{dt} [\rho_l(P_3) \cdot h_l(P_3 \cdot L_3) + \rho_v \cdot h_v(P_3) \cdot (V_B - L_3)] - \\ \frac{1}{Ra_n} \cdot (T_3 - T_0) - F_3 \cdot c_{p_n} \cdot T_3 \\ a_5 = |w_{Ra}| + |w_{CTB}| + |w_{Cp}| \end{cases}$$

The power provided by the burner Q_b depends on the fuel mass flow Sf : F_f controlled by on-off V_4 valve, the Lower Heating Value (LHV) of the fuel and control Boolean signal u_3 provided by pressure controller $PC3$:

$$Q_b = F_f \cdot LHV \cdot u_3 \quad (4.14.)$$

Liquid volume V_l is given by the sensor level L_3 , steam volume V_v is equal to the difference between the total geometric volume of the boiler V_B and V_l ($V_v = V_B - V_l$). ρ_l , ρ_v , h_l , and h_v are calculated using a polynomial interpolation algorithm. Taken into account the uncertainties on the variables ρ_l , h_l , V_l , ρ_v , h_v and V_v , the uncertainties on the hydraulic capacity (w_{CHB}) and thermal capacity (w_{CTB}) are given as follows:

$$w_{CHB} = \delta_{ch_2} \cdot \frac{d}{dt} (\rho_{l_n} \cdot V_{l_n} + \rho_{v_n} \cdot V_{v_n}) \quad (4.15.)$$

$$w_{c_{TB}} = \delta_{c_{t2}} \cdot \frac{d}{dt} (\rho_{l_n} \cdot h_{l_n} \cdot V_{l_n} + \rho_{v_n} \cdot h_{v_n} \cdot V_{v_n}) \quad (4.16.)$$

Where:

$$\delta_{c_{h2}} = \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{V_l} + \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{V_l} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{V_v} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{V_v}$$

$$\delta_{c_{t2}} = \delta_{h_l} + \delta_{V_l} \cdot \delta_{h_l} + \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{h_l} + \delta_{\rho_l} \cdot \delta_{V_l} \cdot \delta_{h_l} + \delta_{h_v} + \delta_{V_v}$$

$$\delta_{h_v} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{h_v} + \delta_{\rho_v} \cdot \delta_{V_v} \cdot \delta_{h_v}$$

δ_x represents estimation errors of the polynomial interpolation algorithm, deduced from thermodynamic table. The outlet enthalpy flow from the boiler to the factory can be calculated as:

$$\dot{H}_{out} = T_B \cdot c_p \cdot \dot{m}_B \quad (4.17)$$

Where c_p is the steam heat capacity at constant pressure. The uncertainty on the heat flow at the boiler output is due to the uncertainty δ_{c_p} . This latter corresponds to the estimation error of the polynomial interpolation algorithm used to calculate c_{p_n} . Then the flow source MS_f : w_{c_p} is modulated as follow

$$w_{c_p} = -\delta_{c_p} \cdot (T_3 \cdot c_{p_n} \cdot F_3) \quad (4.18.)$$

Temperature and pressure sensors (De : T_3 and De : P_3) cannot be dualized both, thus they form a material redundancy:

$$ARR6: T(P_3) - T_3 \quad (4.19.)$$

$T(P_3)$ is the saturated temperature function of the pressure calculated using a polynomial interpolation algorithm.

Other ARR concern controllers

$$\begin{cases} ARR7 = u_1 - LC1(L_1, L_{1ref}) \\ ARR8 = u_2 - LC2(L_3, L_{3ref}) \\ ARR9 = u_3 - PC3(P_3, P_{3ref}) \end{cases} \quad (4.20.)$$

4.3. Monitoring system in starting mode

In this mode (described in section 4), ARRs generated from the BG model are given by equations (4.21.).

$$\left\{ \begin{aligned} ARR_1 &= \frac{1}{R_1} \cdot u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} - C_{h_n} \cdot \rho_w \cdot g \\ &\quad \cdot \frac{dL_1}{dt} - F_2 \\ ARR_2 &= \frac{1}{R_1} \cdot u_1 \cdot \sqrt{P_i - \rho \cdot g \cdot L_1} \cdot C_{p_n} \cdot T_i - \\ &\quad T_1 \cdot C_{p_n} \cdot F_2 - C_{t_n} \cdot \rho_w \cdot g \cdot \frac{d}{dt} [L_1 \cdot T_1] \\ ARR_3 &= -(u_3 \cdot R_{2_n} \cdot F_2)^2 - \frac{k_2}{k_1} - P_3 - \frac{F_2}{k_1} + \rho_w \cdot \\ &\quad g \cdot L_1 \\ ARR_4 &= F_2 - C_{h_n} \cdot \frac{dP_3}{dt} \\ ARR_5 &= F_2 \cdot c_{p_n} \cdot T_1 + Q_b - c_{p_n} \cdot \rho_w \cdot g \cdot \frac{d(L_3 \cdot T_3)}{dt} \\ ARR_6 &= \frac{P_3}{\rho_w \cdot g} - L_3 \\ ARR_7 &= u_1 - LC1(L_1, L_{1ref}) \\ ARR_8 &= u_2 - LC2(L_2, L_{2ref}) \\ ARR_9 &= u_3 - PC3(P_3, P_{3ref}) \end{aligned} \right. \quad (4.21.)$$

(4.21.)

4.4. Supervision platform design

4.4.1. Monitorability analysis

The ability to detect and isolate faults is designed off line by the FSM. Technical specifications are given by the functional analysis based on the functional fault tree. Pertinent equipments concern lower level in the graph. This off line analysis is performed using a dedicated toolbox FDIpad [20]. ARRs and FSM are generated automatically from a BGM (Figure 5).

