

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du grade de **DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Automatique

Spécialité : Modélisation et contrôle des processus

Par : RAHAL Mohamed Ilyas

Sujet

Génération d'algorithmes de diagnostic robustes à base de modèles bond graph hybrides

Soutenue publiquement, le 18 / 05/ 2016, devant le jury composé de :

M. CHERKI Brahim	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. OULD Bouamama Belkacem	Professeur	Univ. Lille	Directeur de thèse
M. MEGHEBBAR Abdelmadjid	MCA,HdR	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M. SAUTER Dominique	Professeur	Univ. Lorraine	Examineur 1
M. KIDOUCHE Madjid	Professeur	Univ. Boumerdès	Examineur 2
M. HAFFAF Hafid	Professeur	Univ. Oran	Examineur 3

THÈSE

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'université de Tlemcen, Algérie

Spécialité : Automatique, option : Modélisation et Contrôle des processus

Et

Docteur de l'université de Lille 1, France

Spécialité : Automatique Génie Informatique, Traitement du Signal et Images

Par

Mohamed Ilyas RAHAL

Titre de la thèse :

Génération d'Algorithmes de Diagnostic Robustes à Base de Modèles Bond Graph Hybrides

Soutenue le 18 mai 2016, 9h à l'université de Tlemcen, devant le jury composé de :

M.BRAHIM CHERKI	PR, Université de Tlemcen, Algérie,	Président
M.DOMINIQUE SAUTER	PR, Université de Lorraine, France,	Rapporteur
M.MADJID KIDOUCHE	PR, Université de Boumerdès, Algérie,	Rapporteur
M.HAFID HAFFAF	PR, Université d'Oran, Algérie,	Examineur
M.BELKACEM OULD BOUAMAMA	PR, Université de Lille, France,	Directeur
M.ABDELMAJID MEGHEBBAR	MCA, HdR, Université de Tlemcen, Algérie,	Directeur

CRIStAL UMR CNRS 9189
Université de Lille 1 Sciences et Technologies
Cité Scientifique,
59655 Villeneuve d'Ascq Cédex,
France.

Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT)
Université Abou bekr Belkaid - Tlemcen
Chetouane Tlemcen,
BP 230 -13000,
Algérie.

Résumé

Le travail de thèse concerne la conception intégrée d'un système de détection et localisation de fautes robuste aux incertitudes paramétriques pour les systèmes hybrides à base de modèle bond graph hybride (BGH) sous la forme LFT (Transformations linéaires fractionnelles).

Sur la base de la littérature consultée, les systèmes hybrides sont principalement modélisés pour chaque mode de fonctionnement pour lequel sont générés des indicateurs de fautes déterministes.

L'intérêt scientifique de la présente recherche peut être résumé comme suit : (1) l'utilisation d'un seul modèle BGH incertain basé sur les jonctions contrôlées et représentant l'ensemble des modes de fonctionnement, (2) exploitation des propriétés structurelles et causales du BGH LFT pour la génération systématique de Relations de Redondance Analytiques Globales (RRAG) et des seuils de détection robustes aux incertitudes paramétriques et, valides pour tous les modes de fonctionnement, et enfin (3) l'utilisation d'un seul outil : le modèle BGH de Diagnostic (BGHD), pour non seulement la modélisation mais aussi la surveillance en ligne.

La démarche développée a été illustrée par un exemple pédagogique représentant un circuit électrique à commutation et par une application à un système hydraulique.

Mots clés :

bond graph hybride, incertitudes paramétriques, détection, robuste.

Abstract

The present PH.D thesis deals with integrated design of robust Fault Detection and Isolation system (FDI) based on Hybrid Bond Graph (HBG) in Linear Fractional Transformation (LFT) form.

Based on consulted literature about hybrid systems, each operating mode is mainly modelled by specific model for which are generated determinist fault indicators.

The innovative interest of developed research can be summarized as follows : (1) use only one HBG uncertain model based on controlled junctions and representing all operating modes, (2) structural and causal properties of the LFT HBG are exploited for systematic generation of Global Analytical Redundancy Relations (GARRs), and detection thresholds, robust to parameter uncertainties, and (3) finally use of only one tool : the Diagnosis Hybrid Bond Graph (DHBG) for not only modelling but also for online surveillance.

The developed approach is illustrated by electrical circuit pedagogical example and application to hydraulic system.

Keywords :

hybrid bond graph, parameter uncertainties, detection, robust.

*A l'âme de mes grands parents,
A ma très chère mère, pour son dévouement et ses sacrifices de tous les jours, que j'aime
profondément et que je respecte,
A mon père, pour son aide et ses encouragements à qui je voue une admiration et une affection
sans bornes,
A mes frères et mes sœurs,
A toutes les personnes qui m'ont encouragé,
Je dédie ce travail.*

Remerciements

Je voudrais utiliser quelques lignes de ce document pour exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont aidé à accomplir l'un des plus importants projets professionnels de ma vie. Je remercie le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique (MESRS) de m'avoir octroyé une bourse d'étude PROFAS B+ gérée par l'Agence française pour la promotion de l'enseignement supérieur, l'accueil et la mobilité internationale « Campus France » dans le cadre de la finalisation de ma thèse au sein de l'université Sciences et technologies de Lille 1 (France). Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance à « Campus France » et au ministère des affaires étrangères.

Les travaux de thèse ont été réalisés au sein du Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille CRISStAL UMR CNRS 9189 (ex Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal, LAGIS - UMR CNRS 8219) et au Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT) sous la direction de :

- Monsieur Belkacem Ould Bouamama, Professeur , directeur de la recherche à l'école Polytechnique de Lille (Polytech'Lille), université des Sciences et technologies Lille 1 et responsable de l'équipe Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée des Systèmes (MOCIS) au sein du CRISStAL à qui je voue un grand respect ; Je tiens à lui présenter ma reconnaissance et mes remerciements pour avoir proposé ce thème de recherche, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour son temps consacré à la lecture et aux réunions qui ont rythmé les différentes étapes de la thèse malgré son emploi du temps très chargé. Je le remercie aussi pour sa disponibilité à diriger ce travail de recherche et ses critiques, ses remarques clés, ses avis et ses propositions d'amélioration. Je le remercie également pour l'accueil chaleureux durant mes séjours à Lille : le premier de courte durée en 2013 au LAGIS, et le deuxième de longue durée au sein du CRISStAL (ex LAGIS : depuis le 1er janvier le LAGIS est devenu CRISStAL). Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance. Je le remercie du fond de mon cœur pour tout.

- Monsieur Abdelmadjid Meghebbar, Maître de conférences HdR, Ex-chef de département de Génie Électrique et Électronique (GEE) à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen et responsable de l'équipe « Supervision et diagnostique des systèmes » au sein du Laboratoire d'Automatique de Tlemcen(LAT), je le remercie pour ces conseils éclairés, son écoute, son soutien et d'avoir également accepté de codiriger cette thèse.

Je remercie Mr Brahim Cherki, Professeur, Directeur de l'Ecole Préparatoire en Sciences et Techniques de Tlemcen (EPST) et directeur du Laboratoire d'Automatique de Tlemcen(LAT), de m'avoir attribué une place au sein du LAT.

Mes remerciements vont également aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail de thèse. Merci à Messieurs Dominique Sauter et Madjid Kidouche qui m'ont fait l'honneur de rapporter ce présent travail. Qu'ils soient assurés de ma profonde reconnaissance. J'adresse également mes remerciements à Monsieur Brahim Cherki et Monsieur Hafid Haffaf pour avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Durant les années de cette présente thèse, j'ai rencontré des gens formidables au deux laboratoires, pour le laboratoire LAT : je tiens à remercier tous les doctorants avec qui j'ai pu partager les joies et des difficultés de la vie de thésard, en particulier Mourad, Souad, Fayssal, Reda,... Un grand Merci pour toi Souad! pour toutes les procédures administratives à Tlemcen durant mon absence. Je remercie aussi tous les doctorants de ma promotion de différentes spécialités : Abdelfattah, Abdelhakim, Oumiloud ,

Un grand Merci à Monsieur Abdelmajid Meghebbar, à Monsieur Sidi Mohammed Meliani (actuellement chef de département du GEE), et à Monsieur Abdelkader Mechernene qui m'ont donné l'opportunité d'enseigner des cours, travaux dirigés et travaux pratiques au sein de l'université de Tlemcen durant la préparation de ma thèse.

Je remercie tous le personnel de la Faculté de Technologie de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen en particulier les secrétaires du département de GEE, le service de la Post-Graduation et le service des relations extérieures du rectorat de l'université de Tlemcen.

Durant mes deux séjours à l'université de Lille 1, en 2013 et durant mon premier stage au LAGIS, je tiens à remercier Talel (mon collègue de bureau) de l'équipe *Systèmes Tolérants aux Fautes* STF du laboratoire LAGIS, pour ses conseils et orientations.

Durant mon deuxième séjour de longue durée au sein du CRISAL (Ex LAGIS), j'ai rencontré des thésards de l'équipe CI2S : Conception Intégrée de Systèmes et Supervision qui est composé de deux équipes : *Diagnostic, commande et observation pour des systèmes Tolérants aux fautes (DiCOT)* et *Méthodes et Outils pour la conception Intégrée de systèmes (MOCIS)* .

Je remercie tous les thésards, jeunes doctorants et stagiaires que j'ai rencontrés, en particulier Zineddine, Gerardo, Joëlle, Mahmoud, Ibrahim, Mohit, Ziad, Ayad, Beranger, Aymen, Koffi, Severus, Yajie... avec qui j'ai partagé des moments agréables, conviviaux et scientifiquement enrichissants. Merci à vous tous pour vos aides et conseils précieux!

Je remercie mes collègues de bureau qui ont contribué à créer une ambiance de travail agréable et chaleureuse.

Un grand Merci à Gerardo (le chef d'équipe comme je l'appelai) pour son aide et pour l'ordre qu'il donnait toujours pour aller déjeuner ou prendre un café avec le groupe de personnes avec qui j'ai passé de très bon moments de discussion sur les problèmes du monde et de réflexion sur la vie. Je remercie Monsieur Michel Pollart, ingénieur du laboratoire CNRS, pour le réglage de tous les soucis et pannes informatiques.

Je remercie tous les membres (Permanents et doctorants) de l'équipe MOCIS en particulier (Madame Geneviève Dauphin-Tanguy, Monsieur Rahmani Ahmed, Monsieur Merzouki Rochdi . . .) pour leurs précieuses remarques et suggestions durant mon exposé du 10.02.16 avec tous les membres de l'équipe MOCIS.

Je remercie toute l'équipe opérationnelle de l'école doctorale Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) université Lille Nord-de-France-072 et notamment Madame Malika DEBUYSSCHERE et Madame Thi NGUYEN pour leurs orientations et leur gentillesse. Je remercie aussi le personnel du Service des relations internationales pour leur réponse à mes questions et toutes les procédures administratives dans le cadre de mon inscription à Lille 1.

Je remercie également le collège doctoral Carrières et Emplois Lille Nord de France qui m'a permis de suivre des formations doctorales très enrichissantes, passionnantes et très utiles dans le cadre de l'école doctorale SPI à Lille. Mes remerciements vont aussi à tout le personnel

responsable et enseignants des formations et séminaires organisés.

Je remercie tous les doctorants que j'ai rencontrés durant les formations et séminaires dans le cadre de l'école doctorale SPI à Lille en particulier ; Matthey, Amel, Mohammed, ... pour leur convivialité et leur bonne humeur.

Je remercie tout le personnel de l'université de Lille 1 en particulier le bureau Master-Doctorat. Je remercie également le personnel du CROUS de Lille, ainsi que tout le personnel de la résidence Albert CAMUS. Je remercie également tout le personnel des restaurants universitaires CROUS du Campus de Lille 1 en particulier le personnel du Restaurant Sully pour l'accueil chaleureux durant notre déjeuner, je les remercie encore pour leur bonne humeur et leur gentillesse.

Je remercie tous les étudiants que j'ai rencontrés à la résidence Albert CAMUS au Campus de l'université de Lille 1 (Cité Scientifique) en particulier : Walid, Kevin, Ahmed, Mohamed, Adel...

Je remercie toutes les personnes que j'ai pu rencontrer pendant mon séjour à Lille : sympathiques, accueillantes, je ne les oublierai jamais.

Je remercie toute ma famille, en particulier mes parents : un modèle de persévérance pour moi. Malgré mon éloignement, leur intelligence, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portaient et me guidaient tous les jours.

Je remercie ma mère, qui a toujours cru en moi, même lorsque je m'y refusais moi-même. Je tiens également à remercier mon père, qui m'a toujours apporté son aide. Je voudrais encore remercier ma mère et mon père ; grâce à eux je me suis épanoui, ils m'ont appris le sérieux, le sens de responsabilité ... ! Je leur souhaite une longue vie pleine de santé

Je remercie également mes sœurs et frères : Wacila, Yasmine, Hasna et mes deux frères Zakaria et Mehdi, mes proches, mes camarades qui m'ont encouragés et soutenus tout au long de mes études. Ce travail leur est dédié.

Je remercie mon cousin et mon cher ami Radouane d'Alger pour toutes ses aides et conseils. Merci Radouane !

J'adresse ma profonde gratitude à tous les enseignants et professeurs sans exception qui m'ont enseigné.

Merci à tous et toutes les personnes que j'ai rencontrés durant ces dernières années qui m'ont encouragé.

Rahal Mohamed Ilyas
Villeneuve d'Ascq le 05 Mars 2016

Table des matières

Liste des figures	11
Liste des tableaux	13
Introduction générale	14
1 État de l'art sur la Modélisation et le Diagnostic des SDHs	22
1.1 Introduction	22
1.2 Structure d'un système hybride	23
1.3 Classification du comportement hybride [61]	24
1.3.1 Commutations autonomes	25
1.3.2 Commutations contrôlées	25
1.3.3 Sauts autonomes	25
1.3.4 Sauts contrôlés	25
1.4 Modélisation des SDHs	25
1.4.1 L'approche continue	26
1.4.2 L'approche événementielle	26
1.4.3 L'approche mixte	27
1.5 Diagnostic des défauts	31
1.5.1 Détection des défauts	32
1.5.2 Isolation du défaut	32
1.5.3 Identification du défaut	32
1.6 Méthodes de diagnostic à base de modèle	35
1.6.1 Modèles qualitatifs	36
1.7 Diagnostic des SDHs	41
1.7.1 Méthodes issues des systèmes continus	41
1.7.2 Méthodes issues des SEDs	43
1.7.3 Méthodes mixtes	44
1.8 Diagnostic par Bond Graph	46
1.9 Intérêt de l'outil bond graph pour la modélisation et le diagnostic des systèmes hybrides comparé aux méthodes citées auparavant	47
1.10 Aperçu sur les travaux antérieurs à base de modèles bond graph hybride	49
1.11 Diagnostic robuste pour les systèmes hybrides	50
1.11.1 Définition 1 (Robustesse de détection) :	50
1.11.2 Définition 2 (Incertitudes paramétriques) :	50
1.12 Diagnostic robuste à base de modèle bond graph hybride	53
1.13 Conclusion	54

2	Modélisation des SDHs incertains par Bond Graph	55
2.1	Introduction	55
2.2	Modélisation des systèmes dynamiques par Bond Graph	55
2.2.1	Langage de modélisation Bond Graph	55
2.2.2	La causalité dans les bond graphs	56
2.2.3	Éléments de base des bond graphs	57
2.3	Bond Graph Hybride (BGH)	57
2.3.1	Propriétés causales des bond graphs hybrides	61
2.3.2	Affectation de la causalité pour les BGHs	66
2.4	Modélisation des incertitudes paramétriques par bond graph pour les SDHs	69
2.4.1	Modélisation des incertitudes paramétriques par Bond Graph	69
2.5	Conclusion	76
3	La conception des algorithmes de supervision	77
3.1	Introduction	77
3.2	Surveillance des systèmes par Bond Graph	78
3.3	Modélisation pour le diagnostic	80
3.3.1	Niveau d'abstraction	80
3.3.2	Les modèles exécutables	81
3.3.3	Les modèles à base de composants	81
3.4	Classe des systèmes considérés et hypothèses de travail	82
3.4.1	Types de défauts dans un système hybride	82
3.4.2	Motivations pour le diagnostic des défauts à base de modèle	83
3.5	Diagnostic déterministe à base de BG	84
3.5.1	Génération des RRAs à partir du modèle BG	84
3.6	Diagnostic des défauts à base de modèle BGH	89
3.6.1	Analyse structurelle par le BGH	90
3.6.2	Structure d'un modèle BGH	90
3.7	Génération des Relations de Redondance Analytiques Globales (RRAGs) déterministes pour les SDHs	91
3.7.1	Relation de Redondance Analytique Globale(RRAG)	91
3.7.2	Analyse de la détectabilité et l'isolabilité des défauts à base de BGH	93
3.8	Algorithmes de diagnostic robuste	98
3.8.1	Aperçu sur la robustesse des résidus et les seuils adaptatifs	104
3.8.2	Algorithme proposé pour la génération des résidus robustes à base de modèle BGH	106
3.9	Conclusion	113
4	Application à un système hydraulique	116
4.1	Introduction	116
4.2	Description du système	116
4.3	Application de la méthode proposée du diagnostic robuste sur le système hydraulique	119
4.4	Étude de la robustesse	126
4.5	Résultats de Simulations	130
4.5.1	Incertitudes multiplicative	130
4.5.2	Réaction des résidus par rapport aux bruits de mesures	134
4.5.3	Défaut additif	134
4.6	Conclusion	136
	Conclusion générale et perspectives	145

Liste des figures

1.1	Schéma d'un système hybride	23
1.2	Structure d'un système hybride	24
1.3	Profil du défaut brusque	33
1.4	Profil du défaut naissant	33
1.5	Profil du défaut intermittent	34
1.6	Différents défauts dans un système surveillé	35
1.7	Générateur résiduel : (a) : Méthode à base des RRAs, (b) : Méthode à base d'observateur	39
2.1	Modèle bond graph causal et bloc diagramme	56
2.2	Jonctions 0,1 dans les bond graphs	57
2.3	Fonctionnement d'une jonction contrôlée de type 1	60
2.4	Exemple d'un système hybride : Circuit électrique	60
2.5	Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique	61
2.6	Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique à l'état ON	61
2.7	Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique à l'état OFF	61
2.8	(a) Circuit électrique à l'État OFF (b) Modèle BGH équivalent du circuit avec attribution de causalité lorsque le commutateur et à l'État OFF.	63
2.9	Modèle BGH avec attribution de causalité alternée lorsque le commutateur et a l'état OFF	64
2.10	Jonction contrôlée de type 1 connectée avec une jonction 0	64
2.11	Jonction contrôlée de type 0 connectée avec une jonction 1	65
2.12	Représentation LFT	69
2.13	(a) élément R déterministe en causalité résistance (b) élément R en BG-LFT en causalité résistance.	71
2.14	(a)élément R déterministe en causalité conductance (b) élément R équivalent en BG-LFT en causalité conductance.	72
2.15	Exemple d'un système hybride : Circuit électrique	73
2.16	Modèle BGH du Circuit électrique	74
2.17	Modèle BGHD du Circuit électrique	74
2.18	Modèle BGHD sous la forme LFT du Circuit électrique	75
3.1	Représentation bond graph d'un système de surveillance	79
3.2	La structure d'un graphe biparti	86
3.3	Décomposition de Dulmage- Mendelshon	87
3.4	Exemple d'un système hybride : Circuit électrique	95
3.5	Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique	95
3.6	Modèle Bond Graph Hybride du diagnostic (BGHD) du circuit électrique	96
3.7	Application d'un seuil adaptatif	106
3.8	Principe du système de surveillance robuste proposé	108

3.9	Principe de la méthode proposée pour le diagnostic robuste des systèmes hybrides incertains	111
3.10	Résidus et seuils de fonctionnement défaillant en présence de défauts. (a) : Résidu r_1 , (b) : Résidu r_2	114
3.11	Résidus et seuils de fonctionnement défaillant en présence de défauts. (c) : Résidu r_3 , (d) : Résidu r_4	115
4.1	un système à deux réservoirs	117
4.2	Modèle BGH du système hydraulique et l'automate à état fini des jonctions contrôlées	118
4.3	Modèle BGH du système hydraulique en causalité dérivée	120
4.4	Modèle BGH du diagnostic (BGHD) système hydraulique	121
4.5	Modèle BGH du diagnostic (BGHD) sous la forme BG-LFT	121
4.6	Les capteurs de pression P_1, P_2	129
4.7	L'état de la vanne 1	130
4.8	L'état de la vanne 2	130
4.9	L'état de la vanne 3	131
4.10	L'état de la vanne 4	131
4.11	(a),(b) les résidus r_1, r_2 sans défauts du premier scénario	132
4.12	(a),(b) les résidus r_1, r_2 sans défauts du deuxième scénario avec un défaut sur les paramètres Cd_1, Cd_2 respectivement à $t = 5s$ et $t = 7s$	133
4.13	(a),(b) les résidus r_1, r_2 sans défauts du deuxième scénario avec un défaut sur les paramètres Cd_1, Cd_2 respectivement à $t = 5s$ et $t = 7s$	135
4.14	(a),(b) les résidus r_1, r_2 en fonctionnement normal et en présence de bruit de mesure	136
4.15	(a),(b) les résidus r_1, r_2 en fonctionnement défectueux (5%) et en présence de bruit mesure	137
4.16	(a),(b) les résidus r_1, r_2 en fonctionnement défectueux (9,4%) et en présence de bruit de mesure	138
4.17	(a),(b) les résidus r_1, r_2 en présence d'un défaut additif sur la mesure P_2 à $t = 6s$	139
4.18	Les capteurs P_1, P_2	140
4.19	Les résidus r_1, r_2 avec défaut de 9.4% à $t = 5s$ sur les paramètres Cd_1, Cd_2	141
4.20	État de la vanne 1 et 2	142
4.21	État de la vanne 3 et 4	143
4.22	Les capteurs P_1, P_2	144

Liste des tableaux

1.1	Aperçu sur les mécanismes de commutation des BGs	30
2.1	Éléments du langage bond graph	58
3.1	Matrice de Signature de Fautes(MSF)	89
3.2	Matrice de Signature de Fautes(MSF) au mode a	94
3.3	Matrice de Signature de Faute au mode $a=1$	98
3.4	Matrice de Signature de Faute au mode $a=0$	99
3.5	Surveillance des composants du système électrique	99
4.1	Les paramètres du modèle du système à deux réservoirs	119
4.2	Valeurs nominaux et Incertitudes relatives des paramètres du système hydraulique	119
4.3	Matrices de signature de fautes pour la vanne 1 et 2	127
4.4	Matrices de signature de fautes pour la vanne 3 et 4	128

Introduction générale

Cadre et Contexte de la thèse

Les travaux réalisés dans ce mémoire ont été effectués au **Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille** (CRISTAL UMR CNRS 9189)¹ né de la fusion entre le laboratoire *LAGIS* (Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal - UMR CNRS 8219)² et le laboratoire *LIFL* (Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille - UMR CNRS 8022)³ au sein de l'équipe Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée de Systèmes (MOCIS)⁴, dirigée, par le Professeur Belkacem OULD BOUAMAMA et au **Laboratoire d'Automatique de Tlemcen** (LAT)⁵, dirigé par le Professeur Brahim CHERKI. Cette thèse est réalisée dans le cadre d'une collaboration entre les deux universités (l'université de Lille 1, *Sciences et Technologies*, et l'université de Tlemcen, *Faculté de Technologie*) conduisant à une thèse cotutelle entre les deux pays (France et Algérie).

Les travaux ont été dirigés par Monsieur **Belkacem OULD BOUAMAMA** (Professeur à l'université de Lille 1) et Monsieur **Abdelmadjid MEGHEBBAR** (Maitre de Conférences classe A, HdR à l'université de Tlemcen). Ces travaux ont été développés dans le cadre d'une thématique dans le domaine de la conception des systèmes de supervision.

Les travaux réalisés par l'équipe MOCIS concernent la conception intégrée de systèmes de commande et de supervision des processus industriels dans différents domaines (électrique, mécanique, thermique, etc) à l'aide d'un seul outil fédérateur, (le Bond Graph), allant de la modélisation, la détermination hors ligne des conditions et moyens de surveillabilité avant réalisation industrielle, jusqu'à la génération et l'informatisation d'algorithmes de surveillance développés.

Dans le domaine de la conception de systèmes de supervision, plusieurs publications ont été réalisées par les membres de l'équipe MOCIS parmi elles on cite ; les travaux de *B. Ould Bouamama & al.* [1, 2, 3] . Ces résultats des travaux de recherches sont synthétisés dans deux livres [4], [5].

La robustesse vis à vis les incertitudes paramétriques a été abordée afin de générer des résidus robustes pour les systèmes industriels sur la base des bond graphs et la transformation linéaire fractionnaire (en anglais connue sous l'expression Linear Fractional Transformation LFT) introduite par *Redheffer* [6] en 1960, adaptée aux modèles BGs incertains par *Dauphin-*

1. <http://www.cristal.univ-lille.fr/>

2. <http://lagis.cnrs.fr/> (Depuis le 1er Janvier 2015, LAGIS est devenu CRISTAL (<http://cristal.univ-lille.fr/>))

3. <http://www.lifl.fr/>

4. <http://www.cristal.univ-lille.fr/?rubrique27eid=24>

5. <http://lat.univ-tlemcen.dz/index.php>

Tanguy en 1999 [7]. La forme LFT a été appliquée pour le diagnostic des systèmes incertains par Djeziri & al. [8, 9, 10, 11].

La robustesse vis-à-vis des incertitudes de mesures a été également traitée par Touati & al. [12, 13].

Objectif de la thèse

Le travail développé dans cette présente thèse s'inscrit dans le cadre de la continuité et l'extension des travaux déjà réalisés dans cette thématique. Le travail de thèse concerne la conception d'un système de diagnostic robuste aux incertitudes paramétriques à base de modèles bond graph hybrides (BGH). Le but est de générer des Relations de Redondances Analytiques (RRAs) globales et robustes. En exploitant les propriétés causales, structurelles et comportementales de l'outil bond graph et pour l'amélioration des performances de décision dans l'étape de détection, des *seuils adaptatifs*, tenant compte des incertitudes paramétriques du système sont générés d'une manière systématique à partir du modèle BGH-LFT. La forme LFT permet de générer des RRAs globales (RRAGs) et incertaines composées de deux parties parfaitement séparables. L'algorithme proposé du diagnostic robuste pour les systèmes hybrides a été testé sur un système hydraulique de deux réservoirs. Concrètement, il s'agit de générer des indicateurs de défauts robustes valables à tous les modes de fonctionnement pour un système hybride représenté par un automate fini en utilisant un seul modèle (BGH) pour non seulement décrire l'ensemble des états mais aussi pour détecter et localiser les défauts pouvant affecter le système avec un minimum de fausses alarmes.

Positionnement

Les systèmes d'ingénierie actuels, les processus industriels et techniques sont de plus en plus complexes, ils englobent les sous-systèmes de divers domaines de l'énergie. La majorité de ces processus sont équipés de capteurs, actionneurs, circuits numériques intégrés et logiciels. Dans le but de protéger les systèmes d'ingénierie complexes, la sécurité, la fiabilité, la disponibilité et la maintenance deviennent importants afin de détecter rapidement le comportement anormal du système après l'apparition d'un défaut, isoler les causes des dysfonctionnements, les défaillances, et générer les alarmes : la majorité des systèmes industriels complexes étant hybrides. Le diagnostic des pannes pour les systèmes hybrides ont fait l'objet de recherches intensives et plusieurs approches ont été développées dans la littérature.

Généralement, l'apparition de défauts simples change la performance du système et peut conduire à de graves conséquences qui peuvent être plus graves en termes de vies humaines, d'impact environnemental et de pertes économiques en cas de défauts multiples.

Les défauts doivent être détectés au moment de leur apparition de sorte que des mesures correctives puissent être prises dans les délais, et d'éviter ainsi les conséquences catastrophiques. Ces actions comprennent la ré-initialisation des paramètres de commande pour compenser les défauts, ou la reconfiguration du système pour réduire au minimum les effets de la panne.