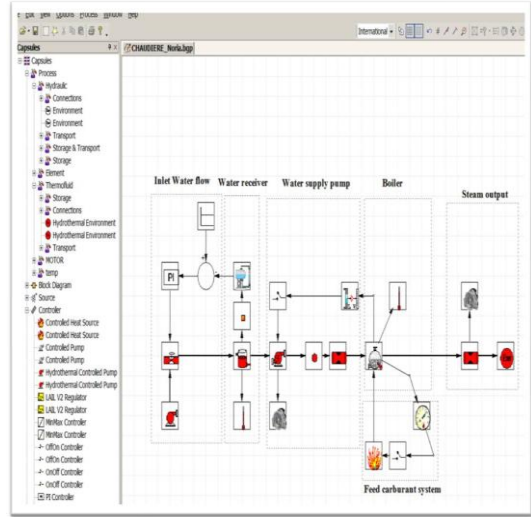


Figure 5. Model builder based on bond graph

FSM generated in starting mode is given in Figure 6.

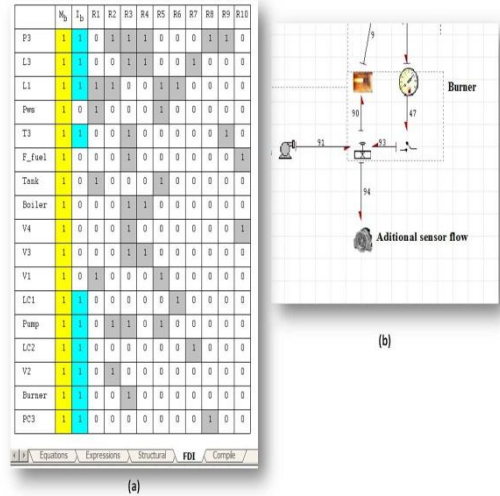


Figure 6. Diagnosability analysis in starting operating mode

After adding an additional fuel flow sensor, 10 pertinent components can be detected and isolated.

4.4.2. Experimental results

Simulation scenario consists on real implementation of generated robust residuals using Matlab Simulink Dspace system. Residual thresholds ($|a|$) are acquired from process real data. The first faulty situation is tested introducing a water leak in the tank (by opening the drain valve), ARR1 is sensible to this fault. The detectable value is evaluated using the uncertainty $|w_{c_{h1}}|$. This fault is associated with the availability of storage function by the tank. This fault is detectable but not isolable (Figure 6).

5. Conclusion

Two reliable informations should be displayed to the operator in his supervision task: on line FDI and means of reconfiguration. The present paper proposes a unified and integrated approach of supervision combining two different approaches: BG-LFT providing the operator on line robust FDI and, functional OMs management offering a decision making tool for reconfiguration.

6. References

- [1] VENKATASUBRAMANIAN, V., "Systemic Failures: Challenges and Opportunities in Risk Management in Complex Systems", Perspective article, in: *American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Journal*, 2011, vol. 57, no. 1, pp. 2-9, ISSN: 1547-5905.
- [2] ISERMANN, R., *Fault-Diagnosis Applications Model-based condition monitoring: Actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems*, New York: Springer, 2011.
- [3] TOGUYÉNI, A.K.A., CRAYE, E., SEKHRI, L., "Study of the Diagnosability of Automated Production Systems Based on Functional Graphs", in: *International Journal of Mathematics for Computers in Simulation (MCS)*, Elsevier, 2006, vol. 70, pp. 377-393, ISSN 0378-4754.
- [4] MERZOUKI, R., SAMANTARAY, A.K., PATHAK, P.M., OULD BOUAMAMA, B., *Model-Based Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control In: Intelligent Mechatronic Systems*, London: Springer, 2013.
- [5] BLANKE, M., KINNARET, M., LUNZE, J., STAROSWIECKI, M., *Diagnosis and fault-tolerant control*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2016.
- [6] TARI N., SEKHRI L., Haffaf H., Ould- Bouamama B., "Monitoring system for manufacturing process: Application to a cardboard factory", in the Control, Engineering and Information Technology (CEIT) 2015 3rd International Conference, Tlemcen, Algeria, 25-27 May 2015, available from: DOI: 10.1109/CEIT.2015.7233033.
- [7] DJAKER, A., SEKHRI, L., "Structure theory of Petri nets to deal with diagnosability of automated manufacturing systems", in: *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2016, vol. 64, no.3, pp. 121-123, ISSN 1582-5175.
- [8] THOMA, J.U., OULD BOUAMAMA, B., *Modeling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering, A Bond Graph Approach*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2000.
- [9] OULD BOUAMAMA, B., MEDJAHER, K., SAMANTARAY, A.K., STAROSWIECKI, M., "Supervision of an industrial steam generator. Part I: Bond graph modelling", in: *Control Engineering Practice*, 2006, vol. 14, no. 1, pp. 71-83, ISSN 0967-0661.
- [10] SAMANTARAY, A.K., OULD BOUAMAMA, B., PATHAK, P.M., Merzouki, R., *Intelligent Mechatronic Systems Modeling, Control and Diagnosis*. 1st ed, London: Springer-Verlag, 2016.
- [11] DJEZIRI, M.A., OULD BOUAMAMA, B., DAUPHIN-TANGUY, G., MERZOUKI, R. "LFT Bond Graph Model-Based Robust Fault Detection and Isolation". in *Bond Graph Modelling of Engineering Systems Theory, Applications and Software Support*, B. Wolfgang Editor., New York: Springer, 2011, pp.105-133.
- [12] OULD BOUAMAMA B., TARI N., HAFFAF H., "Bond graph-LFT for robust diagnostics, Application to a thermal power plant", in *International symposium on the monitoring of industrial systems (CIMCI'2014)*, 2nd edition, Marrakech, Morocco 25-26 December 2014.
- [13] TARI N., HAFFAF H., OULD BOUAMAMA B., "BG for robust supervision of industrial systems: Application to cardboard factory", in *International Conference on Engineering of Industrial Safety and Environment (ICISE'14)*, Oran, Algeria, 26-27 January 2014.
- [14] BENALLEL, M., HAFFAF, H., MEGHABBAR, A., "Sensor Placement for Monitoring Systems Modelled by Bond Graph", in: *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2016, vol. 64, no. 1, pp. 105-116, ISSN 1582-5175.
- [15] CHEN Y., ZHAO M., HUANG J., "A State-Behavior-Function Based Approach for Functional Modeling of Multi-State Systems and its application", in 28th International Conference on Design Theory and Methodology, Charlotte, North Carolina, USA, 21-24 August 2016.
- [16] SCHNEIDER P., KÖHLER A., REITZ S., JANCKE R., "Behavioral and Network Modeling for Efficient Design of Adaptive Systems", in ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Newport, Rhode Island, USA, 8-10 September 2014.
- [17] GHOSHAL, S.K., SAMANTARAY, A.K. "Bond Graph Model-Based Fault Diagnosis". in *Bond Graph Modelling of Engineering Systems Theory, Applications and Software Support*, B. Wolfgang Editor. 2nd ed., New York: Springer, 2011, pp. 227-265.
- [18] DJEZIRI, M.A., OULD BOUAMAMA, B., DAUPHIN-TANGUY, G., MERZOUKI, R. "LFT Bond Graph Model- Based Robust Fault Detection and Isolation". in *Bond Graph Modelling of Engineering Systems, Theory, Applications and Software Support*, B. Wolfgang Editor. 1st ed., New York: Springer Verlag, 2011, pp.105-133.
- [19] JHA M S., DAUPHIN-TANGUY G., OULD BOUAMAMA B., "Robust FDI based on LFT BG and relative activity at junction", Proceedings of the 2014 European Control Conference (ECC), Strasbourg, France, 24-27 June 2014, IEEE, 2014, pp.938-943.
- [20] OULD BOUAMAMA, B., "Bond graph approach as analysis tool in thermofluid model library conception", in: *Journal of Franklin Institute*, 2003, vol. 340, no. 1, pp.1- 23, ISSN 0016-0032.

Funding Sources and/or Acknowledgments

This work was financially supported by the University of Oran 1 of Algeria, under the Scientific Project: CNEPRUE "Supervision and diagnosis of industrial systems", No 01820140090 / 2015.

Biography



Nouria TARI was born in Tlemcen (Algeria), on August 23, 1984.

She received the Engineer degree in Computer science from University of Oran1 (Algeria), in 2007.

She is a post-graduate for PhD degree in computer science at University of Oran1 (Algeria).

Her research interests: industrial supervision, Bond Graph based diagnosis and Monitoring.

e-mail address: n.tari@yahoo.fr.



Hafid HAFFAF was born in Oran (Algeria), on February 2, 1964.

He received the PhD degree in computer science from University of Oran1 (Algeria), in 2000.

He is Professor at the University of Oran1 (Algeria).

His research interests concern: Industriel diagnosis, optimisation and systems reconfiguration.

e-mail address: Hafid.haffaf@univ-oran.dz



Larbi SEKHRI was born in Oran (Algeria), on December 10, 1959.

He received his PhD degree in computer science from University of Oran1 (Algeria), in 2006.

He is Professor at the Computer Science Department of Oran University (Algeria).

His research interests concern: formal modeling in distributed and mobile systems.

e-mail address: Larbi.sekhri@univ-oran.dz.

Monitoring System for Manufacturing Process

Application to a Cardboard Factory

Tari Nouria, Sekhri Larbi, Haffaf Hafid

Industrial Computing and Networking Laboratory
Computer Science Department, University of Oran,
BP. 1524 Oran, Algeria
n.tari@yahoo.fr, {larbi.sekhri, haffaf.hafid}@univ-oran.dz

Ould Bouamama Belkacem

LAGIS-UMR CNRS 8146 Ploytech'lille, USTL
Cit  Scientifique F5655 Villeneuve d'Ascq Cedex France
belkacem.bouamama@univ-lille1.fr

Abstract—In this paper we present two approaches for designing a monitoring system for a manufacturing process of industrial glue in a corrugated board factory. A graphical model to generate fault indicators allowing checking detectability and localisability is used to considered process. These indicators are obtained by applying different steps of structural analysis. Firstly, a bipartite graph is used as the basic modeling theory whereas SIMATIC PCS7 software tool is used to simulate various faults and observe reactions of the designed supervision system. Secondly, SYMBOLS 2000 software tool based on bond graph model is introduced for performance evaluation.

Keywords—*Structural analysis; Bipartite graph; Monitoring; Analytical redundancy relation; SIMATIC PCS7; SYMBOLS 2000*

I. INTRODUCTION

The complexity of Automated Production Systems (APS) and demand from industrial partners for equipments availability, make functioning surety a major preoccupation of managers in industrial domain [1]. Generally, APS are used to control industrial processes, such as physical and chemical processes, and so on [2]. These systems are characterized by a control part and operational part to give an added value to products flow according to the production, the exploitation, and the security objectives [3]. Many formal methods using different approaches for specification and validation of APS exist in literature [4]. Among graphical models existing in literature we can give bond graph, Petri nets, automaton and timed automaton for the supervisory control [5-8]. In this work, we test the power of the combination of FDI method with structural analysis using structural models: bipartite graph and bond graph [9]. SIMATIC PCS7 and SYMBOLS 2000 software tools are used for faults simulation and performance evaluation respectively of the designed monitoring system.

The paper is organized as follows: Section 2 introduces specifications of our industrial case study. The water part is described and analyzed. The analytical model of the water part is presented in a detailed manner. In section 3, SIMATIC PCS7 software tool is used to develop our monitoring system. Experiment results of our case study are given. In section 4, we present a bond graph based approach to design formally the monitoring system exploiting toolbox offered by software

tool SYMBOLS. Finally, we conclude our work and discuss some perspectives.