Comme la complexité des systèmes industriels augmente, le diagnostic de pannes devient de

plus en plus important, car il est un moyen crucial pour maintenir la sécurité et la fiabilité du système. Par conséquent, il devient nécessaire d'introduire de nouveaux modèles de supervision adaptés aux systèmes technologiques, dans le but d'assurer leur fonctionnement normal et la réaction dans un cas de défaillance.

Un plus grand nombre de ces systèmes industriels complexes étant de nature hybride, l'efficacité d'une méthode de diagnostic de ces systèmes peut être mesurée par sa capacité à fonctionner de façon optimale, les deux aspects présentés par ces systèmes sont : l'aspect continu à travers les variables d'états continues et l'aspect discret grâce aux événements et variables discrets.

Il existe dans la littérature de nombreuses approches pour la modélisation et le diagnostic des SDHs. Ces méthodes se distinguent par l'importance de la complexité des dynamiques continues ou discrètes.

Il existe des approches qui représentent des extensions du diagnostic de la dynamique continue aux systèmes hybrides. Ces approches dont les variables sont évaluées en temps continu, sont décrites par des équations différentielles ordinaires en incluant le temps discret, et les variables qui présentent des sauts étendent les résultats aux systèmes de commutation. Ces méthodes sont essentiellement basées sur l'extension des approches du diagnostic de la communauté des systèmes continus, comme par exemple la génération des résidus [14, 15] et les graphes causaux [16, 17].

Généralement, dans ce type de méthodes, l'exploitation de l'aspect discret des SDH est faible, d'autre part, il existe des approches représentant des extensions des méthodologies du diagnostic à partir des systèmes discrets aux systèmes hybrides, la majorité de ces travaux sont basés sur l'abstraction des trajectoires continues [18] et sur une acquisition expérimentale du modèle du système à travers l'abstraction des équations de l'espace d'état [19, 20]. Une telle abstraction des trajectoires continues n'est toujours pas simple à réaliser.

Il existe des méthodes supplémentaires dites mixtes combinant les concepts du diagnostic des systèmes continus et des systèmes à événements discrets par exemple : une méthode basée sur le Graphe de Prédiction de Fonctionnement Normal (GPFN) [21]. Bien que ce type de méthode considère à la fois les deux parties du système hybride, les problèmes de la robustesse vis-à-vis les incertitudes paramétriques et de mesures méritent encore d'être approfondies.

Les performances des systèmes de diagnostic à base de modèles dépendent principalement de la précision du modèle.

Les modèles qui ne sont pas suffisamment précis ne décrivent pas certains phénomènes physiques comme par exemple les erreurs de modélisation. Ces erreurs peuvent conduire à une mauvaise prise de décision dans l'étape de détection des défauts. D'autre part, si les paramètres varient au cours du temps, les perturbations et les bruits sont inconnus, les résidus résultants ne sont pas nuls introduisant ainsi de mauvaises détections ou de fausses alarmes.

L'étape de détection des défauts est une étape complexe et difficile dans certains cas, car il s'agit d'une part, de décider si un défaut existe ou non dans le système, et d'autre part, de différencier les perturbations, les incertitudes de mesure et paramétriques des défaillances. Concevoir un système de diagnostic robuste est basé essentiellement sur la modélisation précise du système à diagnostiquer.

Généralement, un système de diagnostic est dit robuste si les résidus sont insensibles aux incertitudes mais sensibles aux défauts. Le but de la conception d'un système de diagnostic robuste est de réduire les effets des incertitudes sur les résidus. Plusieurs travaux ont été réalisés dans la littérature qui traitent le problème de la robustesse pour les SDHs. La majorité de ces travaux [22, 23, 24, 25] consiste à étendre les approches issues des systèmes continus et celles des systèmes discrets aux SDHs, parmi eux on cite le travail de *A. Takrouni & al.*, [22] où une méthode à base d'observateur hybride est présentée dans le but de développer un diagnostic robuste pour les SDHs, cette méthode proposée est constituée de deux modules (parties) à base d'observateurs ; le premier génère la signature de mode pour l'identification du mode actuel et la détection et l'isolation du défaut capteur, le deuxième module est synthétisé en utilisant un banc d'observateur afin de générer un vecteur des résidus structurés pour le diagnostic du capteur. Dans [23], *W. Wenhui & al.* proposent un observateur hybride robuste pour une classe des SDHs avec des entrées inconnues et des défauts. L'observateur hybride robuste se compose, d'une part d'un observateur de mode permettant l'identification du mode, et d'autre part, d'un observateur continu pour l'estimation de l'état continu dont la détection de transition de mode est basée sur un système de détection et d'isolation de défaut robuste avec défauts structurés.

D.E.C. Belkhiat & al., ont proposé dans [24] un observateur hybride robuste pour les systèmes linéaires à commutation avec des entrées inconnues et des erreurs de modélisation. L'observateur est synthétisé pour la détection de défaut robuste sans la connaissance du mode actif. Le problème de détection de défaut robuste a été considéré comme étant un modèle H_∞ standard, ensuite un compromis adéquat entre la robustesse aux entrées inconnues, la sensibilité aux défauts est obtenue à l'aide d'un indice de performance H_∞ , ce dernier est enfin optimisé en utilisant une procédure de solution *LMI* itérative. Une application sur un système montre l'efficacité de cet observateur.

H. Ye et H. El-Farra Nael, présentent dans [25] une méthode de détection de défaut d'une classe de SDH modélisée par des systèmes non linéaires à commutation avec des défauts actionneurs, dynamiques continues incertaines et transitions du mode incertain. Un système de surveillance hybride robuste est développé en utilisant les outils de la théorie d'observateur à entrée inconnue et les résultats de la théorie de stabilité de *Lyapunov*. L'implémentation du système de surveillance développé est démontrée en utilisant un modèle simulé d'un réacteur chimique.

La majorité de ces travaux ont besoin d'effectuer une pré-énumération de tous les modes possibles dans le système. Pour remédier à ce problème, certains auteurs ont introduit le formalisme de modélisation connu sous le nom Bond Graph Hybride (BGH), ce dernier ne nécessitant pas une énumération de tous les modes du système, ils sont construits au moment de l'exécution.

Les BGHs ont été introduits par *P.J. Mosterman et G.Biswas* [26] en 1994, les BGHs étendent les avantages des Bond Graphs (BGs) aux SDHs par l'introduction des jonctions dites *jonctions contrôlées* pour la modélisation des changements de mode discret. Pour une jonction contrôlée de *type -1*, quand elle est à l'état OFF, les flux de tous les liens connectés sont égaux à zéro. Cela est également appliqué pour les jonctions de *type-0* ; cette jonction impose la valeur de zéro à tous les efforts des liens connectés à l'état OFF.

Puisque le BGH définit localement la commutation, par conséquent, il fournit une représentation concise du modèle hybride.

Sur la base des BGHs, plusieurs travaux ont été réalisés dans le but de la conception d'un système de diagnostic à base de modèle BGH pour les systèmes considérés hybrides. Parmi eux on trouve les travaux effectués en 2008 par *C.B. Low & al.*, *S. Arogeti & al.*, *R. Levy & al.* et *D. Wang & al.* [27, 28, 29, 30, 31, 32].

Les premiers travaux de *C.B. Low & al.* [33] sont basés sur les travaux déjà publiés en 2003 par *B. Ould Bouamama et al.* & *al.* [34] qui consistent à générer les Relations de Redondances Analytiques (RRAs) à partir du modèle bond graph. Ces algorithmes ont d'ailleurs été implémentés dans une boîte à outil logiciel FDIpad pour la génération automatique des RRAs [35].

Les travaux [27, 28, 29, 30, 31, 32] consistent à faire un diagnostic à base de modèle BGH pour les SDHs, le but étant d'utiliser un seul outil BGH à la fois pour la modélisation et le diagnostic.

En revanche, une analyse critique de ces travaux montre que le problème de la robustesse vis-à-vis les incertitudes paramétriques, incertitudes de mesures et entrées inconnues n'est pas abordé.

Ces dernières années, certains auteurs ont proposé des solutions pour le problème de la robustesse à base de modèle BG pour les différents systèmes hybrides, à titre d'exemple, on trouve le travail de *W. Borutzky* [36], ce dernier utilise le BG incrémental afin de modéliser et concevoir un système de diagnostic robuste envers les incertitudes paramétriques présentées directement sur le modèle BG, cette méthode proposée dans [36] consiste à générer les résidus et des seuils en tenant compte des incertitudes paramétriques et des changements de mode discret ; une application est donnée sur un circuit de convertisseur afin d'illustrer cette méthode. Les travaux présentés dans ce mémoire [37, 38], consistent à utiliser les BGHs à base de jonctions contrôlées pour la modélisation des changements discrets et la forme LFT pour la modélisation des incertitudes paramétriques directement sur le modèle BGH. Des seuils adaptatifs tenant compte des incertitudes paramétriques sont alors générés directement sur le modèle BGH du diagnostic afin d'éviter les fausses alarmes et les non-détections.

Et dans [39], *W. Borutzky* présente une méthode de diagnostic robuste basée sur la modélisation BG incrémental appliquée sur les systèmes linéaires à commutation invariants avec des paramètres incertains. Cette méthode a permis d'une part d'obtenir un diagnostic robuste (détection de défauts) et d'autre part, une identification du mode du système à base de modèle BG. L'auteur a montré dans son travail [39] que l'utilisation du BG incremental peut être utilisé pour la détermination des seuils dépendants du mode pour les systèmes linéaires invariants dans le temps à commutation pour l'étude la détection robuste de défauts. L'identification du mode du système hybride et la détermination des seuils adaptatifs sont réalisées ainsi à l'aide du BG.

Dans le but de concevoir un système de diagnostic robuste vis à vis les incertitudes paramétriques pour les SDHs, une méthode est proposée par *S.K Ghoshal & al.*, dans [40] basée sur le pseudo-BG et la forme LFT. Dans le travail donné en [40], le système est thermo-fluide hybride contrôlé est modélisé en utilisant le pseudo-BG : la robustesse étudiée à l'aide de la forme LFT pour la génération des résidus et des seuils. Il est montré que ces résidus sont insensibles au comportement transitoire du système et aux incertitudes paramétriques ; mais sensibles aux défauts paramétriques, des résultats de simulations ont été présentés également afin de valider la robustesse de détection de défaut pour les systèmes présentant des changements de mode discret.

Intérêt de l'outil bond graph pour le diagnostic des SDHs

Dans la conception d'un système de diagnostic, la modélisation est une étape importante et difficile en raison de la complexité des processus industriels modernes et leurs équipements de contrôle. La modélisation BG, introduite en 1959 par *Henry Paynter* [41] et par la suite développée par *Rosenberg, Margolis et Karnopp* [42, 43] est une méthodologie systématique basée sur le principe de la transformation d'énergie, grâce à l'aspect graphique de l'outil (BG), la modélisation devient alors simple et efficace et permet ainsi de générer les équations représentant la dynamique du système.

L'outil BG a prouvé son efficacité dans la modélisation et le diagnostic des systèmes d'ingénierie complexes [44, 10] des processus chimiques [45] et hybrides [46], ainsi, il a été utilisé pour la conception intégrée des systèmes de surveillance allant de la modélisation, la détermination hors ligne des conditions et moyens de surveillabilité avant réalisation industrielle jusqu'à la génération d'algorithmes de surveillance robuste en ligne [47, 48, 49].

Les points forts et l'intérêt de l'outil BG pour la modélisation et le diagnostic des SDHs peuvent être résumés dans ce qui suit :

- Un seul modèle (BGH) modélisant à la fois la partie continue et le changement du mode discret.
- Les incertitudes paramétriques sont introduites directement sur le modèle BGH.
- Les résidus obtenus directement sur le modèle à l'aide des propriétés causales et structurelles de l'outil BG.
- Analyse des conditions de surveillabilité (aptitude à détecter et localiser les défauts) à partir du BGH et ce avant implémentation au temps réel : un placement de capteurs peut alors être proposé pour satisfaire le cahier des charges.
- Afin d'éviter les fausses alarmes et les non détections (en fonctionnement temps réel) et en se basant sur les propriétés structurelles, des seuils d'alarmes sont générés à partir du modèle BGH.

Les principales contributions de cette thèse sont

- Utilisation d'un seul outil fédérateur (les BGHs) pour la modélisation dynamique, et la détection des défauts du système hybride : un seul modèle pour l'ensemble des modes de fonctionnement.
- Modélisation des SDHs incertains en introduisant les incertitudes paramétriques sur le modèle BGH à l'aide de la forme LFT.

- Diagnostic des SDHs incertains par BGH : Génération des indicateurs de fautes Robustes et Généralisées (Relations de Redondance Analytiques Globales)valides pour l'ensemble des modes de fonctionnement.

Les résultats obtenus ont fait l'objet des publications suivantes

Revue de Rang A

- M I Rahal, B Ould Bouamama , A Mghebbar, “ Hybrid bond graph model based for robust fault detection and isolation ”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering* , February 2016, Vol 230(2), pp 145–163 , first published on December 17, 2015, disponible en ligne DOI 10.1177/0959651815616026

Conférences internationales

- M I Rahal , A Mghebbar , M Benallel , “ Application de la Méthode FDI basée sur le Modèle Bond Graph pour la Détection et l'Isolation des Fautes ” , Deuxième Conférence Internationale sur la Maintenance , la Gestion la Logistique et l'Electrotechnique , CIMGLE'12, ENSET Oran , Algérie , 19-21 Novembre 2012.

- M I Rahal , B Ould Bouamama , A Mghebbar , “ Hybrid Bond Graph for Robust Diagnosis – Application to Hydraulic System – ”, 3th IEEE International Conference on System and Control (ICSC'13) 29 -31 October 2013, Hotel Hilton , Algiers, Algeria ,pp 1080 – 1085, disponible en ligne DOI 10.1109/ICoSC.2013.6750989

Organisation du mémoire

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres présentés comme suit :

Dans le **premier chapitre**, un aperçu sur les différentes méthodes de modélisation des SDHs est présenté, une définition du diagnostic dans le cas général, le but du diagnostic sont également donnés. Un aperçu sur les travaux antérieurs à base de modèles BGH est exposé et enfin un état de l'art sur les méthodes de diagnostic robuste à base de modèle BGH est analysé.

Dans le **deuxième chapitre**, un rappel sur la modélisation par le langage BG est exposé. Après avoir donné un aperçu sur le langage BGH, nous présenterons par la suite la modélisation des incertitudes paramétriques par BG pour les SDHs (notre première contribution).

Le **troisième chapitre** expose les différents algorithmes de diagnostic pour les SDHs. Nous exposerons l'algorithme de génération des RRAGs à partir des modèles BGH de type LFT afin d'obtenir un diagnostic robuste aux fausses alarmes en introduisant des seuils adaptatifs représentant les incertitudes paramétriques générés directement du modèle graphique(notre deuxième contribution).

Le **quatrième chapitre** présente l'application de la méthode de génération des résidus robustes sur un système de deux réservoirs afin de valider cette méthode. Le système étudié est un système hydraulique hybride comportant quatre vannes et deux réservoirs, chaque vanne a deux états discrets ON / OFF, tel que chaque mode est déterminé par l'état de la vanne. En plus de l'aspect hybride de ce système, des incertitudes paramétriques sur le modèle sont considérées et modélisées directement sur le modèle BGHD (Modèle BGH du diagnostic). Le modèle BGHD est mis sous la forme LFT pour générer des RRAGs. Ces RRAGs sont à la fois robustes car elles tiennent compte des incertitudes paramétriques à l'aide la représentation LFT et Globales (Généralisées) car elles sont valables à tous les modes de fonctionnement du système hybride. Des résultats de simulations seront donnés afin de montrer l'efficacité de la méthode proposée.

Chapitre 1

État de l'art sur la Modélisation et le Diagnostic des SDHs

Guide de lecture :

Dans ce chapitre, nous menons une étude bibliographique sur la modélisation et le diagnostic des SDHs. Après un rappel sur la structure d'un système hybride et les classifications du comportement hybride, la modélisation des SDHs est donnée, ensuite, un aperçu sur le diagnostic des SDHs est présenté et par la suite le diagnostic par BG pour les SDHs est introduit, en soulignant l'intérêt de l'outil BG dans la modélisation et le diagnostic des SDHs.

1.1 Introduction

En général, le terme « hybride », fait référence à la nature hétérogène et « système hybride », un système qui se compose d'interactions entre les dynamiques continues et discrètes [50, 51]. Les états discrets sont généralement représentés par des modes. La figure (FIGURE 1.1) présente un schéma d'un système hybride. Les événements discrets (transitions) permettent au système le passage d'un mode à un autre. A chaque mode, le système est régi par des dynamiques continues, et les différents modes correspondent aux différents modèles dynamiques continus. Pour les systèmes dynamiques continus, les variables d'état changent d'une manière continue dans le temps, les valeurs possibles de ces variables d'état continues sont des valeurs réelles, et les équations différentielles sont des outils pour modéliser les systèmes continus. Contrairement aux systèmes dynamiques continus, les systèmes à événements discrets où l'évolution de l'état dépend entièrement de l'occurrence d'événements discrets instantanés, ces systèmes contiennent uniquement des espaces d'états discrets [52, 53]. Les variables d'état des systèmes dynamiques à événements discrets restent constants entre les événements et évoluent d'une façon discontinue par l'occurrence d'événements discrets.

Les SDHs possèdent des variables d'état des deux valeurs continues et discrètes, c'est-à-dire, l'état change d'une manière continue ou discrète [54, 55]. La transition dans les SDHs peut se produire d'une façon autonome à la suite de l'évolution continue des variables du système ou en raison d'un événement discret tel que : une instruction de commande (un saut d'un mode à l'autre).

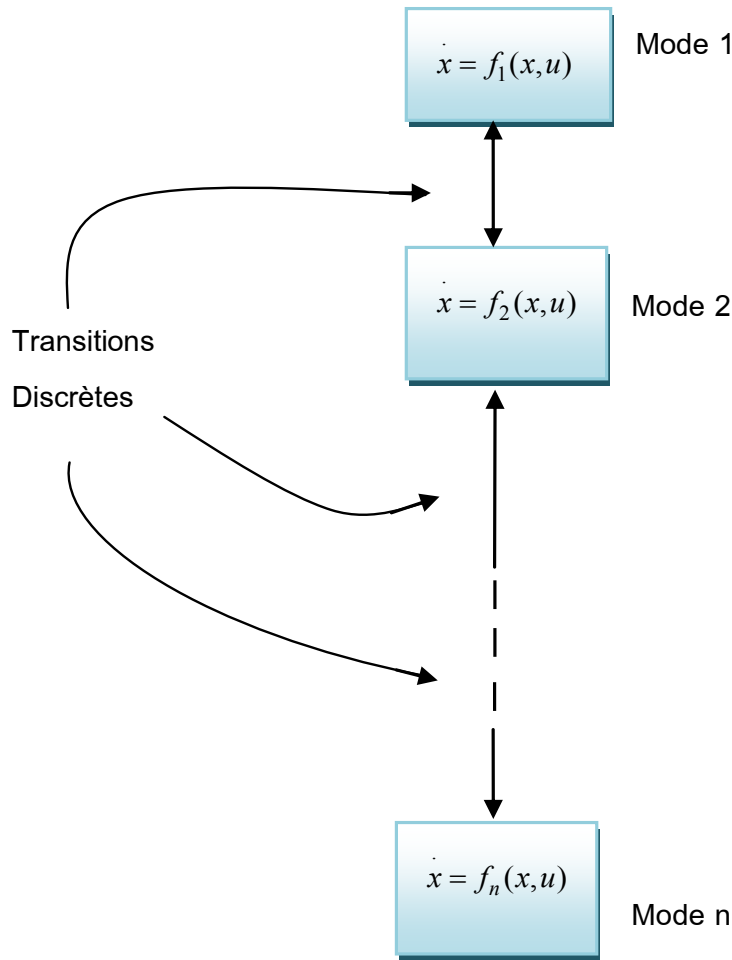


FIGURE 1.1 – Schéma d'un système hybride

1.2 Structure d'un système hybride

Un système dynamique hybride (SDH) est un système composé de l'interaction entre une partie continue et une autre événementielle. Ces deux parties sont interconnectées avec une loi qui ordonne cette interconnexion (FIGURE 1.2) [56].

La partie continue indique l'événement physique dans lequel évolue le système, cette partie est constituée d'une infinité de valeurs qui décrivent le comportement d'un phénomène physique comme par exemple, la température d'une pièce, le niveau d'un réservoir. L'étude de ces systèmes se fait à l'aide d'outils mathématiques qui peuvent représenter la dynamique continue : Équations différentielles et inclusions différentielles.

La partie « Système à Événement Discret » (SED) représente l'état discret du système dynamique hybride. L'évolution de cette partie est régie par l'occurrence d'événements comme exemple : un interrupteur ouvert ou fermé. Habituellement, les SEDs sont représentés par l'algèbre de Boole combinée à des formalismes états-transitions discrets par les modèles usuels tel que : les automates à états finis [57, 58] ou les Réseaux de Pétri [59, 60].

L'interface ou l'interaction exprime la relation qui relie la partie discrète à la partie continue et vice versa. Cette partie (interface) a pour but de fournir des informations à la partie discrète respectivement à la partie continue sur l'évolution continue ou discrète. Sous l'effet d'un évé-

nement interne ou bien d'un événement externe, le système peut changer de configuration ou de mode. Les interactions entre les deux modèles se font à travers des événements. Au niveau de la partie discrète, un événement correspond à un franchissement de transition, tandis qu'au niveau des systèmes continus, il s'agit d'un dépassement de seuil d'une variable continue. Une transition d'un mode vers un autre se fait lorsque certaines conditions logiques sont vérifiées.

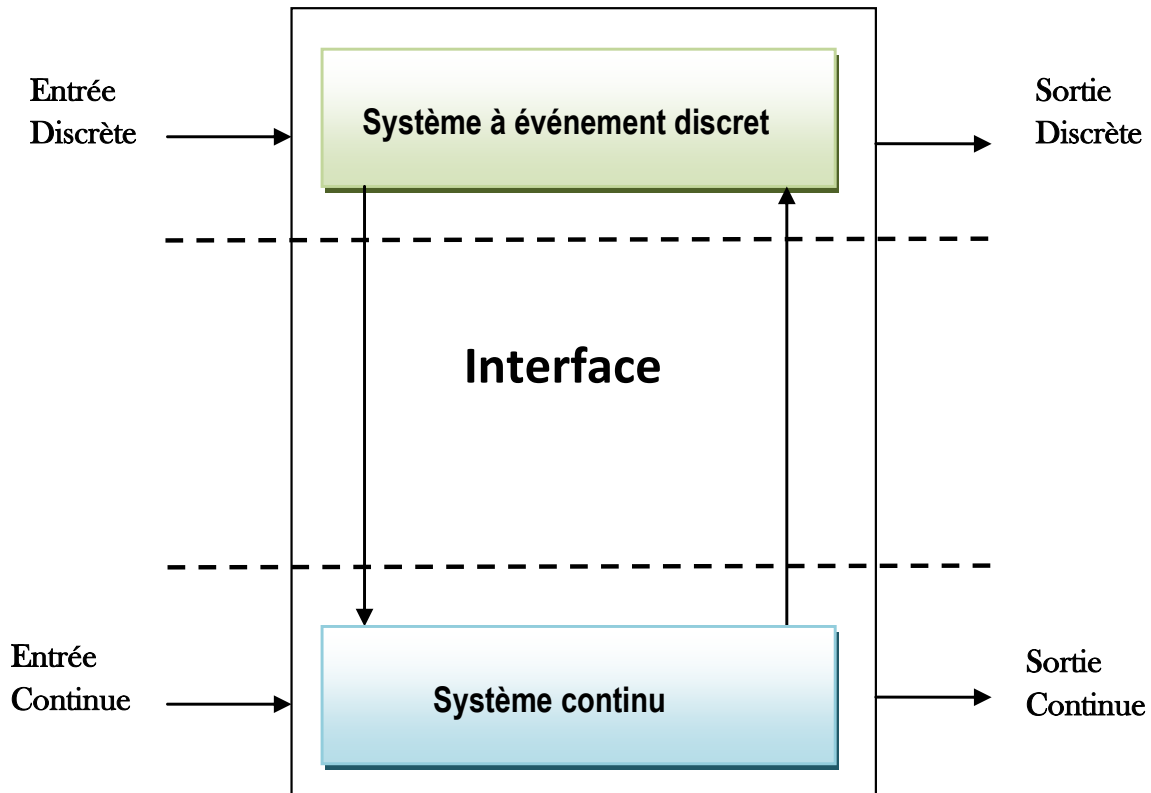


FIGURE 1.2 – Structure d'un système hybride

Branicky, a proposé dans [61] une classification des comportements hybrides selon le type d'événement sous une formulation unitaire du concept hybride.

1.3 Classification du comportement hybride [61]

Un système hybride peut être décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), q(t), u(t)) \\ q^+(t) = g(t, q(t), u_d(t)) \end{cases} \quad (1.1)$$

L'état continu $x \in R^n$, le vecteur commande continu $u \in R^p$, l'état discret $q \in Q \subset N$ et la commande discrète également $u_d \in Q \subset N$.

Plusieurs formes de comportement hybride peuvent être distinguées où leur définition repose sur la notion du changement brusque ou instantané de l'état ou du modèle. Ces changements peuvent être autonomes ou contrôlés. Le changement autonome est la conséquence d'une évolution interne du système tandis qu'une action extérieure provoque un changement contrôlé.

Une classification des comportements hybrides selon les sauts et les commutations est donnée dans [61].

1.3.1 Commutations autonomes

Une commutation autonome est caractérisée par un changement discontinu du champ du vecteur lorsque l'état atteint certains seuils, la représentation d'état (1.1) s'écrit alors :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x(t), q(t)) \\ q^+(t) &= g(x(t), q(t)) \end{cases} \quad (1.2)$$

Un exemple de ce type de commutation ; un circuit électrique contenant une diode, lorsque la tension aux bornes de la diode est inférieure ou supérieure à la tension de seuil (de la diode), un changement de configuration survient.

1.3.2 Commutations contrôlées

Dans ce cas, les transitions sont dues à une commande ou à une action extérieure, la représentation du système dynamique hybride est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x} &= f(x(t), q(t), u(t)) \\ q^+(t) &= g(t, x(t), q(t), u_d) \end{cases} \quad (1.3)$$

Comme exemple de ce type de comportement ; un système hydraulique à deux réservoirs, après une action sur les différentes vannes du système.

1.3.3 Sauts autonomes

Lorsque la variable d'état atteint une certaine région de l'espace d'état, la transition subit un saut de type autonome comme par exemple une balle qui rebondit.

1.3.4 Sauts contrôlés

Ce type de comportement est exprimé par un changement de l'état en raison d'une commande, on trouve ce type dans un modèle de stock ou le dépôt des quantités $c_1, c_2, c_3...$ de matières aux instants $t_1, t_2, t_3...$

Dans le présent travail on s'intéresse aux SDHs présentant des commutations contrôlées ou spontanées.

1.4 Modélisation des SDHs

Une méthode de modélisation efficace pour les SDHs est qu'elle exploite d'une manière optimale les deux aspects ; l'aspect continu à travers les variables d'état continues et l'aspect discret à travers les événements discrets. Usuellement, ces deux aspects sont étudiés par les approches issues des systèmes continus ou des approches issues des SEDs.

La modélisation des SDHs a été étudiée pendant une période de temps, et un bon modèle doit capturer suffisamment le phénomène physique d'un processus et en même temps doit être facile à analyser.

Il existe plusieurs approches de modélisation des SDHs. Dans le domaine des sciences de l'informatique, les chercheurs se focalisent sur la partie discrète des SDHs et comme résultats : l'automate hybride et le Réseau de Pétri, ces derniers sont développés afin de fournir ces informations. D'autre part, l'aspect continu des SDHs a un grand intérêt pour les ingénieurs et les modèles développés ressemblent aux modèles des systèmes à commutation dans lesquelles le système hybride est représenté par un ensemble d'équations différentielles avec chaque ensemble d'équations correspondant à un mode de fonctionnement comme représenté à la FIGURE 1.1.