II. CASE STUDY: GLUE PREPARATION STATION

A. Glue station specifications

The case study is a part of an APS formed by a corrugated cardboard manufacturing. Glue is fabricated according to the instructions of a recipe, developed from the patent "STEIN HALL" [10]. Raw materials (water, starch, borax and soda) are introduced with proportions into the mixer from their tanks controlled by valves. In the mixer, manufactured product is carried out by infusion and heating raw materials where the temperature is controlled by a regulator. Two main modules form the manufacturing station: one composed of four parts dedicated to supply ingredients; the second module related to storage and supply the glue to the machine. In this work, only the water part in initial state without additional sensors is considered. This part consists of three vessels: the first contains ingredient (water), the mixer and the vessel to store the finished product.

B. Water part modelling

The functioning of an automated production system (APS) depends on the components operation. This functioning can be represented by a set of algebraic equations and/or differential, linear or nonlinear equations describing the temporal evolution of a set of variables. We distinguish known variables (measures, instructions and commands) and unknown variables (state variables, unknown inputs and disturbances). Existing relations in the initial state of the water part can be defined as follows:

- Tank1 (Water): $\dot{h}_1(t) = q_1(t)$

- Outlet pipe 1 (Water): $q_1(t) = k_1\sqrt{h_1(t)}$

- Valve 1 (numerical): $q_2(t) = \alpha_1 q_1(t)$

- Pump 1 (classical): $q_3(t) = \beta_1 q_2(t)$

- Valve 2 (motorized): $q_4(t) = \gamma_1 q_3(t)$

- Valve 3 (numerical): $q_5(t) = \alpha_2 q_4(t)$

- Valve 4 (numerical): $q_6(t) = \alpha_3 q_5(t)$

- Mixer: $\dot{h}_2(t) = q_6(t)$

- Sensor 1 (tank 1 level): $y_1(t) = h_1(t)$

- Sensor 2 (mixer level): $y_2(t) = h_2(t)$

- Constraint 1: $\dot{h}_1(t) = \frac{dh_1(t)}{dt}$

-Constraint 2: $\dot{h}_2(t) = \frac{dh_2(t)}{dt}$

Where:

q_i : flow i , h_j : level j , y_k : output sensor k ,
 k_l : pipe l parameter, α_m : valve m parameter,
 β_n : pump n parameter and γ_f : valve f parameter

The water part model remains valid for the parts of other ingredients (starch, borax and soda) with different index. The global model of the APS is obtained by combining models of its physical components.

C. Structural analysis

Structural analysis is a powerful tool, enabling analyzing structural properties of an APS, based only on the existence of relationships between variables, independently of their values. This analysis allows thus to determine failures detectability and localizability, by generating Analytical Redundancy Relations (ARRs) from the model. ARR are satisfied only when the system operates normally. In this work, the system is modeled graphically by a bipartite graph or by an incidence matrix. The incidence matrix is defined as follows:

Let $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ be the set of constraints, $K = \{K_1, K_2, \dots, K_c\}$ the set of known variables and $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ the set of unknown variables.

Residuals are constructed by keeping only the known variables. Their values must be zero when the system behavior is consistent with respect to the model. The incidence matrix associated to a bipartite graph is a Boolean matrix where the rows correspond to constraints and the columns correspond to variables. A "1" in box (i, j) means that the variable j appears in equation i .

1) *Incidence matrix of the water part*: The matching concept is the basic tool of structural analysis. Table I illustrates the incidence matrix of the water part in initial state.

TABLE I. INCIDENCE MATRIX OF THE WATER PART

	h_1	\dot{h}_1	h_2	\dot{h}_2	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	y_1	y_2
C_1		1			1							
C_2	1				1							
C_3					1	1						
C_4						1	1					
C_5							1	1				
C_6								1	1			
C_7									1	1		
C_8				1						1		
d_1	x	1										
d_2			x	1								
m_1	1											1
m_2			1									1

Where C is a simple constraint; d is the derivation and m the measurement. The matching is depicted by gray boxes.

2) *Obtained relations after matching*:

$$C_1 : q_1(t) = \dot{h}_1(t), \quad C_1(\dot{h}_1) \rightarrow q_1$$

$$C_2 : 0 = k_1 \sqrt{h_1(t)} - q_1(t),$$

$$C_2(h_1, q_1) \rightarrow 0 \Rightarrow C_2(m_1(y_1), C_1(d_1(m_1(y_1)))) = 0$$

$$C_3 : q_2(t) = \alpha_1 q_1(t), \quad C_3(q_1) \rightarrow q_2$$

$$C_4 : q_3(t) = \beta_1 q_2(t), \quad C_4(q_2) \rightarrow q_3$$

$$C_5 : q_4(t) = \gamma_1 q_3(t), \quad C_5(q_3) \rightarrow q_4$$

$$C_6 : q_5(t) = \alpha_2 q_4(t), \quad C_6(q_4) \rightarrow q_5$$

$$C_7 : q_6(t) = \alpha_3 q_5(t), \quad C_7(q_5) \rightarrow q_6$$

$$C_8 : 0 = \dot{h}_2(t) - q_6(t), \quad C_8(\dot{h}_2, q_6) \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \overline{C_8}(d_2(m_2(y_2)), C_7(C_6(C_5(C_4(C_3(C_1(d_1(m_1(y_1)))))))))) = 0$$

$$d_1 : \dot{h}_1(t) = \frac{dh_1(t)}{dt}, \quad d_1(h_1) \rightarrow \dot{h}_1$$

$$d_2 : \dot{h}_2(t) = \frac{dh_2(t)}{dt}, \quad d_2(h_2) \rightarrow \dot{h}_2$$

$$m_1 : h_1(t) = y_1(t), \quad m_1(y_1) \rightarrow h_1$$

$$m_2 : h_2(t) = y_2(t), \quad m_2(y_2) \rightarrow h_2$$

3) *Directed structural graph*: Graphs contain all information of a structural model, so they can highlight all

system structural properties. A number '1' in (i, j) position in the incidence matrix indicates the existence of an edge connecting the constraint C_i to a variable z_j . Directed structural graph associated to the water part in initial state is given by fig. 1.