Plusieurs travaux ont été développés par la communauté scientifique automatique dans le but de modéliser les SDHs et obtenir un modèle permettant de décrire simultanément la partie continue et discrète du système hybride.

Les approches de modélisation des SDHs peuvent être classées en trois groupes [54, 55] :

1.4.1 L'approche continue

Ce type d'approche consiste à étendre les méthodes de modélisation des systèmes continus. Dans ce cas un système dynamique hybride est vu comme un système continu présentant des discontinuités qui sont provoquées par le changement d'état des éléments de commutation. Parmi ces méthodes, on trouve :

- La modélisation par équations différentielles où la dynamique continue est modélisée par les équations différentielles par contre la dynamique discrète est représentée par les équations aux différences [62].

- La modélisation par bond graphs commutés. Deux approches peuvent être considérées ; une appelée à topologie invariante qui permet de modéliser les éléments de commutation à l'aide des transformateurs modulés [63] ou de résistances variables [64]. La deuxième nommée à topologie variable ; cette approche utilise des sources nulles dans le but de modéliser les éléments en commutation [65, 66].

- La modélisation par formalisme Hamiltonien est basée sur une approche graphique en utilisant les graphes d'interconnexion des ports pour la modélisation des SDHs [67, 68].

L'avantage de l'approche continue est l'application des méthodes classiques d'analyse des systèmes continus linéaires ou non linéaires, mais en plus de sa complexité, les équations obtenues ne représentent pas explicitement l'évolution discrète.

1.4.2 L'approche événementielle

Elle est basée sur les méthodes de modélisation des SEDs où la dynamique est modélisée par un ensemble fini de paramètres discrets, parmi ces travaux existants dans la littérature on trouve les Réseaux de Pétri hybrides [69, 70, 71].

1.4.3 L'approche mixte

C'est la combinaison entre les deux approches ; continue et discrète. Chaque aspect est décrit et représenté d'une façon rigoureuse et explicite. La résolution du modèle continu entraîne l'évolution des variables au cours du temps et valide certaines transitions. L'évolution du modèle discret provoque le placement d'un nouvel état discret se traduisant par la création d'un nouveau système d'équations.

Parmi les méthodes mixtes on trouve les automates hybrides [72] , les sous classes d'automates hybrides [73] et les Réseaux de Pétri hybrides [74].

- Les automates hybrides

Un automate hybride[72] est un automate à état fini qui a été étendu par des variables continues. Les automates hybrides représentent des systèmes qui intègrent deux composantes : la composante continue est représentée par les équations différentielles et la composante discrète, représentée par un automate à état fini.

Un automate hybride évolue avec un pas continu , où les variables d'état et le temps évoluent de façon continue, et de pas discrets où plusieurs transitions discrètes et instantanées peuvent être franchies. Un automate temporisé est un automate hybride particulier où toutes les variables admettent des dérivées par rapport au temps égal à 1.

Un automate hybride est considéré comme un automate à état fini pilotant un ensemble d'équations différentielles qui modélise la dynamique continue du système.

Définition [75] :(Automate à États Finis) : un automate à états finis est un quadruplé

$$A = (Q, \Sigma, T, q_0)$$

Où :

Q est un ensemble fini de sommets

Σ est un ensemble fini d'événements

T est un ensemble de transitions entre sommets.

Une transition est un triplet $t_i = (q, \sigma, q')$ où q est un sommet source, σ est un événement de Σ et q' est un sommet but.

q_0 est l'état initial de l'automate .

Définition [75] :(Automate Hybride) : un automate hybride est un sextuplet $A = (Q, X, E', \delta, F, Inv)$ tel que : $Q = \{q_1, q_2, \dots\}$ est un ensemble fini de sommets $x \in R^n$ est un vecteur d'état comportant n variables réelles.

Σ est un ensemble fini d'événements δ est un ensemble fini de transitions, chaque transitions est un quintuplet $t_i = (q, \sigma, g, \gamma, q')$ tel que :

$q \in Q$ est le sommet de source

$\sigma \in \Sigma$ est un sommet associé à la transition t_i

g est la garde de transition t_i

γ est la fonction de réinitialisation

$q' \in Q$ est le sommet but

F est une fonction qui associe à chaque sommet q une fonction continue f_q qui représente l'évolution dynamique du vecteur d'état dans le sommet

Inv est une fonction qui associe à chaque sommet q , un prédicat $Inv(q)$

- Les sous classes d'automates hybrides

Plusieurs sous classes du modèle automate hybride ont été étudiées, ces dernières sont utilisées afin d'alléger la structure du modèle initial pour simplifier son analyse et sa vérification. Parmi les modèles existants dans la littérature on distingue :

- Les Automates Hybrides Linéaires [72] : un automate hybride linéaire est un graphe de contrôle avec des conditions sur les variables réelles. Chaque sommet du graphe représente un mode d'exploitation du système, il est défini par des équations différentielles qui décrivent les évolutions (flux) possibles des variables réelles lorsque le système reste dans le même mode [76].

- Les Automates Hybrides Rectangulaires [77, 78] : dans chaque mode de contrôle d'un automate rectangulaire, la dérivée première de chaque variable est donnée dans un intervalle de valeurs possibles et cet intervalle change avec les commutations de contrôle [76].

- Les Automates Hybrides Rectangulaires Initialisés [78] : dans ce modèle, chaque variable dont les conditions de flux changent à cause d'un franchissement d'une transition entre deux sommets doit être réinitialisée [76].

- Les Réseaux de Pétri Hybrides

Les réseaux de Pétri hybrides [79] ont été utilisés comme outils de modélisation, analyse, et synthèse pour les systèmes à événements discrets.

Dans [74], Alla & al., présentent une extension des réseaux de Pétri, et les réseaux de pétri hybrides. Les avantages du réseau de Pétri sont étendus aux réseaux de Pétri hybrides comme par exemple la représentation du parallélisme, de la synchronisation des conflits [80].

Les Réseaux de Pétri permettent d'obtenir des modèles précis de systèmes réels. Il est possible par la suite de construire de manière algorithmique l'automate hybride correspondant [81]

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour modéliser les discontinuités dans un contexte BG. Dès le début, dans le développement des BGs, il était nécessaire de modéliser les discontinuités sous la forme d'éléments tels que, les interrupteurs et les vannes.

L'utilisation des jonctions en fonction du temps connue sous l'expression anglaise « time-dependant junction (tdj) » proposée par *Thomas* dans [82] et l'utilisation d'éléments de résistance modulés afin de représenter les vannes hydrauliques [82, 83].

Durant les années 90, il y'avait un grand intérêt pour la modélisation hybride qui utilisait la théorie des BGs, sans aucun doute aidée par la plus grande disponibilité de la puissance informatique (de calcul). A ce point, les termes « commutation de mode », « bond graph commuté » et « bond graph hybride » ont été créés.

L'élément de transformateur de commutation [64] qui a évolué dans le transformateur modulé booléen et la combinaison de résistance [84], liens de commutation [85] et source de commutation (parfois connus en tant qu'élément de commutation [86, 65, 87, 88] ont été introduits.

Peu de temps après, *Mosterman et Biswas*, ont proposé un autre type de jonction dite « contrôlée » (même principe que celui de *Thomas* : earlier time dependent junction) [89] et *Gawthrop* a présenté l'élément de stockage commuté [90].

Borutzky, a proposé l'utilisation des Réseaux de Pétri afin de relier une collection de modèles continus (une pour chaque mode de fonctionnement) [91].

Un autre travail différent de ces méthodes, basé sur les BGHs, à titre d'exemple : l'approche de *Samantaray* utilisant des éléments de commutation (qui comporte une résistance commuté) [92].

Umarikar et Umanand, proposent des jonctions dites « jonction de puissance commutée » dans [93] et dans [94] *Low & al.*, utilisent une version des jonctions contrôlées. Selon *R. Margetts*, dans [95], une comparaison des principaux mécanismes de commutation des BGs est présentée dans le tableau ci dessous (TABLE 1.1).

Ces mécanismes de commutation des BGs, travaillent généralement en imposant des efforts et des flux nuls sur la structure adjacente. Cela sera cohérent avec un interrupteur électrique idéal (dans lequel il y a un courant nul à l'état OFF), ou l'embrayage idéal (pour lequel il existe un couple nul quand il est déconnecté), par exemple.

De plus *Soderman* dans [87] formalise la modélisation des systèmes de changement de mode utilisant les arbres de commutateurs idéaux et des éléments.

Tout au long de la deuxième moitié des années 90, des travaux sur la simulation des modèles bond graph hybrides ont été réalisés, parmi eux on trouve *Edström*. Ce dernier utilise des sources de commutation et *Mosterman*, utilise des jonctions contrôlées. Ce travail inclut les sémantiques et méthodes pour initialiser les variables d'état après l'occurrence d'une disconti-

TABLE 1.1 – Aperçu sur les mécanismes de commutation des BGs

Méthode	Représentation Bond Graph			Description
	Elément	Etat ON Equivalent	Etat OFF Equivalent	
Source Commutée (Elément Commuté)	$Sw \longrightarrow$	$Sf \longrightarrow$ $\ddot{0}$	$Se \longrightarrow \dashv 0$ $\ddot{0}$	Commute entre une source de flux et d'effort nul, imposant un effort/flux nul à la jonction contrôlée à l'état OFF.
		$Se \longrightarrow \dashv$ $\ddot{0}$	$Sf \dashv \longrightarrow 1$ $\ddot{0}$	
Transformateur Modulé booléen et La combinaison de résistances.	$\longrightarrow MTF \longrightarrow R$	$\dashv MTF \dashv R$ $\ddot{1/m}$	$\dashv MTF \dashv R$ \ddot{m}	m est booléen (1 à l'état ON et 0 à l'état OFF), la résistance commute entre la conductance et la causalité de Resistance.
Jonction Contrôlée	$\longrightarrow 0_n \longrightarrow$ \downarrow ou $\longrightarrow x0 \longrightarrow$ \downarrow	$\dashv 0 \dashv$ \downarrow (par exemple)	$\longleftarrow Se \ Se \longrightarrow$ \downarrow Se	Est une jonction 0 ou 1 régulière (standard) à l'état ON et une source nulle sur chaque lien à l'état OFF.
	$\longrightarrow 1_n \longrightarrow$ \downarrow ou $\longrightarrow x1 \longrightarrow$ \downarrow	$\dashv 1 \dashv$ \downarrow (par exemple)	$\longleftarrow Sf \ Sf \longrightarrow$ \downarrow Sf	
Elément de stockage contrôlé	$ISw \longleftarrow$	$I \longleftarrow$	$Sf \dashv$	C'est un élément composé, agissant comme un élément de stockage régulier à l'état ON et une source de commutation (source nulle) à l'état OFF.
	$CSw \longleftarrow$	$C \longleftarrow$	$Se \dashv$	
Jonction de puissance commutée	$\dashv 1_s \dashv$ \uparrow	$\dashv 1 \dashv$ \uparrow	$\dashv 1 \dashv$	Il ya deux entrées de causalité naturellement exclusives mutuellement à la jonction. S : désigne le lien d'entrée active.
	$\dashv 0_s \dashv$ \uparrow	$\dashv 0 \dashv$ \uparrow	$\dashv 0 \dashv$	
Transformateur modulé booléen et une combinaison de résistance modifiée	$\longrightarrow MTF \longrightarrow R$	$\dashv MTF \dashv R$ $\ddot{1/m}$	$\dashv MTF \dashv R$ $\ddot{1/m}$	m est booléen (1 à l'état ON et 0 à l'état OFF), la résistance est dans la causalité conductance fixe.
Jonction de puissance commutée	$\longrightarrow 0_n \longrightarrow$ \downarrow	$\dashv 0 \dashv$ \downarrow (par exemple)	[Supprimé]	Est une jonction 0 ou 1 régulière à l'état ON et supprimée (avec les liens adjacents à l'état OFF). En général- mais pas toujours - donne la même affectation comme une jonction contrôlée originale.
	$\longrightarrow 1_n \longrightarrow$ \downarrow	$\dashv 1_n \dashv$ \downarrow (par exemple)	[Supprimé]	

nuité [89, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 97].

Mosterman, établit les types du changement de mode, et étudie l'occurrence des impulsions sur la commutation à l'aide des modèles implicites de collisions [103].

Deux variations sur le bond graph hybride sont présentées. La première est le BG quantifié [104] étant par nature discrète, évite parfaitement la causalité variable et peut être résolue par la simulation d'événement discret (DEVS) [104, 105].

Kofman affirme que puisque les ordinateurs sont de nature des modèles discrets, de toute manière, il y a peu d'avantages à donner une grande importance à la partie continue du modèle hybride.

La deuxième est le BG impulsif [106] qui considère explicitement des impulsions de Dirac par l'introduction du lien d'impulsion et l'élément commutateur impulsif. Les sources commutées et les jonctions contrôlées ont été exploitées plus que les autres approches. Cette utilisation est justifiée par le fait qu'elles peuvent modéliser la commutation idéale, tandis que l'utilisation des commutateurs ou la résistance modulée (de modulation) et les composants transformateurs par défaut supposent que la commutation est dissipative [100].

Ces méthodes évitent également certains problèmes associés à d'autres, tel que « jonctions suspendues » et difficultés en calcul. Par contre, le commutateur non-idéal utilisant les transformateurs modulés booléens et les éléments de résistance [84] a été repris par *Borutzky* où cette structure a été adaptée à une forme de causalité statique pour l'utiliser ensuite dans la détection et l'isolation des défauts [107].

Notre travail de thèse est basé sur les BGHs avec les jonctions contrôlées pour la modélisation des SDHs avec des commutations contrôlées. Les BGHs introduisent des jonctions contrôlées agissant comme des commutateurs idéaux permettant ainsi à une jonction d'être soit dans l'état ON ou l'état OFF. Le BGH étend les avantages des BGs [41] aux SDHs par l'introduction des jonctions contrôlées pour la modélisation des changements du mode discret. Pour une jonction contrôlée de type 1 à l'état éteinte (OFF), les flux de tous les liens (bond) liés sont égaux à zéro.

De même pour une jonction contrôlée de type 0, cette dernière annule la valeur effort de tous les liens connectés (adjacents) pendant l'état OFF. Puisque le BGH définit localement la commutation, il permet une représentation concise du modèle hybride. Ce qui est différent avec le modèle automate hybride, où les modèles du système sont pré-énumérés, ce qui est dans les systèmes réalistes, n'est pas toujours possible.

1.5 Diagnostic des défauts

En général, il existe trois étapes pour le diagnostic des défauts : 1) détection, 2) isolation et 3) identification de défaut [4].

1.5.1 Détection des défauts

Cette étape consiste à fournir une information à l'opérateur sur la présence ou non d'un défaut. Cette information qui semble être "booléenne" est en réalité très complexe en raison de la présence de bruits de mesure, d'incertitudes paramétriques et de perturbations etc... . dans cette étape, la robustesse de détection et la distinguabilité entre les perturbation et les vrais défauts sont des verrous scientifiques forts. Notre travail de recherche concerne la robustesse vis à vis des incertitudes paramétriques. Les performances de cette étape concernent les fausses alarmes ou non détection pouvant alors introduire des états catastrophiques et/ou non confiance de l'opérateur au système de surveillance.

1.5.2 Isolation du défaut

Une fois l'alarme générée, l'étape isolation a pour but d'établir le candidat du défaut possible qui peut expliquer le comportement anormal observé. L'isolation de défauts est basée sur l'analyse d'un ensemble de signatures répertoriées. La non-isolation du défaut peut provoquer un arrêt inutile de l'installation.

1.5.3 Identification du défaut

Cette étape a pour but de déterminer l'amplitude et le type du défaut. Pour les défauts brusques, si un ensemble de défauts multiples demeure après l'isolation de défaut, alors l'identification est nécessaire pour chaque ensemble de défauts qui correspond le mieux aux observations est considéré comme étant le réel.

Pour les défauts naissants, l'étape d'identification est difficile étant donné que le comportement de dégradation dynamique pour ce dernier doit être supposé connu à l'avance et parfois cette connaissance préalable n'est pas facile à l'obtenir.

Si la gravité du défaut identifié est acceptable, cette sévérité sera utilisée dans la conception de configuration de la loi de contrôle du système pour atteindre la tolérance aux défauts. D'autre part, si le résultat d'identification de défaut indique que la panne est trop sévère, alors le composant défectueux correspondant doit être remplacé.

La nature des situations possibles de défauts peut être classé en trois catégories :

1. **Défaut brusque (Abrupt) :**

Il est généralement modélisé comme une déviation (une fonction échelon 'step') et généralement persistant comme montré en FIGURE 1.3, où t_0 est le point de commencement du défaut.

Pour le défaut brusque, il est important que le système de diagnostic soit capable de détecter le changement brusque en temps voulu afin d'éviter les conséquences catastrophiques. Dans ce cas, la détection précoce est le principal objectif du diagnostic.

2. **Défaut naissant (Incipient) :**

Les défauts naissants sont généralement liés à la détérioration des composants du système comme montrée en FIGURE 1.4. Il est relativement difficile de détecter le défaut naissant en raison de son évolution lente et l'effet de compensation de l'asservissement du système.

3. **Défaut intermittent (Intermittent) :**

Il se manifeste habituellement d'une manière intermittente de façon imprévisible comme le montre la FIGURE 1.5. Les défauts brusques et naissants appartiennent à des défauts

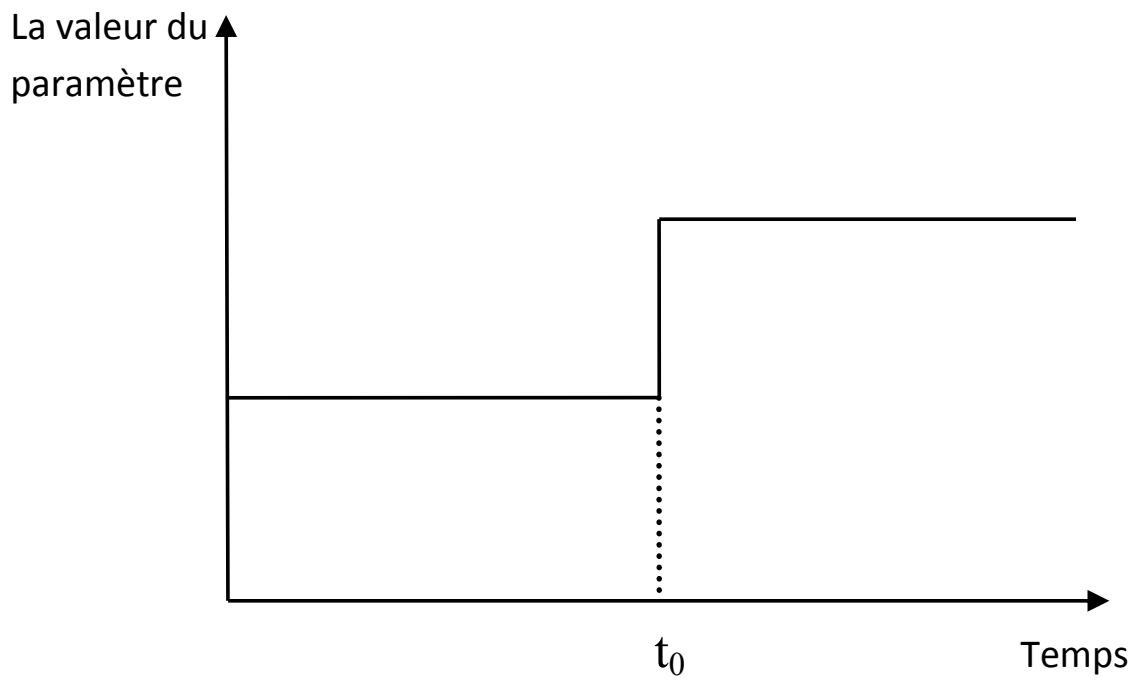


FIGURE 1.3 – Profil du défaut brusque

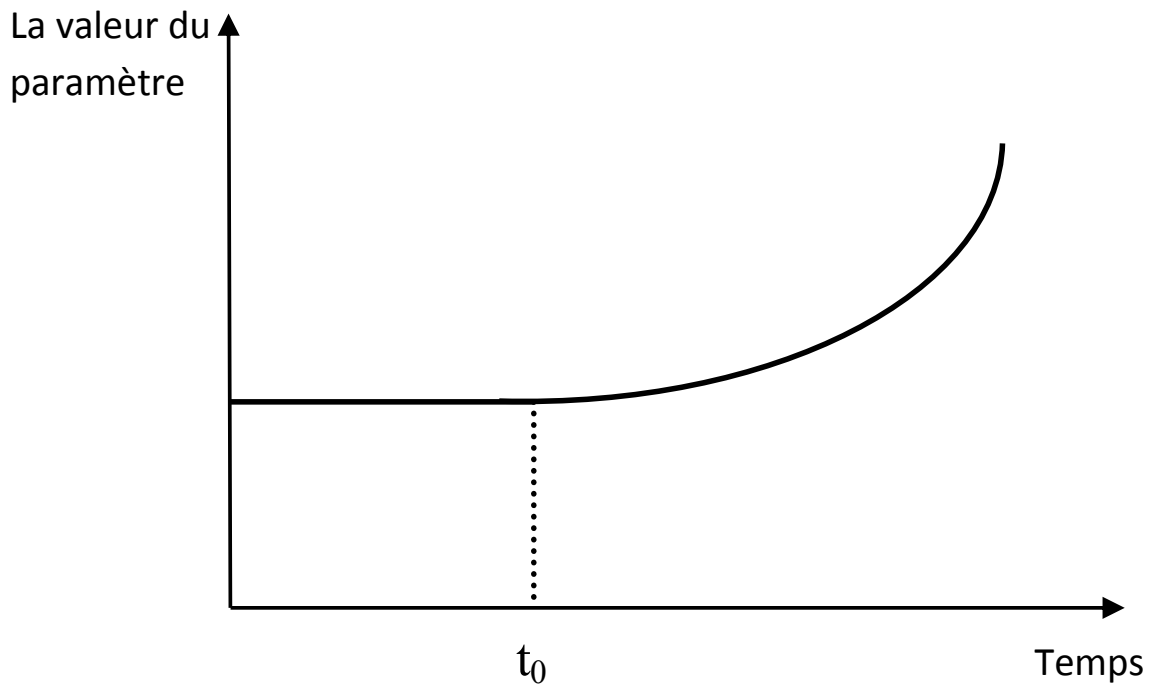


FIGURE 1.4 – Profil du défaut naissant

persistants, ce qui signifie qu'une fois qu'ils apparaissent ne disparaissent pas, par contre les défauts intermittents disparaissent.

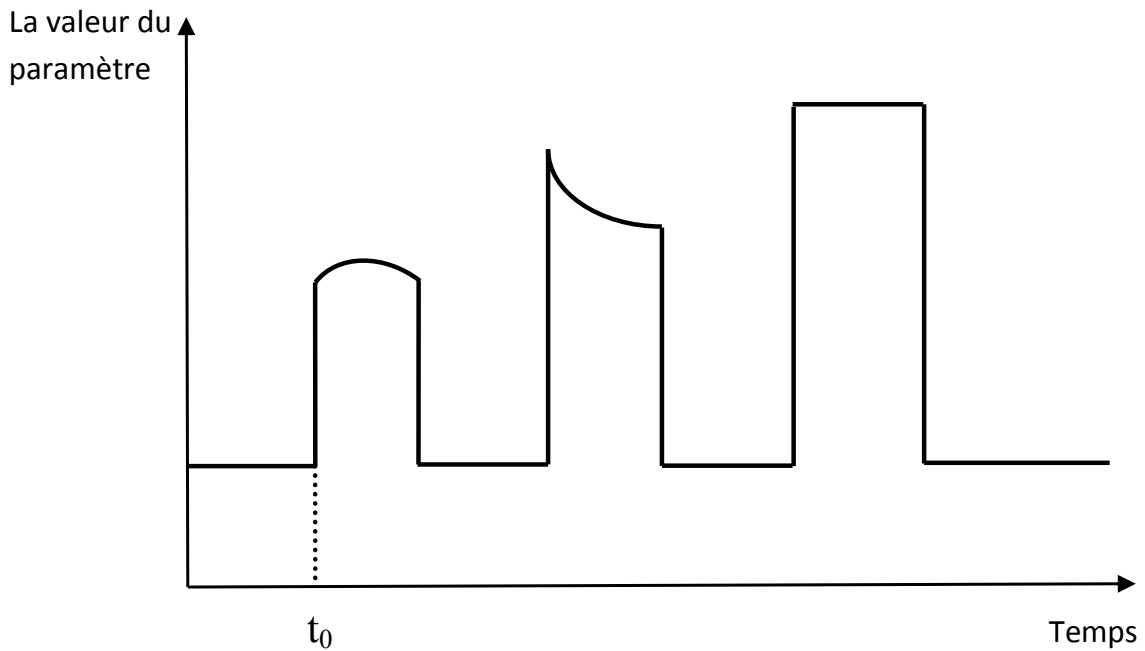


FIGURE 1.5 – Profil du défaut intermittent

Différentes sources de défauts :

– **Défaut composant :**

Une déviation de la valeur du paramètre par rapport à sa valeur nominale et qui peut provoquer un changement de l'état du système. Par exemple, un défaut de type crevaison dans une voiture va augmenter le coefficient de frottement entre la roue et le sol.

– **Défaut capteur**

Les capteurs fournissent les signaux de mesure d'un système surveillé, et transmettent les informations liées au comportement d'un système et ses états internes. Les défauts de capteurs se produisent quand il y a des écarts entre les signaux de mesure et leurs valeurs réelles.

– **Défaut actionneur**

Les défauts actionneurs sont des effecteurs de commande d'un système, pour la plupart des systèmes électromécaniques.

Les actionneurs sont nécessaires pour transformer les signaux de contrôle à des signaux de commandes appropriés tels que les couples et les forces pour conduire le système. Les défauts de l'actionneur se produisent quand il ya des écarts entre la sortie de l'actionneur désirée et la sortie réelle de l'actionneur au système pour laquelle il a été conçu.

Ces différentes sources de défauts sont données à la FIGURE 1.6.

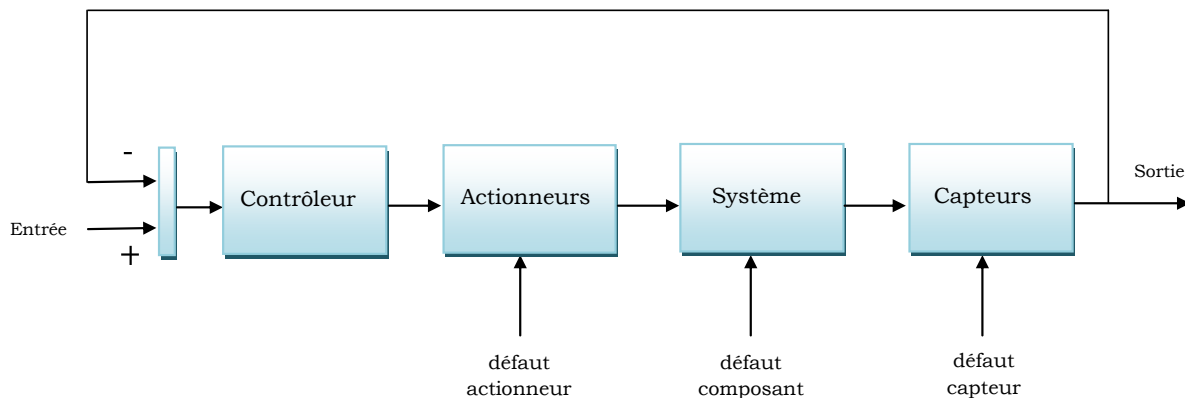


FIGURE 1.6 – Différents défauts dans un système surveillé

– *Les incertitudes :*

Les incertitudes dans la modélisation peuvent être dues à une mauvaise estimation des dynamiques dans un système, une identification non précise des valeurs numériques des paramètres ou variation de leurs valeurs.

– *Les perturbations :*

Les perturbations font généralement référence à des bruits de mesure de capteurs qui sont des signaux à haute fréquence. D'autres facteurs comme le frottement non mesuré et entrées inconnues, sont également considérés comme des perturbations.

Un bon système de diagnostic doit être robuste aux différentes perturbations et incertitudes mais tout en conservant sa sensibilité aux défauts [46].

1.6 Méthodes de diagnostic à base de modèle

Un grand intérêt a été accordé à la thématique du diagnostic des défauts à base de modèle pour les SDHs. La performance d'un système de diagnostic à base de modèle pour la détection et l'isolation des défauts connue sous l'expression anglaise Fault Detection and Isolation (FDI) dépend de la précision du modèle et donc de la complexité du système.

Un modèle doit être construit à un niveau de détail où les composants du système peuvent être mis en correspondance avec les composants du système et les paramètres. Si un modèle approprié pour les SDHs est utilisé, une méthode à base de modèle peut obtenir de meilleures performances par rapport à une méthode guidée par des données.

Une méthode à base de modèle utilise généralement un ensemble de résidus appelés Relations de Redondances Analytique (RRAs) qui représentent la différence entre les informations obtenues à partir du système réel et celles générées par un modèle du système. Il n'est pas difficile de réaliser un diagnostic de défauts pour les SDHs à condition que l'information du mode est valable avant et après l'occurrence du défaut.

Si l'information du mode n'est pas disponible avant l'occurrence du défaut, il est difficile de

réaliser le diagnostic de défaut parce que le comportement anormal du résidu peut être causé par un défaut ou un changement de mode. D'autre part, lorsque le mode est inconnu après qu'un défaut soit détecté, il est difficile de réaliser l'isolation et l'identification des défauts. Par conséquent, une méthode systématique est nécessaire afin de traiter le diagnostic d'un système hybride sans avoir besoin d'information sur l'état des modes.

Les techniques du diagnostic des défauts sont basées sur l'information du processus obtenue par les capteurs et les signaux de commande délivrés par les correcteurs. Par conséquent, de graves problèmes se posent si les signaux d'entrée et de sortie doivent être considérés pour être éventuellement des sources de défaut.

Le diagnostic des capteurs et des actionneurs a reçu une attention particulière. En outre, la nature du défaut peut être brusque (Abrupt) ou naissant (Incipient). Dans la plupart des applications réelles, il est difficile de connaître la nature des défauts à l'avance. Dans certains cas, plusieurs défauts peuvent se produire simultanément dans les composants, capteurs et actionneurs. Tous ces facteurs augmentent la complexité du diagnostic des défauts dans les systèmes.

1.6.1 Modèles qualitatifs

Dans les méthodes à base de modèle, les modèles servent de représentation des connaissances d'une grande quantité d'informations structurelles, fonctionnelles et comportementales et leur relation. Cette représentation est utilisée pour créer un raisonnement de cause à effet complexe conduisant à la construction du diagnostic puissant robuste et l'isolation des défauts [108]. L'approche à base de modèle qualitative est applicable lorsque le modèle numérique du système est indispensable. Il utilise des abstractions qualitatives pour modéliser des systèmes complexes tandis que la structure du modèle est bien définie. Les modèles utilisés dans les méthodes qualitatives sont relativement simples par rapport aux modèles numériques. La sensibilité du système du diagnostic des défauts pour modéliser les erreurs et les bruits de mesure peuvent être atténués [109].

L'algorithme de simulation qualitative (QSIM) est un outil de modélisation largement utilisé pour décrire le modèle continu qualitativement [110]. Cette approche est destinée à simuler le comportement des systèmes physiques en utilisant des valeurs qualitatives, plutôt que fournir des explications pour les comportements des processus physiques.

Dans [111], plusieurs modèles défectueux sont construits en utilisant le (QSIM). Le comportement défectueux observé à partir du système réel, est comparé avec celui des modèles théoriques défectueux pour choisir l'ensemble des défauts qui se produisent dans le système. Néanmoins, la détermination des modèles de défaut a besoin de connaissances préalables.

Dans [112, 113], un diagnostic de défaut à base de l'algorithme QSIM est présenté pour gérer de multiples défauts dans les dispositifs continus. La modélisation qualitative quantifie l'espace d'état en utilisant les valeurs historiques et spécifie les relations qualitatives entre les états quantifiés, ce qui conduit à un ensemble d'équations différentielles qualitatives.

Une méthode de simulation qualitative floue est développée dans [114]. Cette méthode peut fournir des informations plus précises que la méthode à base de l'algorithme de simulation (QSIM) étant donné que l'utilisation des ensembles flous conduit à une représentation plus précise du temps. Dans le diagnostic des systèmes continus, le temps est un facteur important à prendre en considération lors de la conception de l'algorithme. Cependant, il est difficile de choisir un nombre de sous ensembles flous appropriée et la fonction d'appartenance. Toutefois, ce problème est connu et classique lors de la conception de systèmes basée sur la logique floue.

Dans [115], une méthode à base de modèle BG qualitatif (BGQ) est développée basée sur la combinaison du raisonnement qualitatif et la théorie de modélisation BG afin de bénéficier des avantages des deux approches. Dans la BGQ, la forme des équations qualitatives associé au modèle BG est exploitée pour l'analyse qualitative des défauts. Ces équations représentent les variables physiques des composants (paire effort-flux) et leurs relations fonctionnelles peuvent être déclarées directement à partir du modèle graphique. Ceci est particulièrement adapté pour le diagnostic des défauts à base de modèles parce que les défauts possibles peuvent être localisés à travers une analyse des interrelations des états des composants. Le composant, et le comportement anormal observé qualitativement. Un tel algorithme qualitatif est effectué en utilisant la mesure disponible, c'est-à-dire, l'histoire de données antérieures. Par conséquent, les équations du comportement qualitatif sont toujours écrites dans la causalité différentielle [116]. Pour les éléments passifs, les équations du comportement qualitatif sont définies comme suit :

$$\text{Élément } R = e(k) = Rf(k)$$

$$\text{Élément } C = f(k) = C[e(k) - e(k - 1)]$$

$$\text{Élément } I = e(k) = I[f(k) - f(k - 1)]$$

Où k désigne le temps actuel et $k - 1$ représente le temps du modèle (échantillon précédent). Étant donné que, seulement l'information qualitative est considérée, le temps d'échantionnage actuel T , utilisé pour les dérivées, n'apparaît pas dans ces équations.

Un espace qualitatif $[+1], [+], [0], [-], [-1], [?]$ est défini pour représenter les comportements du système et les états des composants pour le diagnostic des défauts qualitatifs [117].

Pour les mesures du système, $[+]$ et $[-]$ représentent respectivement les valeurs positives et négatives dans la mesure. $[0]$ représente la limite entre $[+]$ et $[-]$, alors que $[?]$ désigne la valeur incertaine. $[+1]$ et $[-1]$ représentent respectivement des valeurs très grandes et négatives. Pour les variables de puissance E et F , $[+1], [-1]$ et $[0]$ représentent différents comportements anormaux en raison de défauts du système. Pour les composants du système R, C et I , $[+]$ représente un composant bloqué (une vanne bloquée par exemple), empêchant la circulation de la puissance, et $[0]$ désigne la fuite du composant (dans un réservoir ou réacteur par exemple) ou un court circuit (dans le cas de systèmes électriques).

Étant donné que les opérations sur les variables qualitatives sont différentes de celles numériques, un ensemble d'opérateurs qualitatif est défini comme $\{ +, -, \times, /, = \}$ et ces opérateurs qualitatifs ont les mêmes significations mathématiques que leurs équivalents dans le domaine numérique. Le mécanisme d'interface des équations qualitatives est différent des équations mathématiques analytiques [117].

Contrairement à l'analyse par arbre de défaillance et le diagnostic à base de logique floue, une connaissance à priori sur les relations de cause à effet de défauts du système n'est pas nécessaire pour l'approche à base de BGQ [118, 119]. Ces deux propriétés comportementale et qualitative du BGQ permettent de déduire un diagnostic plus robuste afin d'accommoder les différents défauts imprévisibles.

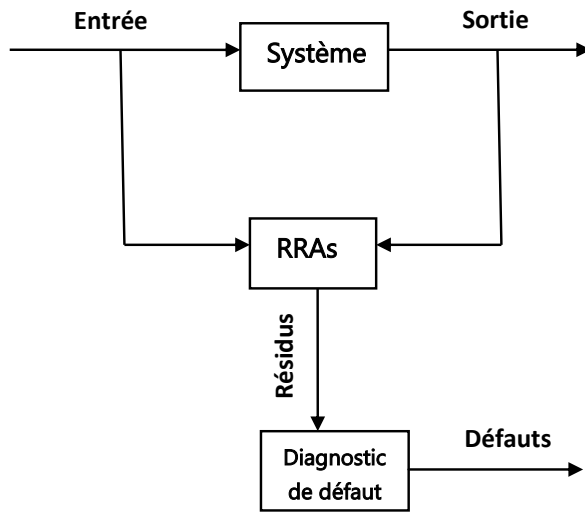
Toutefois, en raison de la caractéristique imprécise de la représentation qualitative, cette méthode a des difficultés dans la détection et la localisation de défauts naissants [117, 120].

Puisque la capacité de distinction de la méthode qualitative est limitée, il est difficile de traiter l'isolation de défauts multiples. En outre, les résultats de diagnostic de la méthode à base de BGQ contiennent généralement un ensemble de défauts probables, qui ne sont pas suffisants pour certaines tâches du diagnostic.

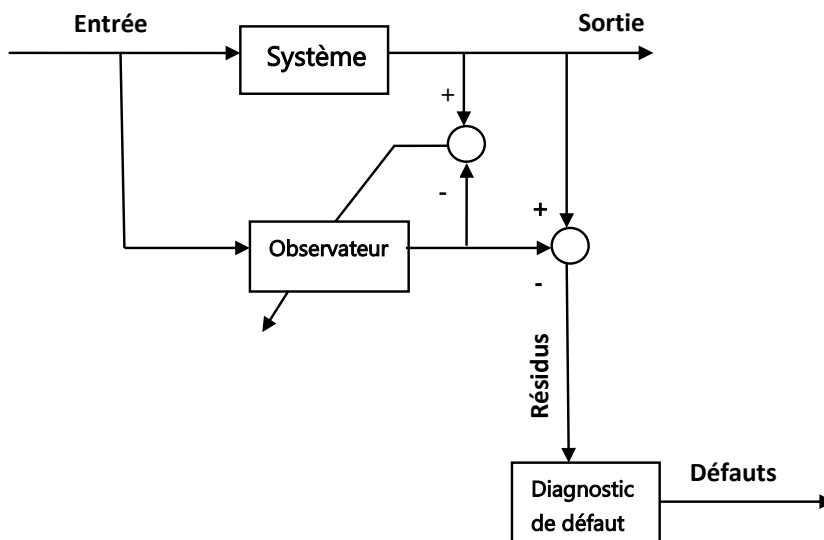
Afin de connaître avec précision l'information du défaut, c'est-à-dire, pour obtenir des performances de la tolérance aux défauts, des modèles analytiques sont préférés afin de quantifier et calculer la commande adéquate. La méthode quantitative de diagnostic de défaut vérifie la cohérence entre le système réel et son modèle de comportement par comparaison entre les informations obtenues à partir du système réel (fournies par les capteurs) et celle obtenues à partir d'un modèle de comportement. Les différences résultantes sont appelées résidus. Chaque résidu doit être égal à zéro ou proche de zéro dans le fonctionnement normal du système, mais différent de zéro lorsque un défaut apparaît [121]. Le défaut est détecté par le suivi de l'évolution des résidus, ce qui implique généralement l'établissement d'un seuil sur une quantité résiduelle. Les modèles doivent être insensibles à la modélisation des erreurs tandis que dans le même temps sensible aux défauts. Les principaux éléments d'un système de diagnostic dit FDI sont un générateur d'indicateurs de fautes (généralement sous forme formelle) et l'évaluation numérique de ces indicateurs pour produire un résidu. La génération de résidus peut être développée en utilisant les différentes méthodes, comme par exemple, l'observateur, relations de parité (appelés aussi relations de redondances analytiques) et les méthodes à base de l'estimation des paramètres.

Le diagnostic de défaut à base d'observateurs bien connu dans le système de diagnostic FDI à base de modèle analytique consiste à comparer la sortie réelle d'un système à surveiller (fournie par les capteurs) avec la sortie de référence produite par un modèle analytique. Une méthode à base des Relations de Redondances Analytiques (RRAs) fonctionne par l'évaluation de la contrainte en utilisant les signaux d'entrées, données du capteur et les valeurs des paramètres à partir du système surveillé [122, 123]. La contrainte écrite sous forme symbolique ne contient que des variables connues. En d'autres termes, les RRAs sont des contraintes statiques ou dynamiques qui relient l'évolution dans le temps des variables connues lorsqu'un système fonctionne selon son modèle de fonctionnement normal. Les RRAs sont générées à travers la procédure de conception qui élimine les variables non observables dans les équations du système [124]. Cette procédure de conception peut être compliquée pour les systèmes complexes, en particulier ceux qui ont des comportements non linéaires et des défauts multiplicatifs. Le schéma de génération de résidu en temps réel est présenté dans la FIGURE 1.7.

Lorsqu'il existe un défaut dans le système, certains résidus s'écartent suffisamment de telle sorte que l'écart est différent de la réponse résiduelle en fonctionnement normal.



(a)



(b)

FIGURE 1.7 – Générateur résiduel : (a) : Méthode à base des RRAs, (b) : Méthode à base d'observateur

Les méthodes à base d'observateur sont utilisées pour le diagnostic de défaut actionneur et capteur [125] et l'amélioration des performances d'isolabilité.

Pour l'isolation du défaut, un certain nombre d'observateurs de Luenberger est construit et chaque observateur est relié à une seule sortie. Pour la détection du défaut actionneur, chaque observateur est connecté à une seule entrée. L'idée de base est d'avoir un banc d'observateurs : où chaque observateur dépend d'un défaut, ce dernier est découplé de tous les autres défauts et toutes les perturbations. Par conséquent, cette méthode peut détecter le même nombre de défauts en même temps que le nombre d'observateurs [126].

Les approches d'estimation des paramètres utilisant l'hypothèse de défauts d'un système dynamique sont reflétés dans les paramètres physiques tels que la masse, frottement, résistance, etc. L'identification des paramètres du modèle mathématique peut être utilisée pour la détection et l'isolation des défauts [127, 128].

Un autre élément de la méthode à base de modèle quantitatif est l'évaluation résiduelle, qui détermine si des défauts sont produits par la vérification des résidus et leurs évolutions. Les règles de prise de décision généralement sont conçues particulièrement pour des processus différents [129].

Le diagnostic de défaut robuste tente de minimiser les mauvaises détections et les fausses alarmes en tenant compte des bruits du résidu. Les fausses alarmes font référence à une indication de défaut qui en réalité, ne se produit pas. Il existe différentes approches pour la génération des résidus robustes qui sont insensibles aux incertitudes de modélisation et les bruits de mesures. Une des méthodes robustes, appelée approche active, est basée sur la génération des résidus qui sont insensibles aux incertitudes de modélisation mais sensibles aux défauts. Certaines techniques comme l'observateur à entrée inconnue sont proposées afin d'obtenir une performance robuste active [130, 131, 132].

Une autre approche pour obtenir la robustesse appelée aussi passive, tente d'obtenir la robustesse dans l'étape de la prise de décision. Dans ces méthodes, l'effet de l'incertitude paramétrique est propagé aux résidus et un seuil adaptatif est utilisé pour envelopper ces résidus afin d'atteindre la robustesse [133, 11].

Dans [11], une méthode FDI robuste vis-à-vis des incertitudes paramétriques est proposée en utilisant l'approche de modélisation BG sous la forme LFT. Ces Relations de Redondance Analytiques (RRAs) robustes sont générées directement à partir du modèle BG. Les RRAs sont constituées de deux parties parfaitement distinctes, une partie nominale (Résidu) qui décrit le fonctionnement du système et une partie incertaine (seuil adaptatif) utilisée pour l'analyse de la sensibilité et l'évaluation des résidus [8].

La procédure de décision pour l'évaluation résiduelle est améliorée en utilisant les indices de détectabilité qui représentent la capacité du système pour détecter des défauts en présence d'incertitudes paramétriques. Il est déduit que la robustesse dans la détection de défauts peut être obtenue dans la génération des résidus ou à l'étape de prise de décision. Le traitement préalable du résidu dans l'approche active est analytique, tandis que le post-traitement dans l'approche passive est généralement numérique. La méthode active est facile à implémenter mais peut traiter des types limités non linéarités du système.

La technique passive n'est pas limitée par les formes de la non linéarité du système ; cependant, elle est moins robuste comparée à la méthode active en raison du fait qu'il peut y avoir certaines mauvaises détections des amplitudes faibles des défauts. Une certaine amélioration

peut être obtenue en utilisant les sommes additionnées pour la détection, de petites magnitudes des défauts mais la probabilité de la fausse alarme augmente.

Les SDHs peuvent être un moyen efficace pour la modélisation des systèmes complexes présentant à la fois des dynamiques continues et des modes discrets. Si ces systèmes complexes sont destinés pour une application essentielle à la sécurité, alors il serait désirable d'être en mesure d'identification lorsqu'un défaut est produit dans le système. Il existe de nombreux articles dans la littérature sur le thème du diagnostic des défauts des systèmes complexes.

1.7 Diagnostic des SDHs

Plusieurs travaux ont été publiés dans le cadre du diagnostic à base de modèle pour les SDHs [134, 135, 136, 137, 138, 139, 140]. L'objectif de ces méthodes est d'étendre les techniques issues des systèmes continus ou des systèmes à événement discret aux SDHs. D'autres méthodes, dites mixtes [141, 142, 143, 144, 145, 146] consistent à considérer en même temps les deux dynamiques, continue et discrète.

Dans cette section, un état de l'art des méthodes de diagnostic issues des systèmes continus, de systèmes à événement discret et mixtes est présenté.

1.7.1 Méthodes issues des systèmes continus

Ces méthodes sont fondées sur des approches conçues pour les systèmes continus comme par exemple la génération des résidus et les graphes causaux [147, 148, 15, 17, 149]. Généralement dans ces méthodes, l'utilisation de l'aspect discret est faible.

– Approches à base de techniques de génération de résidus

Parmi ces méthodes, on trouve l'approche de *Koutsoukos & al.* [148], dans cette méthode, le Réseau de Pétri est utilisé pour estimer en ligne le mode de fonctionnement du système dynamique hybride. L'apparition d'un défaut est détectée à l'aide de la comparaison entre les grandeurs mesurées avec celles attendues en tenant compte des commandes envoyées au processus. Un arbre logique est appliqué pour la réalisation du diagnostic de l'état du processus. Cette méthode a pour avantage la détection des anomalies dues aux variables continues et à l'occurrence d'événements perturbateurs.

L'automate hybride est un schéma couramment utilisé pour la modélisation des SDHs. Dans un automate hybride, le comportement du système est défini par les systèmes continus et les changements du mode discret qui modifient la dynamique continue. Les transitions de mode sont contrôlées ou autonomes dans le diagnostic du système hybride, deux types de défauts sont définis, le premier est le défaut paramétrique ; un ou plusieurs paramètres du modèle sont déviés de leur valeur nominale à une valeur inconnue. Le deuxième type est le mode défaillant ; dans ce cas, l'état défectueux est connu a priori, et peut être modélisé par des paramètres connus seulement. Deux exemples ; les défauts court-circuits et les défauts circuits ouverts des commutateurs de puissance [150]. Les modes de défaut peuvent être détectés et isolés par les techniques d'identification du mode. Le problème

avec ces techniques est qu'aucune faute paramétrique n'est considérée, et le comportement du système réel doit correspondre avec l'un d'un ensemble prédéfini de modes.

Cocquempot & al., proposent dans [135], une méthode de diagnostic pour les SDHs. Cette méthode est basée sur les méthodes de diagnostic fondées sur la redondance analytique. Un automate hybride est utilisé afin de modéliser le système à diagnostiquer, la technique de génération de résidu entre les variables d'entrées et de sorties mesurées est utilisée pour la détection des défauts et les relations de redondances analytiques sont déterminées à partir des entrées et des sorties de même pour leurs dérivées, d'une manière indépendante du mode du système. Le diagnostic est réalisé à partir de résidus structurés spécifiques à chaque mode.

Dans [151], les auteurs présentent une méthode de détection et d'isolation de défaut dans un système hybride basée sur les résidus de parité structurée et le modèle est un automate hybride. Deux types de défauts sont considérés; défauts qui affectent le comportement du mode actuel et les défauts affectant la trajectoire d'évolution discrète. Les défauts du deuxième type sont détectés par une technique de suivi du mode, basée sur la cohérence des résidus et le modèle dynamique discret. Si un défaut du premier type est produit, l'identification du mode est basée uniquement sur les résidus robustes au défaut.

Un observateur hybride est utilisé par *Balluchi & al.* [15], fondé sur un observateur continu et un observateur discret. L'observateur continu a pour but d'estimer l'évolution des variables continues alors que l'observateur discret permet l'identification de l'état discret actuel du système. Une identification du mode à base d'observateur est également proposée dans [152] pour un Système Linéaire à Commutation (SLC).

– **Approches à base de techniques de génération de résidus**

Dans le travail de *Gomaa et Gentil* [16], et le travail de *Gomaa* [153], une méthode de diagnostic des SDHs basée sur une extension des RdP hybrides connues sous le nom de réseaux de pétri continus causaux hybrides RdPCh¹ est présentée. Ce modèle utilise trois types de RdP qui sont :

(1) Un RdP continu temporisé ou bien réseaux de pétri continus causaux hybrides RdPCh; c'est un modèle approximatif qui permet la modélisation de manière causale de la partie continue du SDH, (2) Un RdP classique qui modélise le système de contrôle et enfin (3) un RdP classique permettant de modéliser l'interaction entre la partie continue et le système de contrôle. Les liens causaux entre les variables continues sont représentés à travers des fonctions de transfert qualitatives basées sur les informations du gain, retard,

Sur la base du modèle (RdPCh), les auteurs proposent dans [16, 153] un système de diagnostic des défauts.

Une autre méthode est proposée dans [17] par *Karsai & al.*, cette approche combine les BGH [154] pour la modélisation et la génération d'un graphe de propagation des défauts permettant la description des relations causales et temporelles entre les différents modes de défauts et les observations associées [155].

1. Réseaux de Pétri Continues Causaux Hybrides

D'après les méthodes citées concernant les approches issues des systèmes continus, les remarques suivantes peuvent être déduites :

- Les méthodes issues des systèmes continus offrent une grande importance à la partie continue au détriment de la partie discrète, dans ce cas, le diagnostic est partiel.

- Il existe peu de travaux dans ce type de méthode qui traite le problème de la robustesse vis à vis des entrées inconnues et de la sensibilité aux défauts des opérations de détection et de localisation de défauts.

Une technique de diagnostic pour les systèmes à commutation est développée par *Van Gorp*, dans [139], où deux procédures de diagnostic sont présentées ; la première basée sur un observateur hybride et un diagnostiqueur pour la détection d'une faute continue, quant à la seconde elle a pour but de détecter et d'isoler une faute discrète, basée sur la théorie du test.

Zouari & al., [156], présentent une méthode de diagnostic pour les systèmes non linéaires à commutation où les modes de fonctionnement non linéaires en temps discret sont associées à une loi de commutation. Pour cela, une méthode de génération de résidus par projection des données d'entrées /sorties pour les systèmes non linéaires représentés sous forme Takagi-Sugeno [157], est utilisée, les résidus sont exploités pour la détection des défauts dans les modes continus et pour la détection des commutations vers le mode de fonctionnement normal ou défaillant.

Dans [158], *Narasimhan*, présente un diagnostic qualitatif-quantitatif ; développé pour les défauts paramétriques brusques dans les SDHs. La détection de défaut est basée sur un observateur hybride, qui intègre un filtre de Kalman (pour le suivi continu) et un détecteur de changement de mode. Les événements discrets sont des changements de mode autonome (déclenchés par les variables d'état continu). Une fois que les conditions de changement de mode sont détectées, un automate à état fini est utilisé pour déterminer le nouveau mode. Le modèle d'espace d'état du nouveau mode est calculé de manière dynamique et appliqué au filtre de Kalman. Si un défaut est détecté, l'observateur hybride est incapable de suivre les changements de mode autonomes. Par conséquent, les hypothèses de défaut sont générées dans leurs modes précédents jusqu'au niveau de "diagnosticabilité" du système.

1.7.2 Méthodes issues des SEDs

Il existe peu de travaux de diagnostic pour les SDH fondés sur les techniques SED, parmi eux on trouve les approches basées sur l'abstraction des trajectoires continues et sa représentation à travers des modèles discrets dynamiques, l'objectif consistait à établir des partitions qualitatives des grandeurs continues et de les représenter sous forme d'états ou d'étiquettes de transition d'état. Cette méthode représente une solution alternative aux approches fondées sur une représentation analytique précise. Parmi les travaux développés dans ce contexte, on trouve le travail de *Bhowal & al.* [18], basé sur un modèle automate hybride à temps discret.

Une telle abstraction des dynamiques continues n'est toujours pas réalisable quand le système est complexe et comporte un grand nombre de capteurs.

Une autre technique basée sur une acquisition expérimentale du modèle du système à travers l'abstraction des équations de l'espace d'état et les méthodes d'identification à base de réalisations expérimentales. Parmi ces méthodes on cite les travaux de *Lunze* [19, 20].

Une approche discrète à base de modèle pour l'estimation du mode et la détection est présentée dans le travail de *Zhao & al.* dans [159], où les auteurs ont utilisé un réseau de Pétri temporisé pour faire l'abstraction de la partie continue et pour décrire seulement l'évolution temporelle des événements discrets du système. Bien que cette méthode nécessite généralement la connaissance spécifique du domaine pour la génération hors-ligne d'une table des symptômes du défaut. En outre, les données d'apprentissage (pour les études et les tests de fiabilité) est nécessaire pour le calcul des défauts individuels des distributions de probabilité à priori et des modèles d'événements du signal pour caractériser les transitions du mode.

1.7.3 Méthodes mixtes

Ces méthodes tiennent compte des deux dynamiques à la fois, parmi ces travaux sont dans ce cadre on trouve *El Mezyani* [160]; cette approche est basée sur les graphes de prédiction de fonctionnement normal GPFN² et les graphes de prédiction de fonctionnement défectueux GPF³ (automate hybride), le but est la surveillance des équations d'état (contraintes d'égalité), les conditions d'invariant (contraintes d'inégalité) et l'état discret du système. Les tâches de l'identification du mode de fonctionnement actif, de la détection et la localisation des défaillances sont basées sur les propriétés structurelles des résidus robustes vis-à-vis des entrées inconnues, issues des relations de redondances analytiques.

Derbel dans [155], présente une technique de diagnostic des SDH basée sur une sous classe d'automate hybride (automates rectangulaire), cette méthode permet l'approximation des comportements de la dynamique continue du SDH à l'aide des conditions de flux rectangulaires sous certaines conditions restreintes. Cette approche est basée sur la conception d'un diagnostiqueur en ligne permettant l'estimation de l'état hybride courant du système ainsi que les occurrences de défauts à l'aide de ces estimations, le diagnostiqueur décide si un défaut est produit ou non.

Dans [143], le problème du diagnostic des SDH à été reformulé par *Bayoudh* comme étant l'identification à tout instant du mode du SDH (nominal et défectueux), pour ce la, la partie continue du système est diagnostiqué par l'extension de l'approche d'espace de parité [135], les résidus résultants sont utilisés par le diagnostiqueur afin d'identifier le mode actif.

Une autre technique a été présentée par *Olivier-Maget* dans [161], basée sur les Réseaux de Pétri Différentiel Objet RdPDO⁴ et les filtres de Kalman étendus dans le but de la modélisation et le diagnostic d'un procédé chimique présentant un comportement hybride. Le filtre de Kalman étendu utilisé permet ainsi l'estimation de l'état continu dans le mode de fonctionnement actif, en éliminant l'effet des perturbations (bruit, précision du modèle).