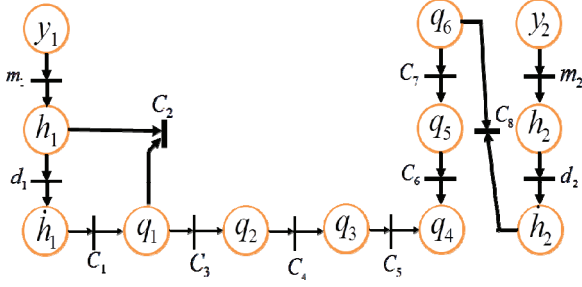


Fig. 1. Directed structural graph

4) *Analytical Redundancy Relations (ARRs) of water part:* An ARR is a relationship resulting from the nominal model of the system (no failures or disturbances) by involving only known variables (input variables, outputs and their derivatives) [11].

$$ARR1: 0 = k_1 \sqrt{y_1(t)} - \frac{dy_1(t)}{dt}$$

$$C_2(m_1(y_1), C_1(d_1(m_1(y_1)))) \rightarrow 0$$

$$ARR2: 0 = \frac{dy_2(t)}{dt} - \alpha_3 \alpha_2 \gamma_1 \beta_1 \alpha_1 \frac{dy_1(t)}{dt}$$

$$C_8(d_2(m_2(y_2)), C_7(C_6(C_5(C_4(C_3(C_1(d_1(m_1(y_1)))))))))) \rightarrow 0$$

5) *Signatures table:* The analysis of the residues signatures table allows us to verify structural properties as detectability and localizability. The signatures table of the water subpart is illustrated by table II.

TABLE II. RESIDUES SIGNATURES OF THE WATER PART

	m_1	m_2	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	d_1	d_2
r_1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r_2	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Table II allows us to detect all faults that may occur at the water part and to locate structurally the pipe1 failure (its signature is different from all other signatures). The defects related to tank 1 can be distinguished from other defects due to their different signatures.

III. MONITORING SYSTEM DEVELOPMENT AND SIMULATION

SIMATIC PCS7 is a software tool used as platform for applications development ensuring monitorability of our glue factory. With its open and flexible architecture, SIMATIC

PCS7 enables APS control. This is done by building Continuous Function Chart (CFC) providing various functionalities of the required application. Each CFC is an interconnection of several blocks where each one ensures an accurate sub-function. These CFCs are executed in a given order by the Sequential Function Chart (SFC) editor. From the water part diagram, we can build the corresponding CFC. A set of blocks are interconnected in order to compute fault indicators. To detect and isolate the possible failures, it is essential to evaluate generated residues in real time. The first residue for example is sensible to defects of water tank and its level sensor. This calculus is made from the equation (1) of residue r_1 :

$$\left(0 = k_1 \sqrt{y_1(t)} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Therefore, we need blocks enabling to acquire the signal representing water tank level (y_1) necessary for residue evaluation. When a CFC diagram corresponding to r_1 is built it is put in process mode to evaluate in real time its value. If this value belongs to an interval of thresholds then r_1 is considered as null indicating a normal functioning of water tank and its level sensor else a fault exists in the corresponding components. Minimum and maximum thresholds are set for each residue in order to avoid false alarms and non-detections. Faults detection and localization become a verification operation of computed residuals.

We focus on the water part depicted by Fig. 2 where all components are shown across the interface carried out by PCS7. Fig. 2 illustrates the water part made of tank water and mixer with initial sensors, it enable us to explore other views of water part as additional sensors introduced to enhance components diagnosability. Also, it is possible to have a general view of our glue station. In our study, only single faults are considered. Simulated failures are: partial or total plugging of pipe1, partial or full blockage of the valves in open state, pump blockage, leakages of tank1 and mixer, as well as defects in their corresponding sensors. After provocation of one of these defects, we can clearly see the influence on the concerned residues. Once residues are calculated their values are displayed via graphical interface according to selected view. By comparing obtained vector to theoretical signatures, we will find the most similar signatures. The corresponding columns will flash with suspect components and an alarm message is displayed indicating these components. We conclude that structural analysis improves the possibilities of the monitoring system using WinCC and simulation toolboxes.

IV. BOND GRAPH MODELLING

In this section we present a monitoring system design based on Bond graph approach. We use Bond graph software tool SYMBOLS (SYstem Modeling by BONDgraph Language and Simulation) to deal with industrial process of glue

manufacturing studied in section II. Bond graph (BG) is a graphical modeling language based on an energetic description

of physical phenomena.

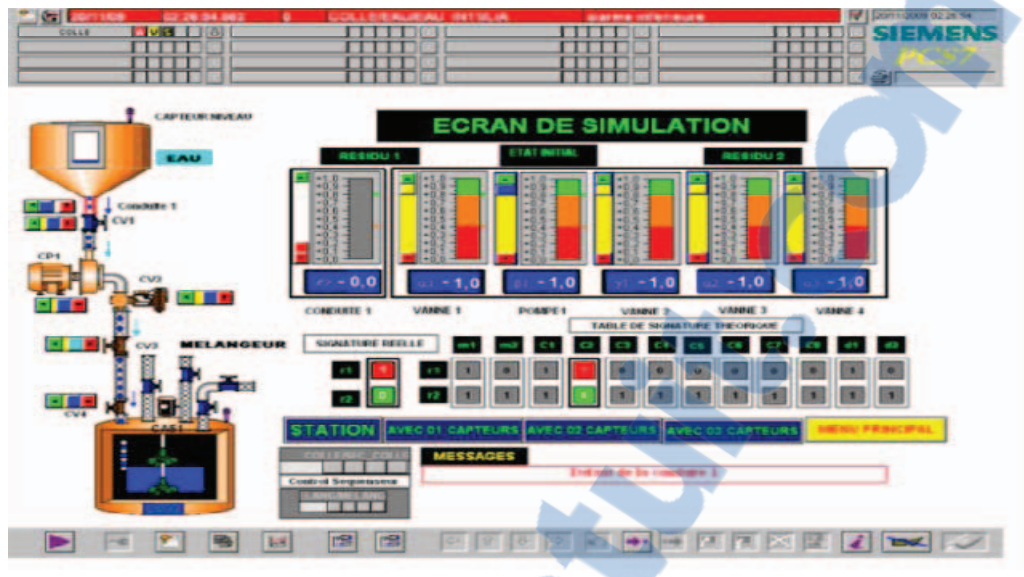


Fig. 2. Simulation screen: detectable and structurally localizable fault

On a Bond graph model and by analogy with the bipartite graph; we define the sets of unknown variables X , known variables K and constraints Φ . Each element of the Bond graph model is governed by a so-called behavior constraint, containing two unknown variables: the effort e and the flow f . Junctions 0 and 1 describe the links between different elements by defining the relationships of effort conservation and flow conservation, respectively.

Known variables (K) represent detectors of effort (De), flow (Df) and control variables which can be constant sources of effort Se , flow Sf or variable (modulated) sources MSe and MSf . Unknown variables (X) represent effort (e) and flow (f) variables of all elements of the Bond graph model. Causal relations and effect relations within a system are highlighted by the line placed perpendicular to the link between two components indicating the direction in which effort is known.

A causal path is an alternation of links and basic elements, such that all elements have a complete and correct causality. ARR's generation on a graph model is done through the elimination of unknown variables e_i and f_i in structural constraints (derived from equations at junctions 0 and 1). This is done by taking the causal path from known variables to unknown variables. The structure of generated ARR's form a binary matrix S_{ji} called failures signatures matrix giving information on the sensitivity of residues to each failure occurrence. A component failure is detectable if its associated variable is present in at least one ARR. This failure is localizable if and only if its signature is unique.

SYMBOLS 2000 is a powerful tool for modeling, simulation and control software systems for a wide variety of industrial

applications. Its environment is composed of four parts: *BondPad*, *Controls*, *FDIPad* and *Simulator* [12]. In the case of a thermo-fluid plant monitoring, the starting point of ARR's generation is the Piping AND Instrumentation Diagram (P&ID) of the considered thermo-fluid process, constructed according to ISO standards. P&ID of manufacturing process of industrial glue is illustrated by fig. 3 where the global system structure is shown. We can distinguish different parts with their glue ingredients (water, starch, borax and soda), each one composed by silo, digital valves, motorized valve and pump. The mixer is used to manage two glue stocking tanks, and it is common to the previous components. These two tanks are linked to the cardboard factory chain. When a tank is failed the second is used as redundancy with the same characteristics. Fig. 3 offers to end user the ability to visualize system evolution.

SYMBOLS is used to represent technological components and lines for their connection. The inputs and outputs can represent energy flows (power variables as mass, flow, pressure, etc.) for the technology components and information flows for the sensors and correctors [11]. In the graphical model of our glue station, we can distinguish four sub models composed by capsules interconnected by Bond graph links to ensure associated function: ingredient supplying, mixing, and stocking obtained glue and so on. The obtained model after validation is used to generate dynamical model in form of state equations in term of variables and parameters characterizing different system components; sensors and controllers. To ensure that all generated equations are correct, we define terms of all variables governed by nonlinear equations. ARR's and faults signatures matrix are generated afterwards.

Once the dynamical model is obtained, ARR of the process are generated in a symbolic form enabling to build signatures matrix of theoretical faults. Monitorability analysis of the process components (fault detectability and localizability) consists in analyzing the faults signatures matrix. Some components are considered no failed; their corresponding rows are thus deleted from the signature matrix. Generated ARRs

are evaluated periodically to verify fault presence in the system offering ability to detect their occurrence. Once residues values are obtained, the real signature is compared to that belonging to theoretical table in order to detect and isolate failures. In this work, we are interested specifically in monitoring motorized valves, pumps and tanks.