Dans [162], *Hamdi*, présente une méthode de diagnostic basée sur les observateurs pour les SDHs modélisés par les Réseaux de Pétri Différentiels. La stratégie d'estimation de l'état hybride est basée sur un schéma d'observation combinant un observateur de réseau de Pétri et d'un observateur continu de Luenberger. A partir du marquage initial, l'observateur continu estime l'état continu du système. Ce dernier est utilisé par l'observateur discret pour la détection de nouveaux événements. Ainsi l'observateur discret restitue le mode discret en estimant le marquage discret et fournit le mode actif à l'observateur continu. Les gains de l'estimation sont calculés pour obtenir une convergence exponentielle de l'observateur continu aussi bien

2. Graphe de Prédiction de Fonctionnement Normal

3. Graphe de Prédiction de Fonctionnement Défectueux

4. Réseaux de Pétri Différentiel Objet

dans le cas où l'observateur discret détecte correctement le mode.

Les méthodes mixtes considèrent conjointement les parties continues et discrètes mais les problèmes de la robustesse vis-à-vis des entrées inconnues et de la sensibilité aux défauts des résidus méritent d'être encore approfondis.

Une méthode mixte pour une classe des Systèmes Linéaires à Commutation (SLC) à base d'observateurs hybrides est développée par *Belkhiat* dans [145]. L'observateur hybride est utilisé dans le but de fournir avec précision l'estimation de la valeur courante de l'état continu (et par extension la reconstruction de sa sortie) en fonction des entrées et sorties mesurées. Cette estimation nécessite la connaissance du mode de fonctionnement actif à tout instant.

En outre la valeur estimée de la sortie est comparée à la valeur mesurée pour la génération des résidus. La structure du générateur de résidus proposée par *Belkhiat & al.* dans [145] est constituée de trois parties : un observateur continu pour l'estimation de l'état continu, une partie pour l'identification du mode actif et un gain de pondération. L'observateur continu reçoit les entrées et sorties du Système Linéaire à Commutation et l'estimation du mode actif générée par la partie identification. En revanche, elle fournit l'estimation de l'état continu nécessaire pour l'identification du mode actif, et l'estimation du signal de sortie du SLC. Les gains de l'observateur et de pondération sont choisis afin d'assurer le compromis (robustesse des résidus vis-à-vis des entrées inconnues et sensibilité aux défauts). L'inconvénient de cette méthode est que ce problème de robustesse n'a été traité jusqu'à présent que pour les systèmes continus et non pas pour les SLC.

Une autre approche mixte pour le diagnostic des SDH est développée par *Louajri & al.* dans [146]. Cette approche [146] est basée sur un diagnostiqueur de structure hybride composé de trois parties : un diagnostiqueur discret, un diagnostiqueur continu et un coordinateur. Le diagnostiqueur discret est modélisé comme un modèle automate hybride à temps discret, il est utilisé pour la détection et l'isolation des défauts discrets. Le diagnostiqueur continu est basé sur un ensemble de résidus en comparant les valeurs estimées et celles mesurées de chaque variable continu afin de diagnostiquer les fautes paramétriques. Le coordinateur combine entre les décisions continues et discrètes des deux diagnostiqueurs dans le but de diagnostiquer les fautes nécessitant l'interaction entre les deux diagnostiqueurs.

Une méthode de diagnostic pour les SDHs basée sur les observateurs hybrides est présentée par *Takrouni & al.* dans [22]. Cette méthode est composée de deux blocs d'observateurs, le premier est utilisé pour l'estimation du mode discret courant par la génération d'un banc de résidus, le deuxième bloc est consacré à la détection et la localisation des défauts capteurs.

Commentaires et remarques sur les méthodes citées ci-dessus

- Les méthodes issues des systèmes continus et celles issues des SED privilégient l'un des deux aspects du SDH au détriment de l'autre.

- La plupart des travaux cités auparavant s'appuient sur les méthodes à base d'observateurs pour le diagnostic de la partie continue des SDH [163, 164, 165, 166, 167, 156]. Cette préférence est justifiée par la flexibilité dans le choix de ses gains.

- Peu de travaux considèrent la robustesse, vis-à-vis des entrées inconnues, et la sensibilité aux défauts des opérations de détection et de localisation de défauts.

- La majorité de ces méthodes combine au moins entre deux formalismes afin de modéliser les deux parties du système hybride.

1.8 Diagnostic par Bond Graph

Les performances d'une méthode de diagnostic à base de modèle dépendent sur la qualité du modèle du système. La modélisation dans les systèmes physiques est une étape importante dans la conception de système de diagnostic.

Le BG est un outil puissant pour la conception des systèmes de diagnostic. Les propriétés causales et structurelles du BG sont utilisées pour déterminer l'origine du défaut.

Les méthodes de diagnostic à base de modèles BGs peuvent être classées en deux parties : méthodes quantitatives [34, 168, 2, 169, 170, 171] et méthodes qualitatives [172, 117]. Les approches quantitatives utilisent l'outil BG pour l'obtention des RRAs, ces dernières sont évaluées afin de générer les résidus pour l'évaluation de l'état du défaut du système dans les deux régimes de fonctionnement transitoire et permanent.

D'autre part, les méthodes qualitatives utilisent les descriptions qualitatives du BG pour le diagnostic.

Les méthodes quantitatives peuvent être divisées en deux classes : méthodes symboliques et méthodes numériques.

Pour les méthodes symboliques (travaux de *Tagina & al.* [168], et *Ould Bouamama & al.* [34]), les RRAs sont obtenues du modèle BG (en exploitant ses propriétés causales, structurelles et comportementales)) pour la génération et l'évaluation de résidus (par l'évaluation numérique des RRA en causalité dérivée) utilisés pour le diagnostic en temps réel.

Par les méthodes numériques à base de BG élaborent chaque RRA quantitative basée sur les équations de contraintes simples permettant ainsi la génération de résidus dans les environnements graphiques de programmation comme par exemple MATLAB SIMULINK [46].

Dans notre travail, on s'intéresse aux méthodes quantitatives symboliques.

En général, les méthodes de diagnostic des défauts à base de modèles quantitatives comportent deux étapes principales : la génération du résidu et l'évaluation du résidu.

La génération du résidu est une étape pour la dérivation (construction) des RRAs en utilisant le modèle du système.

Dans l'étape d'évaluation du résidu, les résidus sont évalués afin de déterminer l'occurrence d'un défaut.

L'outil BG [41], a prouvé son efficacité pour la modélisation[173] et le diagnostic des systèmes industriels complexes (travaux de l'équipe Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée des Systèmes (MOCIS) [34, 174, 175, 11] du Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille CRISAL UMR CNRS 9189 de l'université de Lille 1 Sciences et Technologies.

Pour plus de détails sur la modélisation et le diagnostic des systèmes industriels complexes, les lecteurs peuvent se référer aux livres suivants [173, 4, 49].

L'outil bond graph est utilisé aussi pour le diagnostic des systèmes dynamiques hybrides. Ces dernières années, plusieurs travaux ont été publiés dans ce contexte. Parmi ces travaux on trouve les travaux de *C. B. Low & al.* [33, 94, 176] en 2008 et 2010, ces travaux consistent à étendre le concept de Relation de Redondance Analytiques développé par *B. Ould Bouamama & al.* [34] en 2003 aux systèmes hybrides par la génération d'indicateurs de fautes ou (résidus) globaux connus sous le nom de Relation de Redondance Analytiques Globales (RRAG) permettant ainsi la description du comportement du système hybride valide à tous les modes de fonctionnement.

1.9 Intérêt de l'outil bond graph pour la modélisation et le diagnostic des systèmes hybrides comparé aux méthodes citées auparavant

L'intérêt des bond graphs pour la modélisation et le diagnostic des systèmes hybrides peut être résumé comme suit :

- Un seul outil de modélisation (bond graph) permettant de modéliser à la fois la partie continue et le changement du mode discret.

- Le diagnostic des défauts pour les systèmes dynamiques hybrides nécessitent à la fois les informations d'une part des états continus et d'autre part de l'évolution du mode discret. L'outil bond graph permet la modélisation à la fois de la partie continue et les composants discrets avec un seul modèle valable pour tous les modes.

- Le bond graph est utilisé comme un seul outil qui permet non seulement la modélisation mais aussi l'analyse, le diagnostic et le placement de capteurs pour les systèmes hybrides.

- Analyse des conditions de surveillabilité (aptitude à détecter et localiser les défauts) à partir du BGH et ce avant implémentation temps réel : un placement de capteurs peut alors être proposé pour satisfaire le cahier des charges.

- Les résidus obtenus systématiquement à partir du modèle bond graph hybride en utilisant les chemins causaux, permettent de décrire le comportement du système hybride à tous les modes de fonctionnement et fournissent un outil pratique pour déduire la détectabilité et l'isolabilité des fautes pour un système hybride.

- A l'aide des propriétés causales et structurelles de l'outil (BG), les problèmes de la robustesse aux incertitudes paramétriques et la sensibilité aux défauts des opérations de détection

et de localisation de défauts peuvent être abordés. Les incertitudes graphiques sont introduites graphiquement sur le modèle.

La majorité des travaux liés au diagnostic des systèmes hybrides à base de modèles bond graph hybride exploitent le concept de RRAG développé par *Low & al.* [33, 94, 176, 27] pour l'évaluation des résidus en mode normal et défaillant. Parmi ces travaux on trouve *Arogeti & al.* [28, 29, 30], *Low & al.* [31, 94], *Levy & al.* [32].

Dans [30], *Arogeti & al.* présentent une méthode de diagnostic, le but étant le développement d'une relation de redondance analytique globale (RRAG) à base du suivi du mode. La principale contribution dans le travail présenté dans [30], est la matrice de signature du changement du mode, sa dérivation à partir des RRAGs et son utilisation pour le suivi du mode. Le suivi du mode est utilisé pour déterminer le mode de fonctionnement instantané en utilisant les capteurs et l'information de l'entrée obtenu à partir du système hybride [30, 177].

Cette information du mode instantané permet aux utilisateurs d'évaluer les RRAs pour l'efficacité des résidus à tous les modes de fonctionnement. A l'aide de ces résidus, on peut détecter, isoler et estimer la taille d'un défaut. Le module de détection de défaut décide si un défaut est produit ou non lorsque l'un des signaux de résidu est non nul.

Pour ces paramètres isolables de défauts, les RRAGs génèrent un ensemble unique de résidu qui permet aux paramètres défectueux d'être identifiés. Pour les paramètres détectables mais non isolables, le module permet de sélectionner un ensemble de candidats de défauts potentiels.

Une méthode d'estimation de défauts à base de modèle bond graph hybride est développée dans le travail de *Low & al.* [31], afin d'estimer les paramètres défectueux. Cette technique d'estimation est formulée comme un problème de moindres carrés non linéaire et a pour but d'estimer les paramètres de défaut qui peuvent être linéaires ou paramétrés non linéaires pour accéder à l'état du système. Cette information peut également être utilisée pour améliorer le paramètre non-isolable. Cette méthode est capable d'estimer la valeur des paramètres de défauts d'un système hybride complexe même lorsqu'un changement de mode se produit après l'apparition du défaut, les résultats de simulations présentées dans ce travail [31] ont montré que les paramètres de défaut peuvent être estimés à l'aide de la technique proposée dans [31].

Dans [94], les auteurs présentent une méthode de diagnostic à base de modèles bond graph hybrides où certaines propriétés du BGH sont exploitées. Une procédure d'affectation de causalité séquentielle pour les systèmes hybrides et une technique d'approximation du modèle sont développées afin de trouver un modèle BGH avec une affectation de causalité souhaitable et acceptable conduisant à une description unifiée du comportement du système. Ces deux différentes techniques d'affectation de causalité sont appliquées à un système hybride hydraulique dans le but de trouver un modèle BGH du diagnostic appelé BGHD.

Un BGHD est un modèle BGH qui décrit le comportement du système hybride à tous les modes de fonctionnement basé sur un ensemble unifié d'affectation de causalité. La description unifiée de causalité du BGHD permet de contrôler le comportement du système hybride utilisant un seul ensemble unifié d'équations de contraintes.

1.10 Aperçu sur les travaux antérieurs à base de modèles bond graph hybride

Une méthode de diagnostic quantitative pour le diagnostic des systèmes hybrides est présentée par *Borutzky* [107], et appliquée sur des circuits de commutation standards utilisés dans les systèmes de l'électronique de puissance. L'auteur a montré qu'à travers sa méthode proposée, il peut obtenir les RRAs identiques à celles obtenus à partir d'un modèle BGH contenant des jonctions contrôlées développées dans [33] par *Low & al.*.

Aguilar-Justo & al. présentent dans [178] une méthode quantitative de détection et d'isolation de défauts appliquée à un onduleur en pont complet à base de modèles bond graph hybride à base de jonctions contrôlées, les (RRAGs) sont déduites.

Dans [179, 180], *Roychoudhury & al.* exploitent les propriétés des Bond Graph Hybrides (BGH) pour la simulation des systèmes dynamiques hybrides. Un logiciel pour la modélisation et la simulation des BGHs connu sous le nom « *MOdeling and Transformation of Hybrid bond graph models for Simulation* » est présenté dans [181].

Arogeti & al., présentent une méthode d'identification de modes pour les systèmes hybrides en présence de défaut [29]. La méthode est présentée comme un module d'un Bond Graph Hybride (BGH) dans le cadre d'un système de surveillance quantitative. Ce cadre utilise un concept appelées RRAGs, et intègre plusieurs étapes et modules. L'identification du mode du système hybride en présence de défauts est basée sur l'évaluation continue de tous les RRAs. L'ensemble des RRAs est généré à partir des RRAGs du système hybride. Les RRAGs dépendantes augmentent le nombre de RRAs dans l'ensemble des RRAs et améliore l'identification du mode. Dans le processus en ligne, les RRAs sont regroupées en quatre sous ensembles en fonction de leur certitude et cohérence. Les RRAs certaines représentent les contraintes de modèle uniquement des paramètres normaux et les RRAs incertaines sont probablement influencés par le défaut. Chaque sous ensemble des RRAs fournit différents types d'information, et l'information de tous les RRAs est fusionnée pour donner le résultat d'identification du mode. Le processus d'identification du mode est basé sur neuf règles de bases, et deux méthodes d'implémentation (parallèle et itérative) sont proposées. Les défauts paramétriques sont isolés par la matrice de signature de défaut globale.

La deuxième étape du travail de *Arogeti & al.*, présenté dans [29] consiste à estimer les paramètres de défauts, où la dimension du défaut est identifiée. L'estimation des paramètres des défauts est basée sur les données rassemblées à partir du système hybride lorsque le système présente des défauts, et son modèle dynamique est partiellement inconnu. La méthode présentée utilise la partie du modèle dynamique connue partiellement pour identifier les modes du système hybride en présence d'une faute paramétrique.

Dans [28], une méthode de diagnostic des défauts est appliquée sur un système de direction électro-hydraulique d'un véhicule électrique. Le système de direction et les défauts sont modélisés sous forme d'un système dynamique hybride par la technique de modélisation bond graph hybride (BGH) développée par *Mosterman et Biswas* [26], ensuite les RRAGs sont générées systématiquement à partir du modèle bond graph hybride du diagnostic (BGHD). La détection, l'isolation et l'estimation des défauts sont abordées. Enfin la méthode développée dans [28] est validée expérimentalement.

Dans le travail de *Levy & al.* [32], l'information du modèle bond graph hybride (BGH) et celle des systèmes à événement discret (SED) sont exploitées dans une méthode de diagnostic des défauts pour les systèmes hybrides. La détection du changement de mode et l'isolation sont traitées par la signature du changement de mode et la matrice de signature de changement de mode.

Dans une approche des systèmes à événement discret (SED), les états discrets et les défauts sont retrouvés en fonction des événements observables (exemple les signaux de commande) et les diagnostiqueurs. Sur la base des deux approches, un nouveau diagnostiqueur est présenté qui est entraîné à la fois par les événements observables et les indicateurs de cohérence générés par les résidus continus. La méthode proposée dans [32] permet non seulement le suivi efficace du mode du système, mais aussi décide si ce mode est défectueux ou normal. Enfin la méthode proposée est appliquée à un banc d'essai.

Mekki & al., présentent dans [182], deux techniques différentes de diagnostic pour les systèmes hybrides, une quantitative et une autre qualitative. La première est basée sur le modèle bond graph hybride et la génération des relations de redondances analytiques à partir du modèle bond graph hybride du diagnostic (BGHD).

La deuxième technique qualitative de diagnostic est basée sur le Graphe Causal Temporel (GCT), cette méthode est utilisée dans le but d'améliorer l'isolation des pannes, elle traite seulement les défauts paramétriques, par contre les bruits et la robustesse ne sont pas traités dans le diagnostic : seuls les défauts brusques sont considérés.

Bien que ces travaux présentent un diagnostic utilisant un seul outil (bond graph hybride) à la fois pour la modélisation et le diagnostic pour les systèmes hybrides, la robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques et de mesures n'est pas abordée.

1.11 Diagnostic robuste pour les systèmes hybrides

1.11.1 Définition 1 (Robustesse de détection) :

C'est la capacité de la méthode à détecter les défauts séparément des erreurs du modèle du système. C'est une forme particulière de la capacité à l'isolabilité. Dans la pratique, c'est un problème difficile à résoudre, étant donné que la structure d'un modèle est une approximation et ses paramètres ne sont connus qu'avec une certaine précision [47].

1.11.2 Définition 2 (Incertitudes paramétriques) :

C'est les incertitudes affectant les coefficients des matrices de la représentation d'état d'un système. Ce type d'incertitudes permet d'exprimer, d'un côté le caractère incertain des paramètres de modélisation et par ailleurs, l'encadrement de certains paramètres capable d'évoluer dans de fortes proportions. Les incertitudes sont classées en deux parties ; incertitudes paramétriques et de mesures [47].

Notre travail, s'intéresse à l'étude de la robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques.

Les variations aléatoires et la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques peuvent engendrer des dégradations des performances des algorithmes de diagnostic (fausses alarmes, non détection,...).

Plusieurs travaux ont été réalisés pour développer des méthodes de diagnostic robustes pour les systèmes dynamiques hybrides.

Dans [22], *Takrouni & al.*, développent une méthode de diagnostic robuste basée sur un observateur hybride constitué de deux parties ; la première partie a pour but d'identifier le mode actif permettant une détection de défauts et la deuxième partie effectue une estimation de l'état continu permettant une détection et isolation de défauts capteurs.

Une méthode robuste basée sur l'estimation d'erreurs est proposée dans [22] pour la détection du mode actif bruité ou l'évaluation des résidus est basée sur la norme L2 des résidus permettant de détecter le mode actif en présence de bruits de mesures et les incertitudes paramétriques. La méthode à base d'observateurs est réalisée avec la technique de placement de pôle.

Dans [25], *Ye Hu & al.*, présentent une méthode de surveillance et de détection de défauts pour une classe des systèmes hybrides modélisés par des systèmes non linéaires à commutation avec des défauts actionneurs de commande. Les dynamiques continues ainsi que les transitions du mode sont considérées incertaines. Une méthode de surveillance robuste hybride est développée à l'aide des outils de la théorie des observateurs à entrée inconnue et les résultats de la théorie de stabilité de Lyapounov. L'implémentation de la méthode de surveillance développée est illustrée à l'aide d'un modèle de simulation d'un réacteur chimique qui commute entre plusieurs modes de fonctionnement.

Une méthode robuste de détection et d'isolation de défauts pour les systèmes hybrides incertains avec des défauts structurés basée sur un observateur hybride incertain est présentée par *Wenhui Wang & al.* dans [23]. Deux observateurs sont utilisés ; le premier pour l'observation des modes et le deuxième pour l'estimation de l'état continu et la détection de transition de mode. Une méthode de diagnostic à base d'observateur hybride robuste pour une classe de systèmes hybrides non linéaires incertains avec des fonctions inconnues de transition de mode, des incertitudes du modèle et des perturbations inconnues est présentée par *Wenhui Wang, & al.* dans [183]. La robustesse aux fonctions inconnues de transition, aux incertitudes et aux perturbations inconnues est assurée par le découplage des perturbations et la sélection des seuils appropriés.

Belkhiat & al. présentent dans [24] une méthode de diagnostic à base d'observateur hybride

robuste pour les systèmes linéaires à commutation avec des entrées inconnues et les erreurs de modélisation. L'observateur est conçu pour la détection robuste des défauts sans connaître le mode actif. Le problème de la détection robuste des défauts a été considéré comme un rapprochement de modèle H_∞ standard, ensuite un compromis adéquat entre la robustesse aux entrées inconnues, la sensibilité des défauts obtenue à l'aide d'un indice de performance du H_∞ . Ce dernier est optimisé à l'aide d'une procédure itérative connue sous l'expression anglaise "Linear Matrix Inequality" (LMI).

La majorité de ces travaux cités ont besoin d'une pré-énumération de tous les modes possibles dans le système même si ces derniers sont apparus dans le fonctionnement.

Pour remédier à ce problème, certains travaux introduisent le formalisme de modélisation Bond Graph hybride (BGH)[26], ce dernier ne nécessitant pas l'énumération de tous les modes, ils sont construits au moment de l'exécution du système hybride.

Puisque les bond graphs définissent localement les commutations, par conséquent ils offrent une représentation concise du système hybride.

Il existe plusieurs travaux de diagnostic robustes à base de modèles. Parmi les plus connus, ceux qui utilisent le bond graph comme outil pour la modélisation. Cette représentation est basée sur le principe de transformation linéaire fractionnelle connue sous l'expression anglaise « Linear Fractional Transformation LFT » [184] appliquée au bond graph permettant ainsi la modélisation graphique des incertitudes. Le choix de la forme LFT pour la modélisation des incertitudes paramétriques avec les bond graphs permet l'utilisation d'un seul outil (bond graph) pour la génération des résidus et des seuils adaptatifs du fonctionnement normal et l'analyse de la sensibilité. Ces seuils sont utilisés afin d'éviter les fausses alarmes, les non-détections et pour l'amélioration de la procédure de décision de génération d'alarmes.

Cette approche de diagnostic robuste a été appliquée sur un générateur de vapeur [175, 48] et sur un système électromécanique [11] par *Djeziri & al.*.

L'application de la forme LFT est présentée aussi sur un système de mécanisme de levage dans [185] par *Ghoshal & al.*

La robustesse est réalisée pour l'étude d'incertitude structurelle et des seuils adaptatifs. Cette méthode est réalisée dans le même contexte des travaux réalisés par *Djeziri & al.* et *Kam Sié Casimir & al.* [48, 184, 9].

Une méthode de diagnostic robuste pour la détection et l'isolation des défauts pour les systèmes incertains est développée par *Bouallegue & al.* dans [186], les seuils sont générés à partir de l'analyse de la sensibilité des résidus pour les différents paramètres. Cette méthode est appliquée à un système de trois réservoirs.

1.12 Diagnostic robuste à base de modèle bond graph hybride

Ces dernières années, plusieurs travaux de diagnostic à base de modèles bond graph pour les systèmes hybrides ont été réalisés dans le but d'obtenir un diagnostic robuste à base de modèles bond graph, ces travaux ont le même objectif mais ils sont différents dans le formalisme de modélisation.

Dans les travaux de *Borutzky* [36] et [39], le but est d'obtenir une méthode de diagnostic robuste en présence d'incertitudes paramétriques afin d'éviter les fausses alarmes des défauts signalés. A cet effet, des seuils sont choisis d'une manière appropriée pour l'évaluation temporelle des résidus. Ce travail est basé sur le bond graph incrémental pour le diagnostic robuste des systèmes dynamiques hybrides afin d'établir les seuils pour les résidus qui prennent en compte les incertitudes paramétriques et les changements du mode discret. Cette approche concerne les modèles linéaires à commutation invariants est illustrée sur un exemple d'un circuit de convertisseur. Éléments bond graph R, C et I linéaire. L'idée principal du bond graph incrémental est basée sur le principe de la variation de l'effort ou le flux d'un composant bond graph par rapport à sa valeur nominale : $e(t) = en(t) + \Delta e(t)$. Le bond graph incrémental est alors obtenu en rajoutant dans la jonction cette variation de l'effort ou du flux apportée par l'incertitude. Enfin les résidus générés sont la différence entre les valeurs numériques de la jonction en mode nominal et en présence de fautes. Cette approche n'utilise pas la puissance du bond graph puisque les incertitudes ne sont pas directement associés aux éléments bond graph et les indicateurs de fautes ne sont pas générées systématiquement du modèle graphique hybride et ne représentent pas le système hybride global.

Une méthode de diagnostic robuste à base de modèles bond graph hybrides est donnée dans [40] développé par *Ghoshal & al.* ; la modélisation par pseudo bond graph est exploitée afin de modéliser le système hybride et la forme LFT est utilisée pour le test de la robustesse.

L'intérêt de l'utilisation de la forme LFT appliquée au bond graph permet de traiter le problème de la robustesse vis-à-vis les incertitudes paramétriques en introduisant ces incertitudes graphiquement sur le modèle. Ces incertitudes paramétriques sont introduites graphiquement sur le modèle et sont associées à un composant physique représenté par l'élément bond graph.

Dans le cadre de notre travail de thèse, notre contribution consiste à concevoir un diagnostic robuste à base de modèle bond graph hybride en utilisant les jonctions contrôlées pour les systèmes hybrides afin de détecter des défauts en présence d'incertitudes paramétriques en utilisant la forme LFT. Ces incertitudes paramétriques sont représentées sur le modèle bond graph hybride et les Relations de Redondance Analytiques Généralisées générées sont globales car elles tiennent compte de tous les modes de fonctionnement et elles sont robustes car elles tiennent compte des incertitudes paramétriques. Notre travail est l'extension des travaux développées par *Djeziri & al.* [174, 175, 11] aux systèmes dynamiques hybrides présentant un changement de mode.

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art des méthodes de diagnostic pour les systèmes dynamiques a été donné. Il a été conclu que la plupart des méthodes issues de la communauté des systèmes continus accordent une grande importance à la partie continue au détriment de la partie discrète et le même cas pour les méthodes issues de la communauté des systèmes discrets. Ainsi, des méthodes dites mixtes sont proposées afin de résoudre ce problème mais la robustesse n'est pas abordée. Par ailleurs, d'autres chercheurs ont opté pour les méthodes à base de modèle bond graph, comme le cas pour les systèmes continus, l'outil bond graph hybride permettant non seulement la modélisation des systèmes hybrides mais aussi une génération des résidus robustes, de plus, il permet (par rapport aux approches analytiques) de représenter l'ensemble des modes par un seul bond graph. Générer donc des indicateurs de fautes, valides pour tous les modes de fonctionnement d'un système hybride est original. Notre contribution consiste à utiliser les BGHs pour surveiller le système hybride avec un modèle valable pour tous les modes de fonctionnement capables de générer des RRAs généralisées globales pour détecter et isoler les fautes pour l'ensemble des modes. De plus ces RRAs générées du BGH sont robustes aux incertitudes paramétriques associées aux éléments bond graph décrits par des équations linéaires ou non linéaires. Sur la base de la littérature consultée, peu de travaux s'inscrivent dans ce contexte. Les travaux de *W. Borutzky* [36, 39] utilisent le bond graph incrémental pour des systèmes linéaires. Concernant le diagnostic, le résidu est la différence entre la valeur réelle et estimée fournie par l'évaluation de la loi de conservation des jonctions. Comme indiqué plus haut, les indicateurs de fautes ne sont pas générés systématiquement du modèle graphique hybride et ne représentent pas le système hybride global. et le travail de *S.K. Ghoshal & al.* [40] utilise le pseudo-bond graph pour la modélisation d'un système hybride thermo-fluide.

Chapitre 2

Modélisation des SDHs incertains par Bond Graph

Guide de lecture :

Ce deuxième chapitre est consacré à la modélisation des SDHs incertains décrits par des bond graphs de type LFT. La modélisation des incertitudes paramétriques par BG est développée. Enfin le formalisme des Bond Graphs Hybrides (BGH) avec les jonctions contrôlées pour la modélisation des changements discrets est présentée.

2.1 Introduction

Dans la conception de systèmes de diagnostic, l'étape de modélisation est une étape importante. Le BG a prouvé son efficacité comme un outil de modélisation depuis 1961 de systèmes multiphysiques. Plus tard il a été initialement (les années 90) utilisé pour l'analyse et la commande, le diagnostic des modèles déterministes (1995), et enfin le diagnostic robuste des systèmes complexes (2008) décrits par des bond graphs couplés mettant en jeu plusieurs formes d'énergie (thermique, hydraulique, chimique) couplés introduisant des non linéarités fortes. Dans ce travail, l'outil BG est utilisé pour la modélisation des SDHs incertains en tenant compte des incertitudes paramétriques du modèle introduites dans un modèle BG sous forme LFT. L'utilisation de la forme LFT permet la représentation de ces incertitudes graphiquement et directement sur les éléments physiques du modèle BG. Cette forme LFT sera étendue à la modélisation des incertitudes paramétriques pour les SDHs.

2.2 Modélisation des systèmes dynamiques par Bond Graph

2.2.1 Langage de modélisation Bond Graph

Le BG (graphe à lien) est un outil de modélisation multi-physique basé sur l'analogie et l'échange de puissance énergétique capable de modéliser avec un seul langage les systèmes, indépendamment de leur nature physique. Cet aspect de modélisation a fait l'objet de plusieurs publications [187, 188, 189]. Plusieurs ouvrages peuvent être consultés dans la littérature sur la théorie des BGs [190, 173] et des applications dans différents domaines ; la mécanique [188], l'électronique de puissance [191], génie énergétique [187], et génie chimique [190].

L'outil BG a été initialement utilisé pour la modélisation des systèmes physiques. L'idée d'utiliser une seule représentation (le bond graph) pour la modélisation, l'analyse et la synthèse de lois de commande en exploitant les propriétés causales et structurelles du modèle graphique a été développée vers les années 90 pour la détermination des conditions de commandabilité et d'observabilité structurelles sans calcul analytique complexe [192].

L'outil BG est un outil de modélisation basé sur deux grands principes :

1. La représentation graphique des échanges de puissance au sein d'un système.
2. L'analogie entre les variables de différents domaines physiques.

L'échange de puissance entre deux éléments d'un système est représenté comme indiqué la FIGURE 2.1 (a) par une demi flèche appelée *lien* ou *bond* qui porte deux variables dites **variables de puissance**, appelées *effort* et *flux* et dont le produit représente la puissance instantanée transportée par ce lien. Le sens de la demi flèche montre le sens de la puissance échangée .

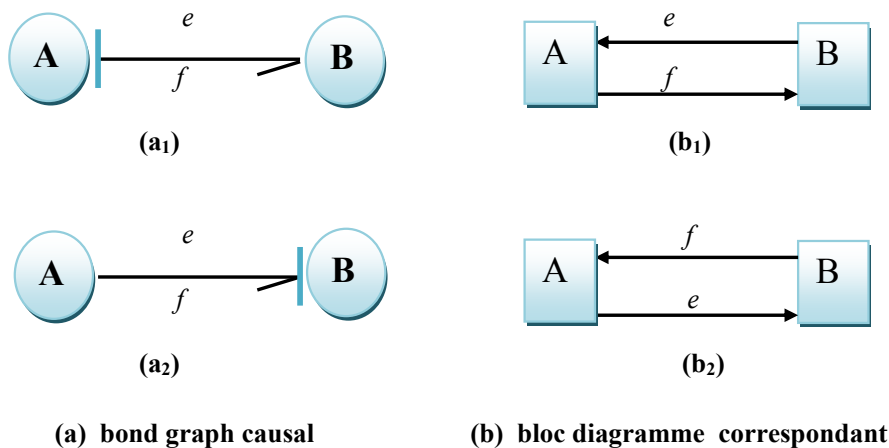


FIGURE 2.1 – Modèle bond graph causal et bloc diagramme

2.2.2 La causalité dans les bond graphs

En plus de l'aspect énergétique de l'outil BG, il possède des propriétés causales importantes pour l'analyse des systèmes de surveillance. La causalité représentée sur le BG à l'aide d'un *trait causal* placé perpendiculaire à la demi-flèche, permet la visualisation, au sens schéma bloc, des relations de **cause à effet**, ou **entrée-sortie** ou **donnée-inconnue**. *La causalité* (indiquée par le trait causal) permet donc d'écrire les équations d'une manière systématique, détecter les incohérences dans les equations et enfin, parcourir le BG comme un graphe.

La convention du placement du trait causal est la suivante : le trait causal est placé près de l'élément pour lequel l'effort est une donnée, et loin de l'élément pour lequel le flux est connu FIGURE 2.1 (b) [47].

2.2.3 Éléments de base des bond graphs

Dans le but de représenter tous les phénomènes d'apport de puissance et de transformation de puissance fournie en énergie stockée ou dissipée, éléments bon graph (plus 2 détecteurs d'effort De et de flux Df) qui représentent des capteurs d'effort (de flux) respectivement supposés idéaux, (non consommateurs de puissance) sont définis et représentés dans le tableau 2.1 ci-dessous.

L'échange de puissance énergétique en BG est représenté par une demi-flèche et l'échange de l'information (issue d'un capteur ou d'un contrôleur) est modélisé par une flèche.

2.3 Bond Graph Hybride (BGH)

Les jonctions Bond graph standards

Définition

La modélisation par BG est basée sur la représentation par un lien de puissance avec des éléments agissant entre ces variables et jonctions. Les éléments BGs R, C, I sont connectés à l'aide des jonctions 0 lorsque les ports interconnectés ont un effort commun et par une jonction 1 lorsque ces ports sont soumis à même flux.

La représentation BG des jonctions 0 et 1 est donnée par la FIGURE 2.2 :

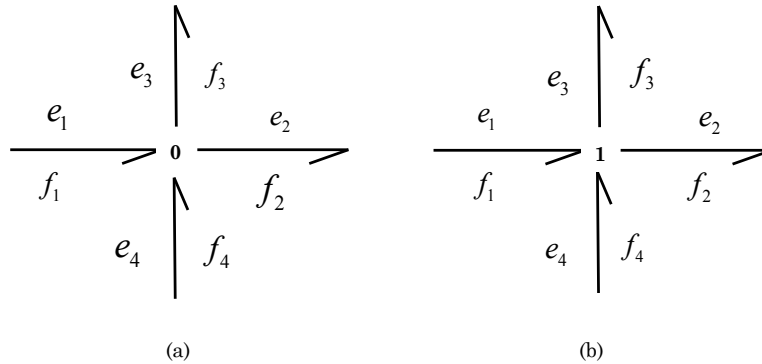


FIGURE 2.2 – Jonctions 0,1 dans les bond graphs

Les équations déduites des jonctions sont appelées *equations structurelles* : elles représentent un ensemble de lois de conservation d'énergie et/ou equations d'équilibres.

Dans toutes les jonctions on a une conservation d'énergie, qui peut être exprimée comme suit :

$$\sum_{i=1}^n e_i f_i = 0 \quad (2.1)$$

Où n est le nombre de ports et \sum est la somme algébrique. Le signe est pris (+) lorsque la direction de la puissance est orientée vers la jonction et (-) lorsqu'elle est orientée vers l'extérieur.

Pour le BG de la FIGURE 2.2, deux liens entrent dans la jonction (le lien 1 et 4) et deux liens sortent de la jonction (le lien 2 et 3), donnant ainsi la loi de conservation :

TABLE 2.1 – Éléments du langage bond graph

Eléments	Représentation	Equation constitutive	Désignation
Sources	$\text{Se} : e \begin{array}{c} \longrightarrow \\ f \end{array}$	$\left\{ \begin{array}{l} e(t) \text{ imposé par la source} \\ f(t) \text{ arbitraire} \end{array} \right.$	Source d'effort
	$\text{Sf} : f \begin{array}{c} \longrightarrow \\ e \end{array}$		$\left\{ \begin{array}{l} f(t) \text{ imposé par la source} \\ e(t) \text{ arbitraire} \end{array} \right.$
Eléments passifs Dissipation D'énergie	$\begin{array}{c} e \\ \longrightarrow \\ f \end{array} \text{ R}$	$\Phi_R(e, f) = 0$	Resistance
	$\begin{array}{c} e \\ \longrightarrow \\ f \end{array} \text{ C}$	$\Phi_C(e, \int f dt) = 0$	Capacité
	$\begin{array}{c} e \\ \longrightarrow \\ f \end{array} \text{ I}$	$\Phi_I(f, \int e dt) = 0$	Inertie
Jonctions Transformateurs	$\begin{array}{ccc} e_1 & \text{TF} & e_2 \\ \longrightarrow & : m & \longrightarrow \\ f_1 & & f_2 \end{array}$	$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{array} \right.$	Transformateur
	$\begin{array}{ccc} e_1 & \text{GY} & e_2 \\ \longrightarrow & : r & \longrightarrow \\ f_1 & & f_2 \end{array}$		$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \end{array} \right.$
	$\begin{array}{ccc} f_3 \downarrow e_3 & & \\ \longrightarrow & 0 & \longrightarrow \\ e_1 & & e_2 \\ f_1 & & f_2 \\ f_3 \downarrow e_3 & & \\ \longrightarrow & 1 & \longrightarrow \\ e_1 & & e_2 \\ f_1 & & f_2 \end{array}$	$\left\{ \begin{array}{l} e_1 = e_2 = e_3 \\ f_1 - f_2 + f_3 = 0 \end{array} \right.$	Jonction « zéro » : même effort
$\begin{array}{ccc} f_3 \downarrow e_3 & & \\ \longrightarrow & 1 & \longrightarrow \\ e_1 & & e_2 \\ f_1 & & f_2 \end{array}$	$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = f_2 = f_3 \\ e_1 - e_2 + e_3 = 0 \end{array} \right.$	Jonction « un » : même flux	
Capteurs	$\begin{array}{c} e \\ \longrightarrow \\ f=0 \end{array} \text{ De} : e$	$\left\{ \begin{array}{l} e = e(t) \\ f = 0 \end{array} \right.$	Détecteurs de flux (Df) et d'effort (De)
	$\begin{array}{c} e=0 \\ \longrightarrow \\ f \end{array} \text{ Df} : f$		

$$e_1 f_1 + e_4 f_4 - e_2 f_2 - e_3 f_3 = 0 \quad (2.2)$$

Pour la jonction 0 (effort commun), l'équation constitutive est décrite par la FIGURE 2.2 (a) et qui peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{cases} f_1 + f_4 - f_2 - f_3 = 0 \\ e_1 = e_2 = e_3 = e_4 = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Pour la jonction 1 (flux commun), l'équation constitutive est décrite par la FIGURE 2.2 (b) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{cases} e_1 + e_4 - e_2 - e_3 = 0 \\ f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Où les flux de tous les liens sont identiques et la somme algébrique des efforts est égale à zéro.

Les jonctions contrôlées

Définition

Les BGHs sont basés sur des jonctions dites *contrôlées*. Une jonction contrôlée a deux états discrets (ON,OFF). A l'état ON, la jonction contrôlée se comporte comme une jonction standard $\{0,1\}$. Par contre, pour une jonction de type 1 à l'état OFF elle impose un flux nul à tous les liens adjacents à la jonction contrôlée. Pour une jonction de type 0, elle annule tous les efforts des liens adjacents à cette jonction contrôlée.

Le principe de fonctionnement d'une jonction contrôlée de type 1 est illustré par la FIGURE 2.3, avec X représentant un élément BG.

Les BGHs étendent la modélisation des BGs par l'incorporation des jonctions contrôlées afin de permettre au SDH d'être modélisé à l'aide des composants BGs. Par conséquent, les systèmes hybrides peuvent être représentés par les BGHs d'une manière compacte.

La FIGURE 2.4 présente un exemple d'un système hybride, où un circuit électrique est donné. Le circuit est composé d'une source V_{in} , une induction L_1 , une résistance R_1 , une capacité C_1 et d'un interrupteur Sw . Ce dernier est utilisé pour contrôler l'état ON/OFF du système hybride.

Le modèle BGH acausal du circuit électrique est présenté à la FIGURE 2.5, où la jonction 1_C indique la jonction contrôlée pour représenter les deux états de l'interrupteur. A l'état ON, la jonction contrôlée 1_C se comporte comme une jonction 1 standard comme montré en FIGURE 2.6. A l'état OFF représenté par la FIGURE 2.7, elle impose un flux nul à tous les liens adjacents, ces liens sont marqués en pointillés. On remarque bien que l'état OFF pose une forme de causalité invalide à la jonction contrôlée ; pour remédier à ce problème de conflit de causalité, plusieurs propriétés ont été formulées. Le paragraphe suivant présente les principales propriétés et règles d'affectation des causalités pour les modèles bond graphs hybrides [46].

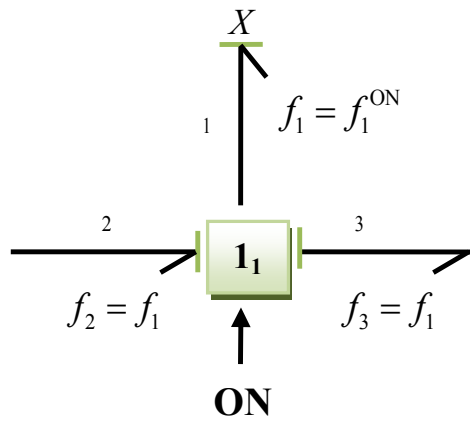
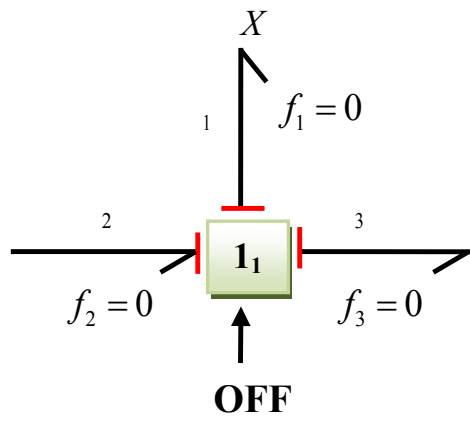


FIGURE 2.3 – Fonctionnement d'une jonction contrôlée de type 1

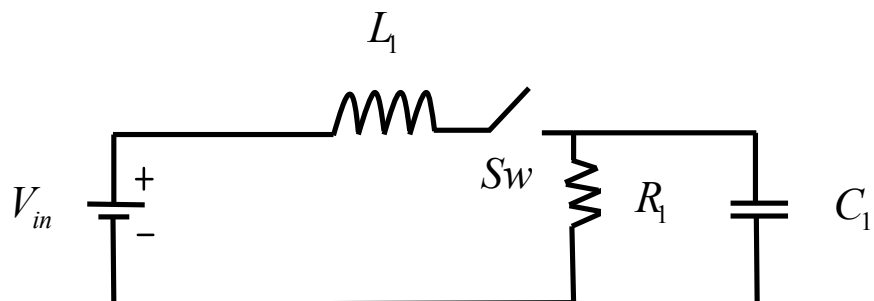


FIGURE 2.4 – Exemple d'un système hybride : Circuit électrique

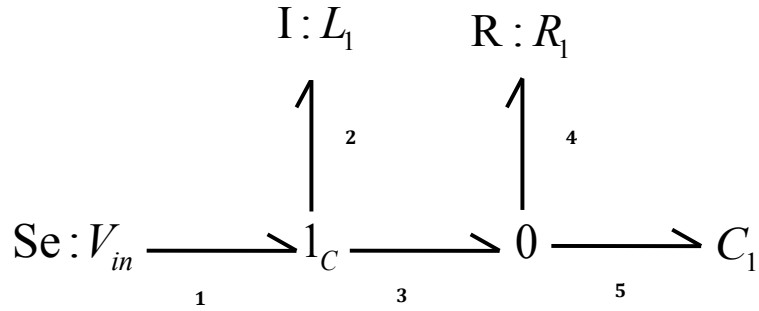


FIGURE 2.5 – Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique

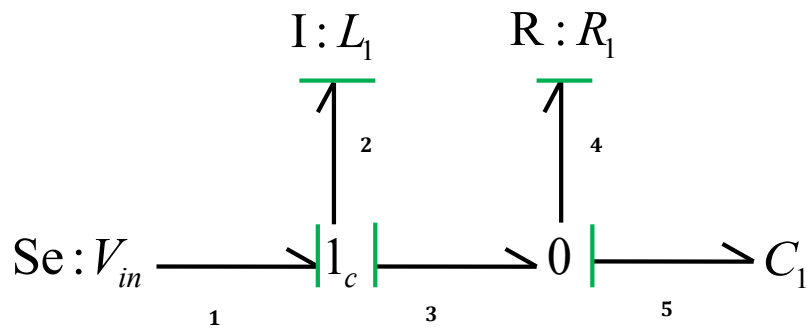


FIGURE 2.6 – Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique à l'état ON

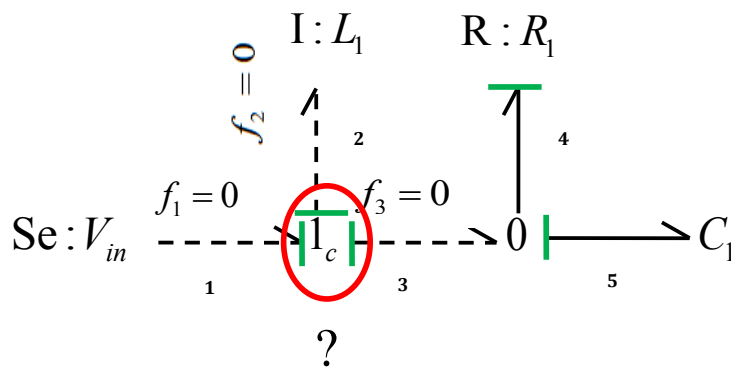


FIGURE 2.7 – Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique à l'état OFF

2.3.1 Propriétés causales des bond graphs hybrides

Les BGHs utilisent des jonctions contrôlées pour la modélisation des SDHs, cependant, les changements dans la configuration à travers les différents modes de fonctionnement du système peuvent entraîner une nécessité d'affectation de la causalité du BGH.

Dans [179], les propriétés des BGHs sont étudiés par *Roychoudhury & al.* afin qu'ils puissent être utilisés d'une manière efficace pour la simulation des SDHs. Un algorithme d'attribution de causalité pour les SDHs est développé pour réaffecter la causalité d'une manière incrémentale après les changements du mode à partir de la jonction affectée directement par la commutation. Dans [180] l'algorithme a été amélioré.

Afin d'exploiter les informations des BGHs, il est souhaitable de disposer d'une description de causalité cohérente (uniforme) pour le système hybride à tous les modes. Cette description de causalité cohérente élimine la nécessité de la ré-affectation de la causalité ce qui conduit à la dérivation des relations de contraintes unifiées. Un exemple d'un circuit électrique hybride est donné en FIGURE 2.8(a) avec deux modes. Le mode est déterminé par l'état de l'interrupteur électrique comme montré à la FIGURE 2.8. On obtient alors deux modèles BGH avec des affectations de causalité différentes.

Tous les liens et les composants bond graph du BGH sont énumérés. Le lien de la flèche complète signifie qu'un signal de flux se produit essentiellement au flux zéro. Sur les figures, les liens actifs sont représentés par des traits pleins tandis que les liens inactifs sont représentés par des tirets en pointillés. Les liens actifs se réfèrent aux liens qui ne sont pas désactivés par un état OFF de la jonction contrôlée (FIGURE 2.8 (b))

La FIGURE 2.8 (b) décrit les trois liens inactifs à l'état OFF de la jonction contrôlée 1_C . Les liens inactifs causent une causalité invalide à la jonction 0 ce qui conduit à une causalité invalide du BGH à l'état OFF. Cette causalité invalide entrave la génération des équations de contraintes au mode OFF et le problème est significatif pour les systèmes complexes qui contiennent plusieurs jonctions contrôlées.

Le même modèle BGH avec une autre affectation de causalité représenté par la FIGURE 2.9 ; dans cette figure, les liens inactifs pendant l'état OFF de la jonction contrôlée 1_C ne posent pas de causalité invalide pour les composants BGs actifs. Par exemple, la jonction 0 conserve une causalité valide lorsque le lien 3 est désactivé.

D'après cette observation, il est remarqué qu'il est possible de décrire le comportement d'un système hybride basé sur l'affectation de la causalité unifiée où les causalités de tous les liens actifs sont cohérentes et la causalité est valide à tous les modes.

La FIGURE 2.10 représente une jonction contrôlée de type 1 associée avec une jonction 0. Le trait de causalité du lien 3 indique que l'effort e_3 est la variable de sortie de la jonction 1_C et qui est aussi une variable d'entrée de la jonction 0 . f_3 est la variable de sortie de la jonction 0 et imposée à la jonction 1_C .

Si la jonction contrôlée est à l'état OFF (qui signifie que tous les flux adjacents sont nuls y compris f_3), la causalité de la jonction 0 devient invalide. Ce comportement est dû à l'état OFF de la jonction contrôlée 1_C , qui conduit la variable de sortie de la jonction 0 à être indéfinie.

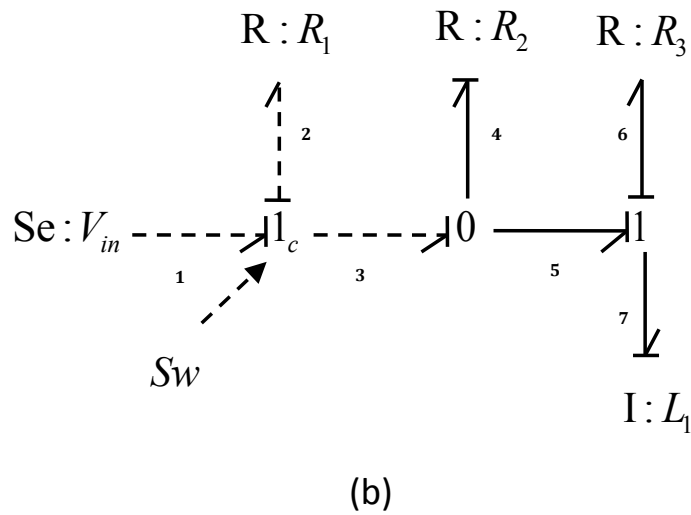
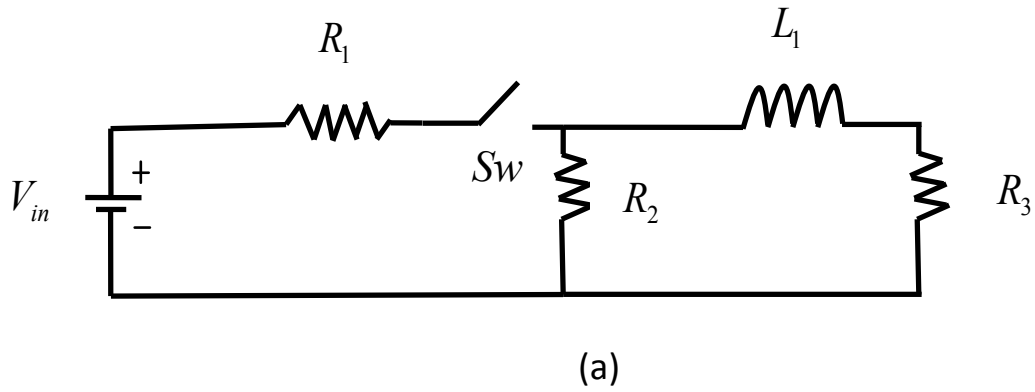


FIGURE 2.8 – (a) Circuit électrique à l'État OFF (b) Modèle BGH équivalent du circuit avec attribution de causalité lorsque le commutateur et à l'État OFF.

De même, ce comportement est appliqué à une jonction contrôlée de type 0 comme le montre la FIGURE 2.11. Des propriétés sont énoncées pour ce type de comportement par *Wang, Danwei & al.* [46].

Propriété 2.1

Considérons une jonction contrôlée reliée d'une manière adjacente à une jonction normale (standard) de type 0, 1. Si la variable de sortie de la jonction contrôlée est une variable d'entrée de la jonction normale, alors l'état OFF de la jonction contrôlée pose une forme de causalité invalide à la jonction normale.

Dans le langage BGH, tous les composants de 1 port qui sont connectés d'une manière adjacente à une jonction contrôlée sont déconnectés à partir du graphe restant lorsque la jonction est à l'état OFF (c'est-à-dire, leur lien unique est désactivé). Par conséquent, la considération de la validité causale d'un composant de 1 port n'est pas requise.

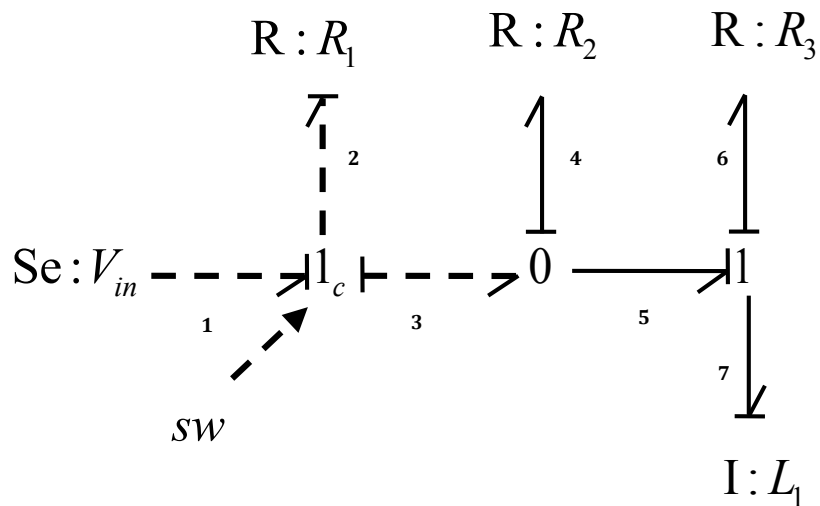


FIGURE 2.9 – Modèle BGH avec attribution de causalité alternée lorsque le commutateur est à l'état OFF

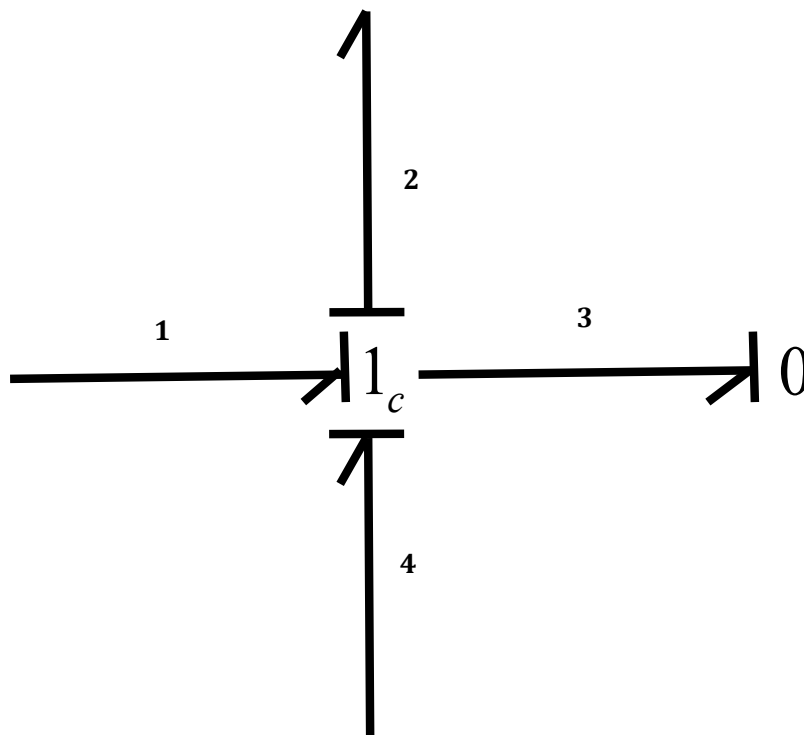


FIGURE 2.10 – Jonction contrôlée de type 1 connectée avec une jonction 0

La propriété 2.1 fournit une condition de causalité sur les jonctions contrôlées qui est nécessaire pour être évitée lors de l'affectation (attribution) de la causalité du BGH.