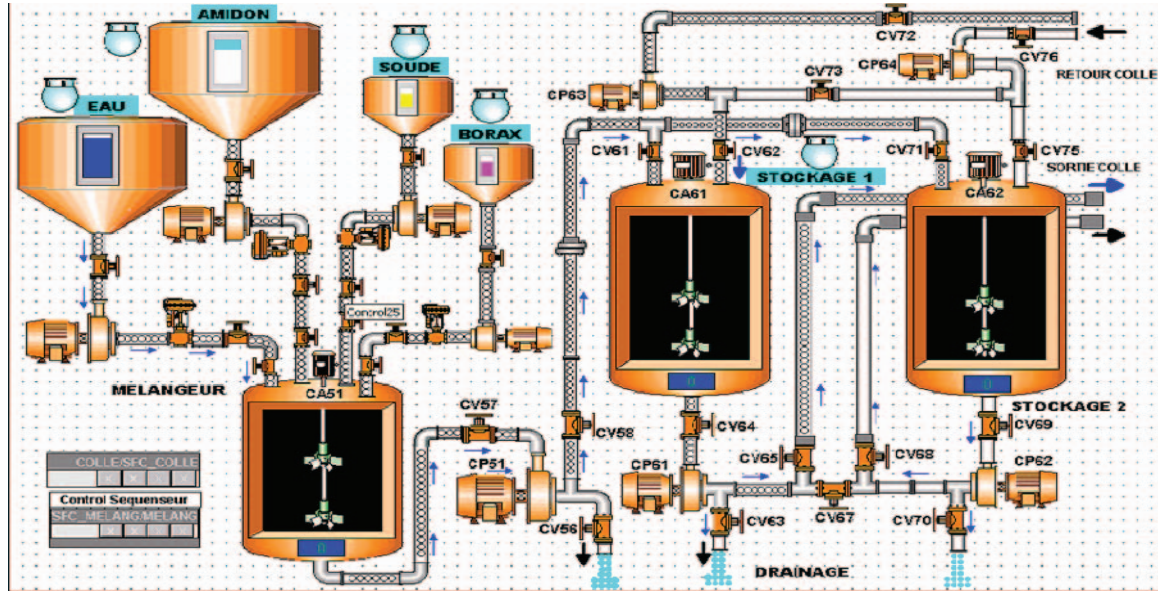


Fig. 3. P&ID of glue manufacturing plant

The resulted signature matrix is shown in Fig. 4, where R_1, R_2, \dots, R_8 are residues corresponding to generated ARRs, M_b and I_b represent respectively the failures detectability and localizability.

equal to one) and localizable (their signatures are unique); other components of the part water (different sensors and controllers are also monitorable). Furthermore, it is possible to propose a placement of additional sensors to improve the monitorability of the water part. This situation leads to ARRs generation and signature matrix; and to decide on sensors number and their optimal placement.

Generated ARRs are intended to be used in real-time monitoring applications. However, to test the corresponding residues and to determine their sensitivity to different faults (some failures cannot be brought into the real process), a simulation model is necessary.

In order to introduce failures in this model, we can change the values of components parameters by acting upon sliders on which we have previously specified the lower and upper bounds. So we can position the cursor of each parameter on any value within the defined interval. This is possible before the beginning of the simulation or even after. The simulation results are provided as graphical curves.

An example of this simulation is given in Fig. 5, where a defect of leakage is introduced at water storage tank (tank1), and the mixer (tank2). These defects are introduced at time 85.83s. At this point we remark a fluctuation in the water mass in both tanks, and residues are different from zero far from permissible values. At time 262.28s, we correct the faults by choosing values no trespassing acceptable thresholds for parameters in equations computing residues. The filling of tanks has been taken back normally and the residues back to zero. This situation means a return to a normal operation of our case study.

	M_b	I_b	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
me1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0
m3Ub	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
me2	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
me3	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
mQp	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
mFlow	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
m1Ub	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
mu2b	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
OnOffCo3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Valve2	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
Tank1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Valve3	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0
Valve4	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Tank3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Tank2	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Control2	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
OnOffCol	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
OnOffCo2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Fig. 4. Faults signatures matrix

According to the faults signatures matrix, all components indicated in the specifications are monitorable ($M_b=1, I_b=1$): their faults are detectable (there exists at least one residue

V. CONCLUSION

SYMBOLS 2000 software offers the ability to model any system regardless of its physical nature. This software tool can also be used to ensure structural analysis of a system, generate ARRs which will be its failures indicators and ensure monitorability in terms of failures detectability and localizability. SYMBOL 2000 allows also sensors placement.

These tasks are performed using a single theoretical tool: The Bond Graph. After system modeling, the following tasks until obtaining ARRs and signatures table are all performed automatically. Moreover, one can simulate different failures which are provoked and visualize the reaction of monitoring system in the form of graphical curves.

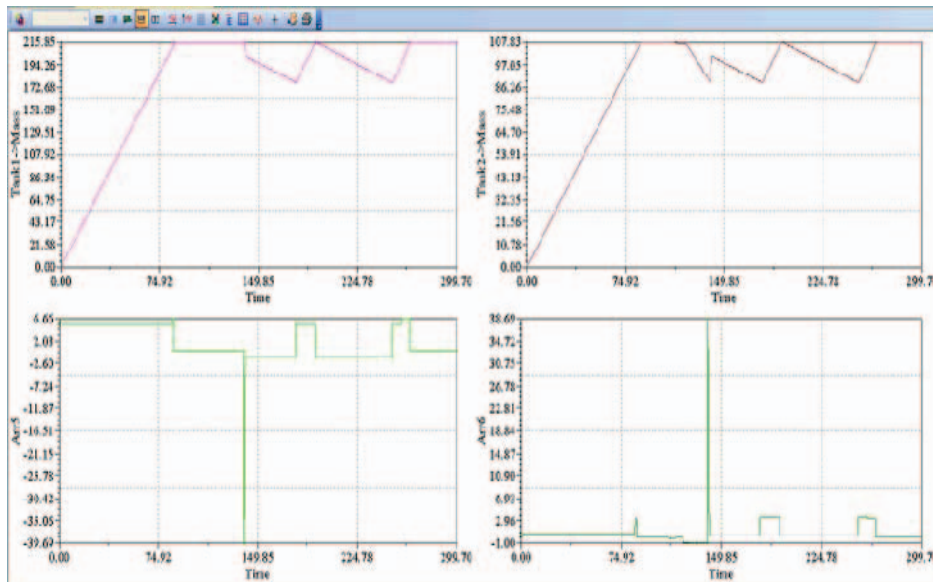


Fig. 5. Simulation results of a leakage in tank1 and in the mixer

On the other hand, PCS7 package is also a tool for system modeling and simulation where anyone can integrate an FDI unit, using any kind of model including Bond graph. SIMATIC PCS7 tool is an efficient platform for designing supervision system, thanks to its different editors and its flexibility. Furthermore, it provides us with all tools allowing us to design an interactive graphical user interface that offers a view of the process. This gives us the ability to visualize the system behavior under different operating modes including defectives ones.