En plus de la propriété 2.1, une autre condition consiste à ce que l'État OFF de la jonc-

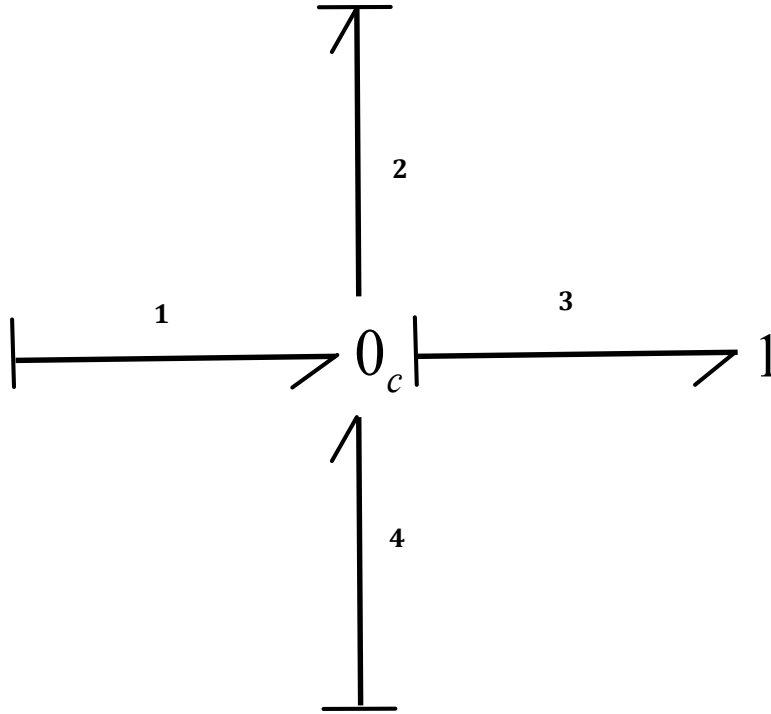


FIGURE 2.11 – Jonction contrôlée de type 0 connectée avec une jonction 1

tion contrôlée ne pose aucune forme de causalité invalide au BGH. Une telle condition peut être énoncée comme suit :

Propriété 2.2

Si la variable de sortie de la jonction contrôlée est une variable d'entrée d'un composant 1 port (R, C, I), alors l'état OFF de la jonction contrôlée ne pose aucune forme de causalité invalide au BGH.

Les cas suivants sont considérés afin de montrer cette propriété :

- (1) Une jonction contrôlée qui est connectée d'une manière adjacente à une jonction normale ; et
- (2) une jonction contrôlée qui est connectée d'une manière adjacente à un élément deux ports.

En premier lieu, le premier cas est considéré : dans le langage BG, toutes deux jonctions de même type (0 ou 1) connectées d'une manière adjacente peuvent être fusionnées en une seule jonction. Par conséquent, il est supposé que toute jonction qui est connectée d'une manière adjacente à une jonction contrôlée de type 0 est une jonction 1.

A partir des règles de la causalité, si la variable de sortie d'une jonction contrôlée de type 0 est une variable d'entrée d'un composant à 1 port (donc ce lien est le lien dit déterminant), alors la variable de sortie de la jonction 1 ne peut pas être une variable du lien qui relie les

deux jonctions. Par conséquent, la variable de sortie de la jonction 1 est toujours bien définie, c'est-à-dire, la jonction 1 à toujours une forme de causalité valide même lorsque la jonction contrôlée de type 0 est à l'état OFF.

A priori, le deuxième cas est considéré : la jonction contrôlée est connectée d'une manière adjacente à un composant à 2 ports (gyrateur GY ou transformateur TF). Les règles de causalité du composant de 2 ports implique que lorsque la jonction contrôlée de type 0 est à l'état OFF, elle impose un effort nul à l'entrée de l'effort du composant de 2 ports (c'est-à-dire, l'entrée du côté de l'entrée de la jonction contrôlée) et la relation constitutive du composant à 2 ports reste valide. Cette validité des relations constitutives des 2 ports implique que le composant a une forme de causalité valide même lorsque la jonction contrôlée est éteinte (état OFF). Par conséquent, l'état OFF de la jonction contrôlée ne pose aucune forme de causalité invalide au BGH. Le même argument est valable pour le cas de la jonction contrôlée de type 1.

La propriété 2.2 indique alors une condition suffisante pour une causalité des jonctions contrôlées qui ne cause pas une forme de causalité invalide au BGH lorsque la jonction est à l'état OFF. Une conséquence primordiale de cette condition suffisante est que, si les causalités de toutes les jonctions contrôlées sont affectées de manière à ce que toutes les variables de sortie sont des entrées de certains composants de 1 port, alors, tous les liens actifs conservent leurs formes de causalité et la causalité du graphe est valable à tous les modes de fonctionnement.

Une propriété intuitive peut être utile dans un cas particulier et est présentée comme suit :

Propriété 2.3

Considérons deux jonctions contrôlées connectées d'une manière adjacente et qui ont les mêmes états à tous les modes de fonctionnement. Si une des variables d'entrée des jonctions contrôlées est une variable d'entrée de l'autre jonction contrôlée, alors les états OFF des jonctions contrôlées ne posent aucune forme de causalité invalide au modèle BGH.

La propriété 2.3 est simple et donnée comme suit : si la variable de sortie des deux jonctions contrôlées n'est pas une variable d'entrée des jonctions BG standards adjacentes, alors l'état OFF ne pose aucune forme de causalité invalide au modèle BGH.

Puisque les deux jonctions sont à l'état OFF, alors il n'y aura aucune forme invalide sur ces deux jonctions.

2.3.2 Affectation de la causalité pour les BGHs

La représentation d'un modèle hybride à l'aide d'un BG avec les causalités indépendantes du mode du système présente l'avantage qu'un ensemble unique d'équations valables à tous les modes peut être obtenu à partir du modèle BG. Les variables d'état du commutateur discret dans ces équations représentent les modes. Dans ce présent travail, cette représentation BG est utilisée afin d'obtenir les RRAs globales (RRAGs) à partir du modèle BGH, l'évaluation numérique de ces relations RRAGs conduit aux résidus ou indicateurs de défaut.

Afin d'exploiter les informations d'un BGH pour la détection et l'isolation des défauts, il est souhaitable d'avoir une description de causalité uniforme pour tous le système hybride à tous les modes de fonctionnement. Cette description uniforme de causalité facilite la conception d'algorithme FDI en éliminant la nécessité de la réaffectation de causalité ce qui entraîne la dérivation des relations de contraintes unifiées.

La modélisation BGH est utilisée dans le but de concevoir un système de diagnostic, par consé-

quent, il est désirable que tous les composants de stockage (C, I) du modèle BGH soient en causalité dérivée préférentielle étant donné que les équations RRAGs dérivées fondées sur la causalité dérivée sont libres de l'état initial qui est généralement inconnu dans les systèmes réels.

D'après les propriétés citées ci-dessus ; une jonction contrôlée est dite en causalité préférentielle si la variable de sortie des jonctions est une variable d'entrée des éléments suivants : un composant de 1 port (R, C ou I), un élément de source si la source est nulle lorsque la jonction est à l'état OFF, une autre jonction contrôlée de type différent qui partage l'état identique [46].

Pour un BGH donné acausal (Modèle BGH sans affectation de causalité), il est souhaitable d'affecter une causalité au BGH de telle sorte que toutes les jonctions contrôlées soient en causalité préférées.

Dans le cas du modèle de comportement, il est souhaitable que tous les éléments de stockage (C et I) du BGH soient en causalité intégrale étant donné que la causalité intégrale est recommandé (exigée) pour la simulation d'ingénierie pour la fiabilité de la formulation.

Algorithmes d'affectation de causalité pour les SDHs

Un modèle BGH avec une affectation de causalité appropriée est appelé modèle BG du diagnostic BGHD. Un BGHD est un BGH avec une affectation de causalité telles que toutes les jonctions contrôlées et composants de stockage soient affectés en causalité préférentielle. Cette condition utile, puisque la causalité cohérente du modèle constitue un moyen pratique (utile) pour la description du comportement du SDH à tous les modes de fonctionnement, il est utile de concevoir des algorithmes de diagnostic FDI basés sur un modèle BGHD. Dans la littérature, il existe deux algorithmes d'affectation de causalité pour les SDHs dans le but d'obtenir le modèle BGHD [94] : (1) L'algorithme d'affectation de causalité pour les systèmes hybrides (SCAPHD) permettant l'inversion des causalités des capteurs et (2) l'algorithme d'affectation de causalité pour les systèmes hybrides (SCAPHD) avec approximation du modèle (MA).

Dans le but d'obtenir le BGHD, l'algorithme SCAPHD étend l'algorithme SCAP classique (pour les systèmes continus) par l'introduction du concept de causalité préférentielle pour les jonctions contrôlées

1. L'algorithme d'affectation de causalité pour les systèmes hybrides (SCAPHD) permettant l'inversion des causalités des capteurs ; Une procédure systématique appelée procédure d'affectation de causalité séquentielle pour les SDHs connue sous l'expression anglaise : « Sequential Causality Assignment Procedure for Hybrid Systems (SCAPH) » pour les SDHs est présentée par *Wang, Danwei & al.* dans [46] et donnée comme suit :
 - (a) Choisir une jonction contrôlée qui n'a aucune source connectée d'une manière adjacente, et affecter la jonction avec la causalité préférentielle.
 - (b) Répétez l'étape 1 jusqu'à ce que toutes les jonctions contrôlées qui ne sont pas reliés avec des sources soient correctement assignées causalement.

- (c) Choisir toute jonction contrôlée restante qui a une source reliée à la jonction. Pour la paire $\{Se, 1_C\}$ ou $\{Sf, 0_C\}$, la variable de sortie de la jonction contrôlée ne doit pas être une variable d'entrée d'une jonction $\{0, 1\}$. Pour la paire $\{Sf, 1_C\}$ ou $\{Se, 0_C\}$, la variable de sortie de la jonction contrôlée doit être une variable d'entrée de la source connectée .
 - (d) Répétez l'étape 3 jusqu'à ce que toutes les jonctions contrôlées soient affectées, après cette étape. Les jonctions contrôlées sont considérées comme étant des jonctions normales $\{0, 1\}$ dans les procédures suivantes,
 - (e) Choisir un élément de source restant et lui affecter une causalité, étendre les implications de causalité à travers le BGH en utilisant les éléments de contraintes $\{0, 1, TF, GY\}$
 - (f) Choisissez un élément de source restant et lui affecter une causalité, étendre les implications de causalité à travers le BGH en utilisant les éléments de contraintes $\{0, 1, TF, GY\}$
 - (g) Répétez l'étape 5 jusqu'à ce que toutes causalités des sources soient affectées,
 - (h) Choisir l'un des composants de stockage et lui affectez une causalité intégrale. Étendre ensuite les implications de causalité à travers le BGH en utilisant les éléments de contraintes $\{0, 1, TF, GY\}$.
 - (i) Répétez l'étape (7) jusqu'à ce qu'à tous les composants de stockages soient attribués avec une causalité cohérente.
 - (j) Choisir tout élément (composant) R non affecté et lui affectez une causalité. Étendre ensuite les implications de causalité,
 - (k) Répétez l'étape 9 jusqu'à ce que tous les liens restants soient affectés par une causalité correcte.
2. L'algorithme d'affectation de causalité pour les systèmes hybrides (SCAPHD) avec approximation du modèle (MA) ; dans la modélisation BG, un composant R ne possède pas une causalité préférentielle, cette propriété suggère qu'un composant R facilite l'affectation de la causalité pour un BGH donné. Cependant, le nombre de composants R est fixé dans un système physique.

Dans [94], une technique d'approximation est présentée permettant à l'utilisateur d'augmenter le nombre total des composants R dans le graphe dans le but de faciliter l'obtention du BGHD.

La procédure combinant la méthode d'approximation avec l'algorithme SCAPHD est résumée dans les étapes suivantes [94] :

Un système physique est approximé par l'ajout des résistances (composants R) au modèle tout en gardant le comportement physique du système [46]

- (a) Ajouter un élément R_s à chaque jonction du capteur du BGH
- (b) Appliquer l'algorithme SCAPHD pour l'affectation de causalité du modèle BGH approximé
- (c) Éliminer chaque élément R_s qui est dans la causalité indifférente (en causalité résistance ou conductance)

Des composants R_s additionnels peuvent être obtenus en ajoutant plusieurs capteurs dans le système. Cela implique que par l'ajout de plusieurs capteurs au système, l'utilisateur est capable d'obtenir un modèle BGHD lorsque la procédure ne peut pas obtenir le BGHD à partir du modèle BGH initial [46].

2.4 Modélisation des incertitudes paramétriques par bond graph pour les SDHs

Dans l'étape du diagnostic des systèmes incertains, il est nécessaire de tenir compte des incertitudes dans l'étape de modélisation ce qui permet l'amélioration de la robustesse du système du diagnostic. Le principal avantage de l'utilisation de la modélisation par BG pour les systèmes incertains est la possibilité de représenter les incertitudes paramétriques directement associées avec les éléments BGs [11, 8, 44].

La forme LFT est utilisée afin d'améliorer la robustesse de détection dans l'étape de décision dans les algorithmes de détection des défauts.

2.4.1 Modélisation des incertitudes paramétriques par Bond Graph

1. Transformation Linéaire Fractionnelle (LFT)

La Transformation Linéaire Fractionnelle a été introduite par *Redheffer* en 1960 [6] et a été adaptée aux modèles BG par *Dauphin -Tanguy* en 1999 [7]

La forme LFT représentée en FIGURE 2.12 est très utilisée pour la modélisation des systèmes incertains.

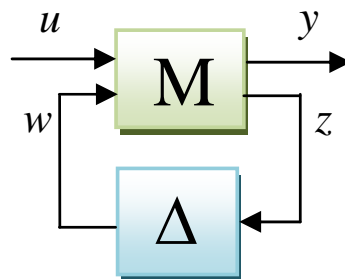


FIGURE 2.12 – Représentation LFT

Les valeurs nominales sont regroupées dans une matrice augmentée notée par M , supposée être propre et toutes les incertitudes (structurées et non structurées, bruits de mesures, etc.) sont regroupées dans une matrice Δ avec une structure diagonale. Elle est utilisée

pour l'analyse de la stabilité et pour la synthèse de loi de commande en utilisant le principe de la μ -analyse et les principes de synthèse, par la séparation de la partie nominale du modèle de sa partie incertaine comme montré à la FIGURE 2.12 (Représentation LFT).

Généralement, dans le cas linéaire, cette forme standard conduit à une représentation d'état de la forme suivante (Équation 2.5) :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \\ z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{cases} \quad (2.5)$$

Où $x \in R^n$ est le vecteur d'état du système, $u \in R^m$ représente le vecteur regroupant les entrées de commande du système, $y \in R^p$; vecteur regroupant les sorties mesurées du système, $w \in R^l$ et $z \in R^l$ regroupent respectivement les entrées et les sorties auxiliaires et n, m, l et p sont des nombres entiers positifs.

$A_1, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}$ et D_{22} sont des matrices de dimensions appropriées .

Dans le cas des systèmes complexes, généralement, la matrice Δ est supposée bornée, ce qui cause une difficulté dans l'obtention de l'équation (2.5).

2. Modélisation LFT des éléments bond graphs

Une incertitude sur un paramètre de valeur θ peut être introduite sous une forme additive

$$\theta = \theta_n + \Delta\theta \quad (2.6)$$

ou sous forme multiplicative

$$\theta = \theta_n \cdot (1 + \delta_\theta) \quad (2.7)$$

Où $\Delta\theta$ et $\delta_\theta = \frac{\Delta\theta}{\theta_n}$ représentent respectivement, les déviations absolues et relatives par rapport à la valeur nominale du paramètre θ_n .

La modélisation des éléments BGs (R, I, C, TF, GY) sous la forme LFT consiste à décomposer la partie nominale ($R_n, I_n, C_n, TF_n, GY_n$) de sa partie incertaine ($\delta(\delta_R \cdot R_n, \delta_I \cdot I_n, \delta_C \cdot C_n, \delta_{TF} \cdot TF_n, \delta_{GY} \cdot GY_n)$) avec δ étant une incertitude multiplicative sur le paramètre associé.

Considérons un élément R linéaire en causalité résistance (flux imposé). La loi caractéristique correspondante à un élément R dans le cas linéaire (cf. FIGURE 2.13) est donnée comme suit :

$$e_R = R \cdot f_R \quad (2.8)$$

Dans le cas d'incertitudes sur le paramètre R , l'équation (2.8) devient alors (equation 2.9) :

$$e_R = R_n \cdot (1 + \delta_R) \cdot f_R = R_n \cdot f_R + \delta_R \cdot R_n \cdot f_R = e_{R_n} + e_{R_{inc}} = e_{R_n} + w_R \quad (2.9)$$

L'équation constitutive (2.9) peut être représentée par un BG-LFT d'un élément R incertain comme montrée par la FIGURE 2.13 (b). L'introduction d'une source modulée MSe associée avec l'entrée auxiliaire w_R et un capteur d'effort virtuel associé à la partie auxiliaire z_R permet de représenter graphiquement l'incertitude.

$z_R = R_n \cdot f_R$, R_n , $\delta_R = \frac{\Delta R}{R_n}$, ΔR , e_R et f_R représentent respectivement la valeur de l'effort nominale, la valeur du paramètre nominale, l'incertitude multiplicative, l'incertitude additive, l'effort et les variables flux de l'élément R incertain.

w_R est une entrée fictive qui représente l'effort additionnel apporté par l'incertitude paramétrique.

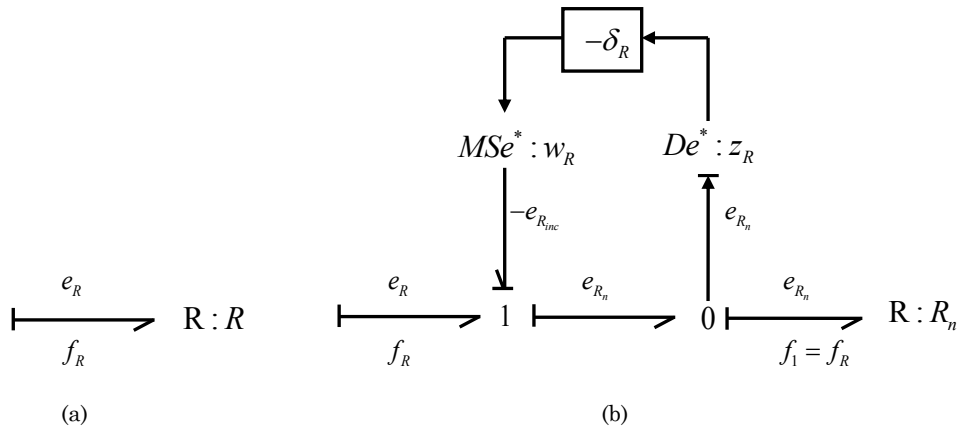


FIGURE 2.13 – (a) élément R déterministe en causalité résistance (b) élément R en BG-LFT en causalité résistance.

Les entrées fictives sont représentées par MSe^* et MSf^* dans le BG incertain. De^* et Df^* correspondent aux capteurs virtuels dans le BG incertain. L'exposant $*$ est utilisé pour la distinction des sources réelles et mesurées de celles fictives. Dans le cas considéré MSe^* (MSf^*) représente la valeur supplémentaire de l'effort (du flux) apporté par l'incertitude. Dans le cas déterministe, cette source est nulle. Le capteur fictif (De^* ou Df^*) est rajouté pour introduire la valeur de l'incertitude relative modulant ainsi MSe^* ou MSf^* .

Pour un élément R en causalité conductance (effort imposé)(équation 2.10), la procédure est identique a celle présentée ci-dessus pour la causalité résistance.

$$f_R = \frac{1}{R} \cdot e_R \quad (2.10)$$

qui peut être écrite sous la forme de l'équation (2.11) et qui est donnée par :

$$f_R = \frac{1}{R_n} \cdot (1 + \delta_{1/R}) \cdot e_R = \frac{1}{R_n} \cdot e_R + \frac{\delta_{1/R}}{R_n} \cdot e_R = f_{R_n} + f_{R_{inc}} \quad (2.11)$$

Et le BG-LFT équivalent dans ce cas est donné par la figure suivante (cf. FIGURE 2.14 (b)) :

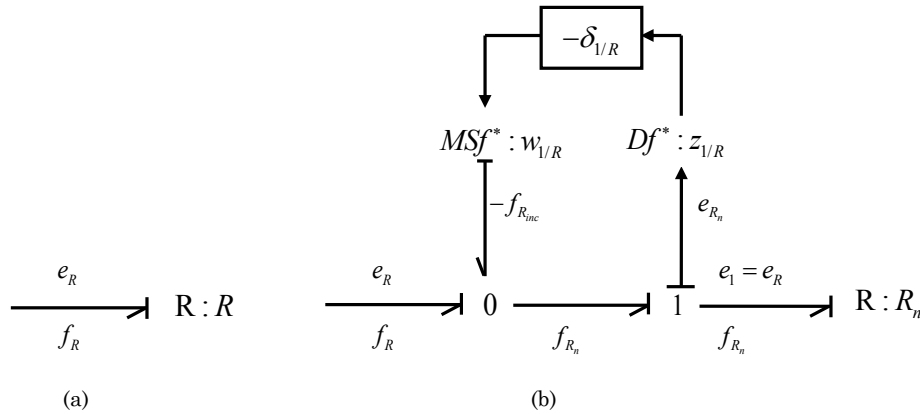


FIGURE 2.14 – (a)élément R déterministe en causalité conductance (b) élément R équivalent en BG-LFT en causalité conductance.

La modélisation sous forme LFT exige que le modèle soit propre et observable [184]. La méthodologie BG permet à l'aide des manipulations, la vérification de ces propriétés directement sur le modèle BG.

Propriété 1

un modèle BG est propre si et seulement s'il ne contient aucun élément dynamique en causalité dérivée lorsque le modèle BG est en causalité intégrale et réciproquement [193].

Propriété 2

un modèle BG est structurellement observable en état si et seulement si les conditions suivantes sont vérifiées :

- Sur le modèle BG 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 .
- Tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée sur le modèle BG dans la causalité dérivée préférentielle. Si les éléments dynamiques I ou C restent en causalité intégrale, la dualisation des détecteurs De et Df doit permettre de les mettre en causalité dérivée [193].

3. Représentation graphique des incertitudes paramétriques sur le modèle BGH

De la même manière que les systèmes continus, les SDHs peuvent être modélisés par l'outil BG en tenant compte des discontinuités à l'aide des jonctions contrôlées [26] et des incertitudes paramétriques en utilisant la forme LFT [6] .

Notre contribution dans cette partie consiste à :

- Modéliser les incertitudes paramétriques graphiquement sur le modèle BGH
- Obtenir un modèle BGH-LFT qui va servir par la suite à générer des résidus et des seuils à l'aide du parcours des chemins causaux.

Une extension de la représentation LFT pour les systèmes présentant des changements de mode est illustrée par un exemple.

Exemple

Un exemple académique représentant un circuit électrique est donné par la FIGURE 2.15 [194]. Ce système hybride est constitué de cinq éléments résistifs R_i $\{i = 1, 2, 3, 4, 5\}$, deux éléments capacitifs $\{C_1, C_2\}$, deux commutateurs $\{Sw_1, Sw_2\}$, un détecteur de flux Df et 3 détecteurs de tension $\{De_1, De_2, De_3\}$.

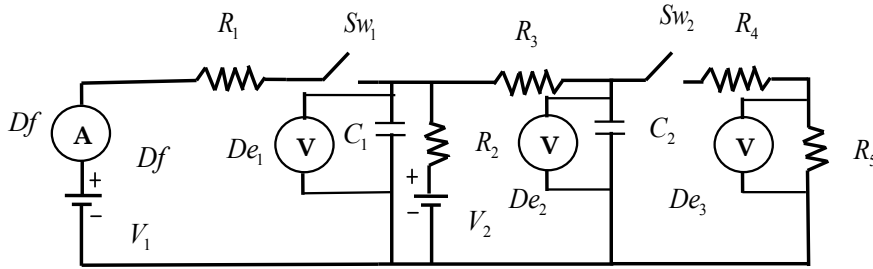


FIGURE 2.15 – Exemple d'un système hybride : Circuit électrique

Le modèle BGH est donné par la FIGURE 2.16 et le modèle BGH pour le diagnostic BGHD est donné par la FIGURE 2.17

Le modèle BGHD sous la forme LFT est donné par la FIGURE 2.18 où les entrées fictives sont liées aux sorties fictives z par les relations suivantes Équations (2.12-2.18) :

$$w_{R_1} = -\delta_{R_1} \cdot z_{R_1}; \quad z_{R_1} = R_{n_1} \cdot Df \quad (2.12)$$

$$w_{C_1} = -\delta_{C_1} \cdot z_{C_1}; \quad z_{C_1} = C_{n_1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_1 \quad (2.13)$$

$$w_{1/R_2} = -\delta_{1/R_2} \cdot z_{1/R_2}; \quad z_{1/R_2} = \frac{1}{R_{n_2}} \cdot De_2 \quad (2.14)$$

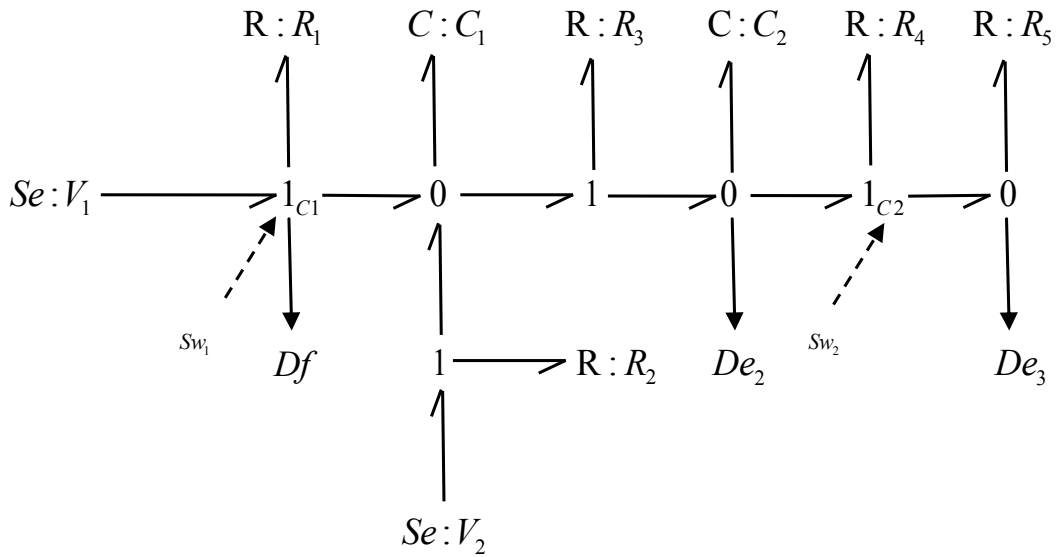


FIGURE 2.16 – Modèle BGH du Circuit électrique

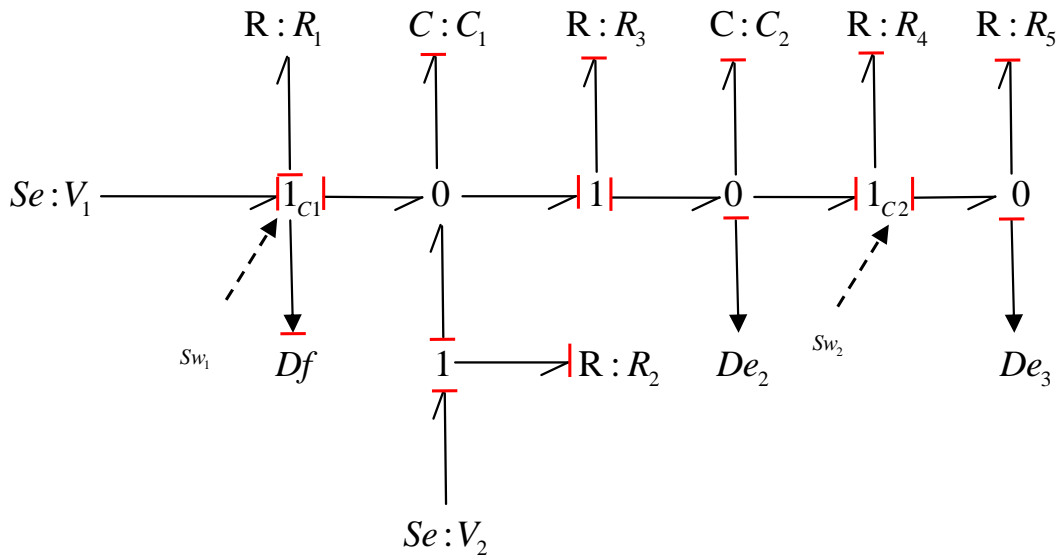


FIGURE 2.17 – Modèle BGHD du Circuit électrique

$$w_{1/R_3} = -\delta_{1/R_3} \cdot z_{1/R_3}; \quad z_{1/R_3} = \frac{1}{R_{n3}} \cdot (D_{e1} - D_{e2}) \quad (2.15)$$

$$w_{C_2} = -\delta_{C_2} \cdot z_{C_2}; \quad z_{C_2} = C_{n2} \cdot \frac{d}{dt} \cdot D_{e2} \quad (2.16)$$

$$w_{1/R_4} = -\delta_{1/R_4} \cdot z_{1/R_4}; \quad z_{1/R_4} = \frac{1}{R_{n4}} \cdot (D_{e2} - D_{e3}) \quad (2.17)$$

$$w_{1/R_5} = -\delta_{1/R_5} \cdot z_{1/R_5}; \quad z_{1/R_5} = \frac{1}{R_{n5}} \cdot D_{e3} \quad (2.18)$$