We have applied the SIMATIC PCS7 to design a monitoring system for an industrial glue manufacturing process. The FDI module has been integrated in this software platform and the visualization of the process was possible through the interactive graphical interface. An extension of the monitoring system is possible by introducing a fault tolerance module in the software PCS7, and then, it could be exploited to reconfigure the system.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the cardboard factory, Oran, Algeria.

REFERENCES

[1] F.Z. Benani, L. Sekhri and H. Haffaf, "Supervision Architecture Design for Programmer Logical Controller including Crash Mode," *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, vol. 6, No. 11, pp. 10-20, October 2014.

[2] B. Ould-Bouamama, R. El Harabi, M.N. Abdelkrim and M.K. Ben Gayed, "Bond graph for the Diagnosis of Chemical Processes," *Computers and Chemical Engineering*, 36, 301-324, 2012, Elsevier.

[3] A.K.A. Toguyéni, E. Craye and L. Sekhri, "Study of the Diagnosability of Automated Production Systems Based on Functional Graphs," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 70, issues 5-6, 24, pp. 377-393, Elsevier, February 2006.

[4] L. Sekhri and H. Haffaf, "Linear Hybrid Automaton Generation Using Mapping Algorithm for Hybrid Dynamic Systems," *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, vol.6, No. 10, pp. 1-10, September 2014.

[5] A. Zaidi, M. Tagina and B. Ould Bouamama, "Reliability Data for improvement of Decision-Making in Analytical Redundancy Relations Bond Graph based Diagnosis," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Montréal, Canada, July 6-9, 2010*.

[6] R. David and H. Alla, *Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets*, 2005, Springer.

[7] B. Brandin and W.M. Wonham, "Supervisory control of timed discrete event systems," *IEEE Trans. on Automatic control*, vol. 39, 2, pp. 329-341, 1994.

[8] B. Ould Bouamama, G. Biswas, R. Loureiro and R. Merzouki, "Graphical methods for diagnosis of dynamic systems: Review," *Annual reviews in control*, 38:139-219, 2014.

[9] P. Gawthrop and B. Geraint, *Bond Graph Modeling*, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 27, 2007.

[10] *Process STEIN-HALL*, French Patent FR2, 386-593.

[11] F. Busson, *Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés*, PhD Thesis, University of Science and Technologies of Lille, France, 2002.

[12] B. Ould Bouamama, M. Starswiecki and A.K. Samantary, "Software for Supervision System Design in Process Engineering," *IFAC World Congress*, pp. 691-695, 2006.

Résumé

Si les modèles de comportement mathématique sont précieux pour concevoir des algorithmes efficaces de détection et d'isolement des défauts (FDI) et de reconfiguration dans les tâches de supervision, les opérateurs humains ne considèrent pas les processus qu'ils opèrent selon leurs modèles quantitatifs mais plutôt selon leurs fonctions. Dans le présent travail, nous proposons une approche unifiée et intégrée combinant les aspects comportementaux et fonctionnels d'un système, pour assurer une supervision en ligne efficace dans le domaine industriel. Le modèle Bond Graph (BG), en tant qu'approche unifiée, multidisciplinaire et compréhensible, convient parfaitement à la description des systèmes industriels. En effet, cet outil graphique les considère tous comme une interconnexion d'un ensemble de composants échangeant des flux d'énergie, ce qui le rend adapté à n'importe quel procédé. Afin de tirer profit de ces différentes caractéristiques intéressantes, nous proposons de se baser sur le modèle BG pour assurer une surveillance fiable des composants spécifiés du procédé. En effet, les propriétés structurelles et causales de ce modèle peuvent être exploitées pour générer des indicateurs permettant de détecter et de localiser les défauts survenus dans le système. Par ailleurs, l'utilisation du BG sous sa forme LFT (Linear Fractional Transformation) permet de concevoir un système de surveillance robuste aux incertitudes paramétriques. D'un point de vue pratique, le développement d'un tel système peut être réalisé en trois principales étapes, effectuées toutes hors ligne: la génération d'indicateurs de défauts, à savoir les relations de redondance analytiques (RRAs), en prenant en considération les incertitudes paramétriques, à l'aide de BG-LFT. La seconde étape consiste à implémenter ces relations et la dernière étape consiste à assurer un affichage à l'opérateur, lui indiquant les résultats de la FDI à travers l'interface utilisateur graphique (GUI). Le résultat de l'implémentation par contre est vérifié, en ligne, lors d'apparition d'un défaut au niveau du procédé supervisé. Le système conçu permet une détection et une isolation robustes des composants défectueux. Les activités FDI fournissent aux opérateurs des alarmes synthétiques et pertinentes, tandis que la commande tolérante aux fautes (FTC) lui indique les moyens du maintien du fonctionnement du système, après l'occurrence de défauts, dans le cas où c'est possible, c'est à dire, quand le défaut est tolérable. Pour la tolérance aux fautes, nous proposons une approche à base de modélisation fonctionnelle. Le formalisme utilisé décrit un système à partir de services (associés aux éléments BG) fournis par ses composants et leur organisation en modes de fonctionnement (OMs) cohérents gérés par un automate hybride, afin d'atteindre des objectifs spécifiques. À partir des fautes détectées et isolées, la liste des services disponibles est mise à jour en temps réel et les conditions de transition d'un OM à l'autre (pour la reconfiguration fonctionnelle) sont évaluées en fournissant à l'opérateur un outil d'aide à la décision pour la reconfiguration en ligne, via l'interface utilisateur graphique (GUI). La stratégie développée est illustrée par une application sur un générateur de vapeur industriel, qui représente une partie d'une usine de fabrication de carton ondulé.

Mots clés :

Détection et Isolation des défauts (FDI); Relations de Redondances Analytiques (RRAs) robustes; Commande Tolérante aux Fautes (FTC); Modèle fonctionnel; Modes de Fonctionnement (OM); Interface Utilisateur Graphique (GUI); Bond Graph (BG); Automate Hybride (AH); WinCC flexible; Aide à la décision.