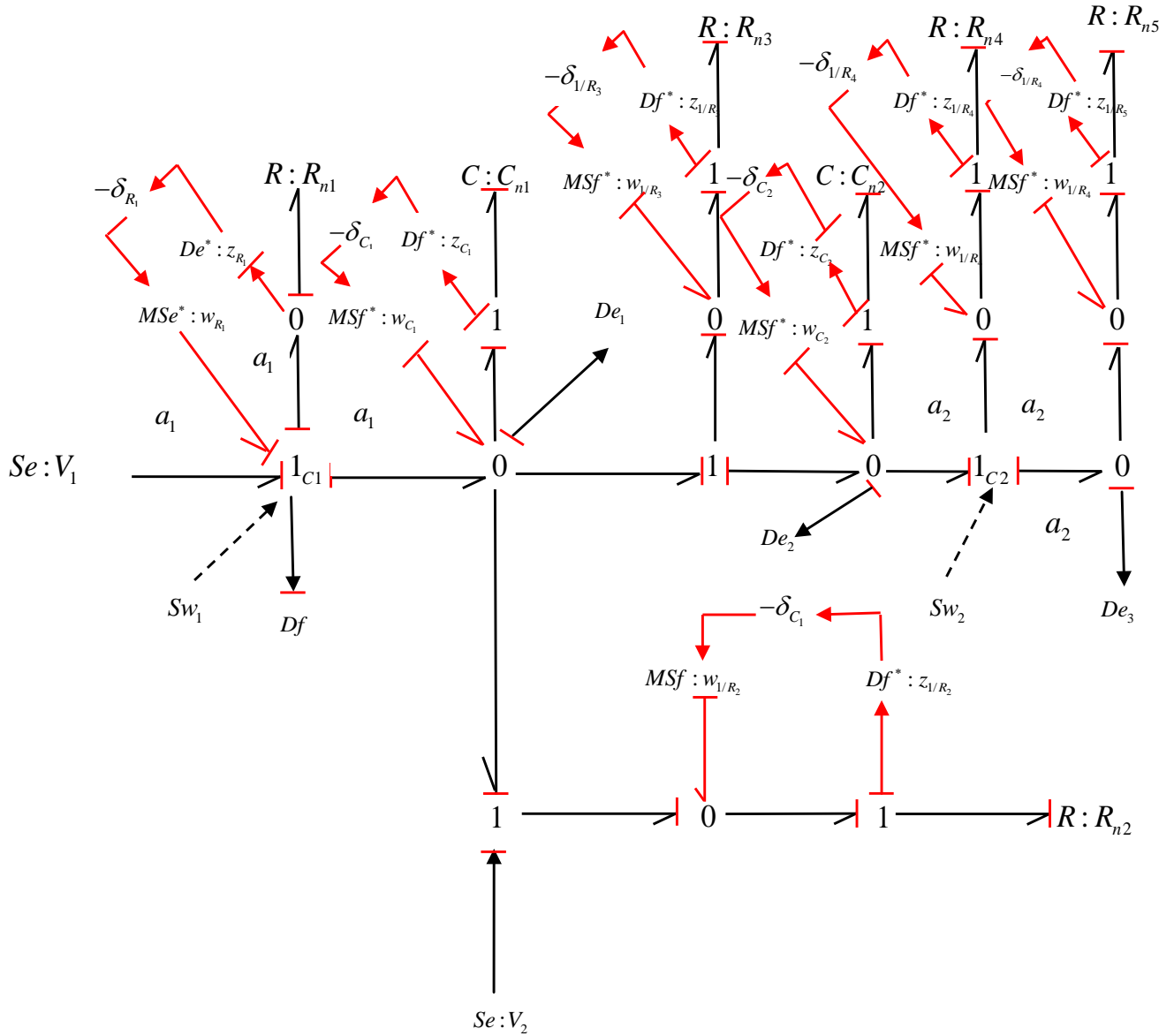


FIGURE 2.18 – Modèle BGHD sous la forme LFT du Circuit électrique

Avec :

$\delta_{R_1}, \delta_{1/R_2}, \delta_{1/R_3}, \delta_{1/R_4}$, et δ_{1/R_5} , représentent les incertitudes multiplicatives sur les éléments résistifs R_1, R_2, R_3, R_4 , et R_5 .

Et

$\delta_{C_1}, \delta_{C_2}$ représentent les incertitudes multiplicatives sur les éléments capacitifs C_1, C_2 .

Les liens adjacents représentant les flux $\{f_1, f_2, f_3, \}$ et $\{f_{32}, f_{33}, f_{34}, \}$ avec les jonctions contrôlées $\{1_{C1}, 1_{C2}\}$ sont remplacés par $\{a_1 \cdot f_1, a_1 \cdot f_2, a_1 \cdot f_3, \}$ et $\{a_2 \cdot f_{32}, a_2 \cdot f_{33}, a_2 \cdot f_{34}, \}$ basée sur une variable booléenne $a_i \in \{0, 1\}$ avec $i = 1, 2$ qui représente l'état des jonctions contrôlées, cette dernière exprime le mode de fonctionnement du système hybride permettant ainsi la génération des RRAGs pour tous les modes de fonctionnement.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, sont rappelées les bases de la théorie bond graph déterministe puis les modèles incertains en utilisant la forme LFT. La théorie des BG LFT a été étendue aux systèmes hybrides en se basant sur les Bond Graph Hybrides (BGH) et les jonctions contrôlées.

Cette démarche a été illustrée par un exemple pédagogique représentant un circuit électrique à commutation. Les BGH incertains développés seront utilisés dans le chapitre suivant pour la surveillance robuste aux incertitudes paramétriques de systèmes hybrides.

Nous avons alors démontré qu'un système hybride caractérisé par un ensemble de modes peut être représenté par un seul modèle BGH valide à tous les modes, contrairement aux approches classiques où le système hybride est représenté par un ensemble de modèles, de ce fait, les résidus générés seront égaux au nombre de modèles.

La forme BGH-LFT permet le découplage entre la partie nominale et la partie incertaine du modèle, la partie incertaine peut contenir les incertitudes paramétriques ou structurées, les dynamiques négligées, la représentation BGH-LFT est basée sur le fait que chaque paramètre est modélisé en BG par un seul élément, par conséquent, les incertitudes paramétriques peuvent être associées directement aux éléments BG. Les incertitudes paramétriques sont introduites graphiquement sur le modèle BGH et sont associées à un composant physique représenté par l'élément BG. La démarche est une approche complète pour la conception intégrée d'un système de diagnostic, elle n'utilise qu'une seule représentation. A l'aide des aspects graphiques et les propriétés structurelles et causales de l'outil BG, les RRAGs peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique en utilisant des logiciels dédiés.

A l'aide de l'outil BG et par structure causale, le parcours des chemins causaux sur le bond graph (qui est un graphe) permet de filtrer les alarmes (détermination de l'origine du défaut), de générer les RRAGs par élimination des variables inconnues, ainsi, le modèle bond graph explicite aussi bien la structure que le comportement du système, les RRAGs peuvent être alors générées sur la base des lois de conservation d'énergie issues des jonctions 0 et 1, de plus, les défauts processus (de type fuite, blocage, ..) peuvent être affectés d'une manière systématique aux RRAGs qui leur sont sensibles, étant donné que ces indicateurs de fautes sont déduits des équations énergétiques, cette propriété permet alors d'automatiser la construction des tableaux de signature des pannes. Le bond graph étant un modèle physique où les paramètres sont explicitement représentés par des éléments de type résistif R , capacitif C , inductif I , les incertitudes peuvent être modélisés sur ces éléments.

Chapitre 3

La conception des algorithmes de supervision

Guide de lecture :

L'objet de ce chapitre est de développer une méthode de diagnostic des SDHs incertains. Dans un premier temps, sont exposées les différentes méthodes de diagnostic robustes consultées dans la littérature ; nous présenterons par la suite l'algorithme proposé pour la détection et la localisation des défauts pouvant affecter le système hybride. L'intérêt scientifique de cet algorithme est double : d'une part il est basé sur l'exploitation des propriétés structurelles et causales du BGH LFT pour la génération systématique de Relations de Redondance Analytiques Globales (RRAG) robustes aux incertitudes paramétriques, valides, d'autre part pour tous les modes de fonctionnement grâce à l'aspect hybride du modèle.

3.1 Introduction

Les méthodes de détection et d'isolation des défauts à base de modèle utilisent un modèle mathématique du système de surveillance, néanmoins un modèle mathématique complet et exact est difficile à obtenir en raison de la complexité des système et la présence d'incertitudes paramétriques du modèle. Généralement, les paramètres du système peuvent varier avec le temps d'une manière incertaine, et les caractéristiques des perturbations et du bruit sont inconnues de sorte qu'ils ne peuvent pas être modélisés avec précision. Par conséquent, il y a toujours un décalage entre le processus réel et son modèle mathématique, même en absence de défauts. Ces écarts peuvent causer des difficultés dans les applications de détection de défauts et d'isolation, ils constituent une source de fausses alarmes qui peuvent endommager la performance du système de surveillance. La modélisation des incertitudes est donc une étape importante dans le concept d'un système de détection et d'isolation de défauts à base de modèle [195].

Dans le but de surmonter les difficultés introduites par la modélisation d'incertitudes, un système de diagnostic à base de modèle doit être robuste, c'est à dire insensible aux incertitudes. Dans certains cas, une simple réduction de la sensibilité à la modélisation des incertitudes n'est pas suffisante car une telle diminution de la sensibilité peut être associée à une réduction de la sensibilité aux défauts [195]. Une formulation plus significative du problème du diagnostic robuste est d'augmenter la robustesse par rapport aux incertitudes de modélisation tout en gardant la sensibilité aux défauts. Un système de diagnostic ou de surveillance destiné à four-

nir une sensibilité satisfaisante aux défauts, associé à la robustesse nécessaire par rapport aux incertitudes de modélisation est appelé, système de diagnostic robuste [195].

Une tâche importante dans un système de diagnostic est d'être capable de détecter et isoler les défauts naissants dans un système avant qu'ils ne se manifestent sous forme de problèmes nécessitant l'intervention automatique du système ou de l'opérateur humain.

Le diagnostic des pannes matérielles et brusques est relativement simple, car leur effets sur le système de diagnostic sont plus grands que la modélisation des incertitudes et peuvent être diagnostiqués par la mise en place d'un seuil sur le résidu. Cependant, les défauts naissants ont un petit effet sur les résidus, et peuvent être masqués comme une conséquence de la modélisation d'incertitude. L'effet d'un défaut naissant sur le système contrôlé est très faible et presque négligeable lorsqu'il se produit [196].

La complexité des systèmes industriels automatisés et les contraintes de la compétitivité en termes de coûts des installations de production, de disponibilité et de sécurité ; ont mobilisé ces dernières années une grande communauté de chercheurs afin d'améliorer la surveillance et le diagnostic de ce type de processus. La majorité de ces systèmes industriels automatisés peuvent être modélisés comme des SDHs ; ces derniers étant constitués d'interaction entre des parties continues et discrètes.

L'amélioration de la sécurité de fonctionnement des systèmes est basée essentiellement sur des algorithmes de détection et d'isolation des défauts FDI, qui consistent à comparer le comportement réel du système avec les comportements de référence décrivant le fonctionnement normal pour la détection de défauts, ou qui décrivent différents types de défauts pour l'analyse et l'isolation de défaut tout en minimisant les fausses alarmes, les non-détections et les retards dans la détection. La performance de dégradation des algorithmes de diagnostic est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques du modèle et de leurs variations aléatoires.

Ces dernières années, plusieurs travaux ont été abordés dans le cadre du diagnostic robuste pour les SDHs [22, 197, 198, 23, 183, 24].

La majorité de ces travaux nécessitent une pré-énumération de tous les modes possibles dans le système, ce qui augmente la complexité et le nombre de modèles.

L'utilisation d'un modèle bond graph hybride basée sur les jonctions contrôlées (cf. chapitre 2) permet d'utiliser un seul modèle valide pour tous les modes.

D'autre part, le choix de la forme LFT pour la modélisation des incertitudes paramétriques avec les BGH permet l'utilisation d'un outil unique pour : la génération des résidus, génération de seuils adaptatifs du fonctionnement normal et l'analyse de la sensibilité afin d'améliorer la procédure de décision de génération d'alarmes.

3.2 Surveillance des systèmes par Bond Graph

Un système de surveillance représenté par BG est constitué de deux parties, la première présente le transfert de la puissance et de l'énergie (formée par le processus et l'ensemble des actionneurs), et la deuxième représente les signaux (le système d'information, le capteur et le système de régulation).

Le modèle BG représente la partie énergétique du système, le système étant modélisé par les éléments BGs (R, C, I) avec les jonctions ($0, 1, TF, GY$). Les actionneurs sont modélisés par les sources (Se, Sf) ou (MSe, MSf) dans le cas de sources modulées, ou ils sont commandés par des signaux externes fournis par un contrôleur. Les capteurs ou détecteurs (De, Df) et le système de commande forment le système d'information. Dans le système énergétique, la puissance échangée est modélisée par une demi-flèche tandis que dans le deuxième système, la puissance étant négligeable et par conséquent est représentée par une flèche.

La FIGURE 3.1 présente l'architecture d'un système de surveillance par BG [199].

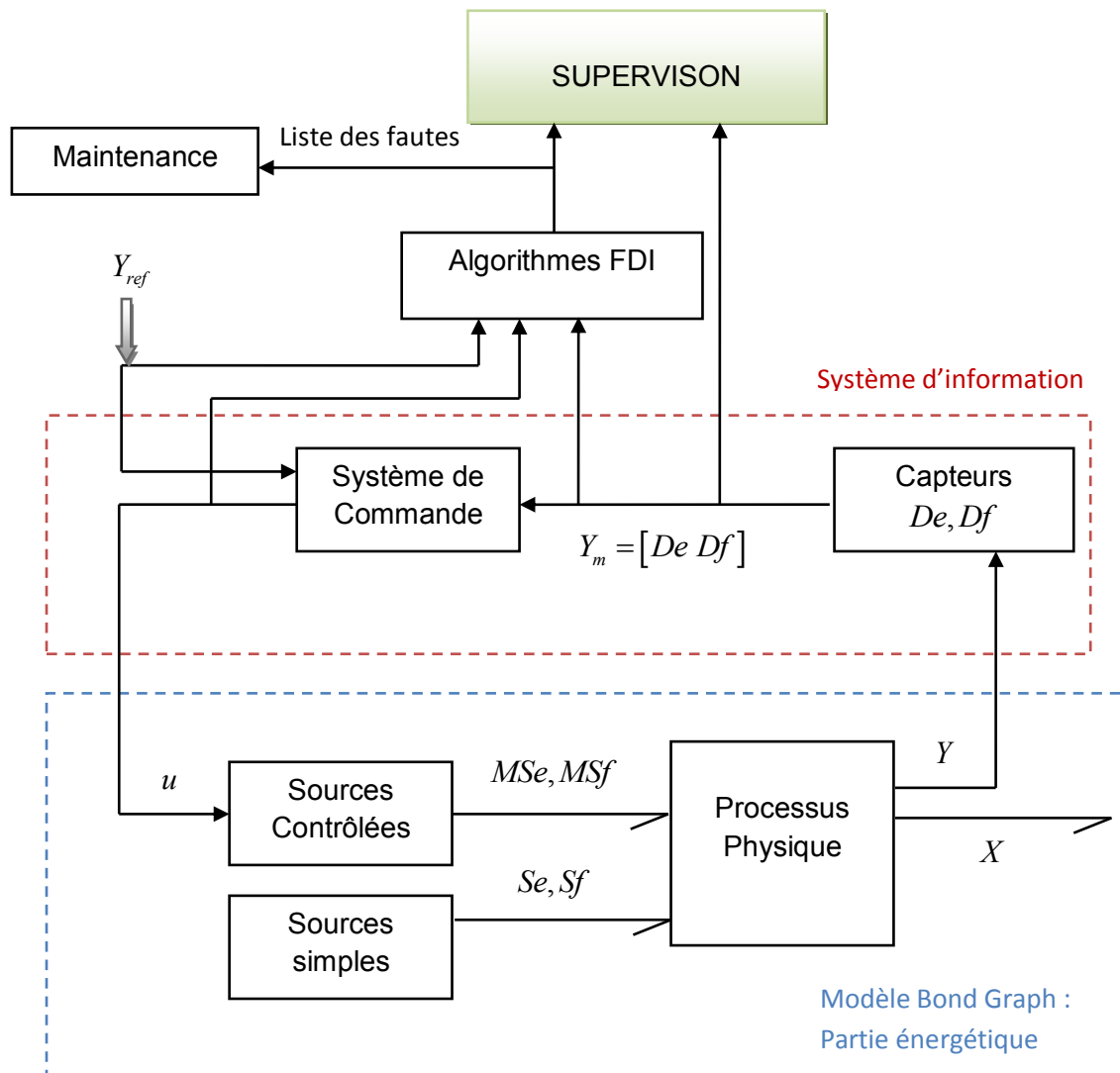


FIGURE 3.1 – Représentation bond graph d'un système de surveillance

Il existe principalement deux approches de surveillance par BG, l'approche qualitative et l'approche quantitative.

1. L'approche qualitative à base de bond graph pour le diagnostic

Un modèle très précis n'est pas nécessaire par l'approche qualitative par conséquent la surveillance à base de modèle BG qualitatif est plus simple en regard de l'approche quantitative.

Ce type de méthodes qualitatives se base sur des valeurs qualitatives et non pas sur des valeurs numériques caractérisées par l'ensemble $\{[1] [+][0] [-][-1] [?]\}$ qui représente la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Les opérateurs étant qualitatifs sont définis à l'aide des opérateurs de nombres réels définis par $\{+, -, \times, \div, =\}$ [200, 201]. Afin d'identifier l'origine des défauts, la résolution d'un système d'équations qualitatives est requise. Il existe d'autres travaux fondés sur les Graphes Causaux Temporels dans le but d'isoler les pannes en se basant sur la dynamique (et de son ordre) d'occurrence de la faute. Dans [202]; une méthode est proposée dans le but de déterminer les causes possibles d'une défaillance basée sur l'analyse des équations d'état linéaires.

L'approche qualitative n'exige pas une connaissance absolue du système et des grandeurs numériques des paramètres, les défaillances des capteurs n'étant pas détectées en utilisant cette approche ainsi que la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations [109].

2. L'approche quantitative à base de BG pour le diagnostic

Ce type d'approche a pour but la comparaison entre le comportement normal du système et celui du modèle numérique. L'approche quantitative est basée sur les lois de la physique, par conséquent, une bonne connaissance sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres sont requises. La majorité des modèles (fonction de transfert, équations d'état) est obtenue grâce aux lois physiques (lois des premiers principes [203]) ou grâce à une identification statistique des paramètres [204].

Dans ce type d'approche, les RRAs sont faciles à déduire graphiquement, simples et adaptés à une implémentation informatique [199].

Dans le présent travail, une approche quantitative est étendue aux systèmes dans le but de générer les relations de redondances analytiques globales à partir du modèle BGH.

3.3 Modélisation pour le diagnostic

Le diagnostic à base de modèle exige des modèles complets (riches) du comportement du système, où les deux comportements normal et défectueux doivent être correctement capturés de manière concise. Les modèles pour le diagnostic doivent répondre aux exigences suivantes :

3.3.1 Niveau d'abstraction

Les modèles de diagnostic ne doivent représenter que les comportements nécessaires pour le diagnostic. Puisque le diagnostic nécessite un raisonnement sur le modèle de système, la représentation du système doit modéliser le comportement au bon niveau d'abstraction pour appuyer (supporter) les procédures de raisonnement efficacement, ce dernier utilise souvent la connaissance cause et effet du système [205, 206, 172, 207, 208]. Par conséquent, les modèles de diagnostic doivent inclure à la fois les informations causales et pour les systèmes dynamiques,

les informations temporelles, de sorte que les causes possibles des déviations à partir du comportement nominal peuvent être identifiées, et les effets futurs des candidats possibles peuvent être prédits. Généralement, il est utile d'avoir différents modèles aux différents niveaux d'abstraction pour les parties du problème de diagnostic.

3.3.2 Les modèles exécutables

Pour les systèmes dynamiques, le comportement du système change avec le temps, donc il doit être efficace afin de fournir une référence correcte pour les écarts à partir du comportement nominal : le modèle du système doit être capable de simuler efficacement le système pour la génération d'un comportement correct dans le temps. Le modèle doit contenir suffisamment d'informations de sorte que le comportement défectueux observé peut être associé aux composants défectueux.

3.3.3 Les modèles à base de composants

Le prototype de modélisation doit soutenir les modèles à base de composants, et permet la réutilisation des modèles de composants, et donc diminue l'effort de modélisation. En outre, il fournit un cadre pour l'isolation de défaut composant à base de modèle. Les composants doivent être définis dans un cadre commun avec des ensembles communs des interfaces entre eux, afin que leurs interactions soient claires et précises, et les principes de composition peuvent être appliqués afin d'obtenir le comportement du système à partir des modèles de composants.

L'outil BG définit un langage pour la modélisation basée sur l'énergie des systèmes physiques [209]. Il conserve la topologie du système et appuie les premiers principes, la modélisation des systèmes physiques. De plus, il permet la génération automatique des équations du système [209].

L'outil BG est particulièrement adapté pour le diagnostic car il intègre les informations causales et temporelles nécessaires pour l'obtention et l'analyse des défauts transitoires [172, 120]. En outre, les composants peuvent être représentés explicitement comme des éléments BGs ce qui rend plus facile de relier les transitoires de défauts observés aux changements des valeurs paramétriques dans les composants du système [172, 210]. Grâce aux avantages de l'outil BG, plusieurs méthodes de diagnostic à base de modèles ont été développées à l'aide des BGs [136, 154, 169, 2].

Les BGHs étendent les BGs en permettant la commutation binaire idéale des connexions des composants. Les BGHs étant basées sur les BGs conventionnels, ils permettent la génération automatique des équations du système, des modèles de simulation [179, 211, 212], et observateurs [136, 158, 14]. Les BGHs permettent également la modélisation orientée composant [213].

Dans la thèse de *M.Daigle* [214], les BGHs sont utilisées dans le cadre du transcendant hybride connu sous le terme scientifique « Hybrid Transcend » pour le diagnostic des SDHs, dans ses travaux [215, 214], le langage BGH est utilisé pour la modélisation des capteurs (défauts capteurs et discrets). Cette méthode a été testée et appliquée sur des systèmes d'énergie électrique et la robotique.

Dans le modèle du diagnostic du transcendent ; le graphe causal temporel (Temporel Causal Graph) est déduit à partir de l'analyse qualitative du modèle BG et il est utilisé pour l'identification des causes possibles du comportement défectueux et pour prédire le comportement futur des défauts [172].

3.4 Classe des systèmes considérés et hypothèses de travail

Généralement, pour les SDHs, un défaut peut affecter soit la partie continue (défauts actionneurs, défauts capteurs, défauts paramétriques,...) soit la partie discrète (non-transition, transition vers un mode non successeur,...) [21].

Le présent travail de recherche est limité à l'étude de la détection des défauts paramétriques. La classe des systèmes hybrides utilisée concerne les systèmes présentant des commutations contrôlées où les transitions sont dues à une commande ou à une action extérieure.

Les systèmes considérés sont des systèmes ayant des vannes et chaque vanne peut avoir deux états discrets possibles (ouverte et fermée), ces vannes sont actionnées (commandées) par les utilisateurs.

3.4.1 Types de défauts dans un système hybride

Dans le diagnostic des SDHs, deux types de défauts sont définis *défaut paramétrique* et *défaut discret*.

Défaut paramétrique

Définition

Un défaut paramétrique est un changement inattendu d'une valeur d'un paramètre dans le modèle. Les composants du système apparaissent comme des paramètres du modèle BGH. Les défauts affectant le comportement du système peuvent être modélisés. Les défauts paramétriques brusques sont définis comme un changement de type échelon dans la valeur du paramètre du composant. Par exemple, dans un système électrique, les défauts discrets sont des dysfonctionnements de commutation et les défauts paramétriques représentent l'augmentation et la diminution des valeurs de résistances R_i et les capacités C_i .

Les défauts paramétriques présentent des dégradations ou défaillances dans les composants du système c'est-à-dire déviation d'un ou plusieurs paramètres du modèle à partir de leurs valeurs nominales vers une valeur inconnue. Ils sont associés à des changements dans les valeurs des paramètres, et sont utiles pour modéliser les défaillances partielles ou les dégradations dans les composants du système [136, 172, 148]. Par exemple un changement dans la résistance électrique d'un circuit peut être modélisé par un changement de la valeur du paramètre de la résistance.

Défaut discret

Définition

Un défaut discret est un écart entre le mode actuel et le mode attendu d'un élément de commutation dans le modèle. Les défauts discrets dans le circuit électrique sont des dysfonctionnements de commutation ; exemple : une commande est donnée au commutateur (interrupteur) mais il reste bloqué en position ouverte. Aussi, il peut s'ouvrir ou se fermer sans commande soudainement.

Les défauts discrets (ou défauts de mode), qui peuvent être modélisés comme des événements de défaut ou modes de défaillance, sont associées à des changements de mode (à une commutation dans les composants), dans ce cas, l'état défectueux est connu à priori, et peut être modélisé par des paramètres connues seulement, ils sont utiles pour la modélisation des défauts de commutation dans les composants [159, 135, 215, 214, 148]. Par exemple un relais est désactivé par lui-même, ou devient bloqué dans un état particulier.

Les défauts de mode peuvent être détectés et isolés par les techniques d'identification de mode.

Dans le langage BGH, les changements de mode sont modélisés à l'aide des jonctions contrôlées, ainsi, les défauts discrets sont capturés comme des changements inattendus dans le mode de jonction [215].

Il convient de noter que les défauts modélisés à l'aide des changements de paramètres peuvent également être modélisés comme de nouveaux modes si l'amplitude du défaut est connue, et cette approche prise dans les approches de défaut discrets pour les SDHs [216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223].

Dans la plupart des cas, les amplitudes de défaut ne sont pas connues, de nombreux nouveaux modes sont nécessaires. Les défauts discrets peuvent également être capturés à un niveau plus détaillé que les changements de valeur de paramètre, un interrupteur désactivé peut être modélisé comme une résistance pour le commutateur tendant vers l'infini, mais cela produit des modèles non-linéaires qui sont difficiles à simuler et analyser et peuvent introduire des boucles algébriques dans les équations du système, ce qui rend encore l'analyse plus difficile.

3.4.2 Motivations pour le diagnostic des défauts à base de modèle

Le diagnostic basé modèle utilise principalement la redondance d'informations qui peut être matérielle ou analytique.

Les techniques de redondance matérielle (ou physique/parallèle)[121] utilisent de multiples capteurs, actionneurs, et des logiciels adéquats pour mesurer une variable particulière de plusieurs façons. Bien souvent, le schéma concerné (voting scheme) est appliqué sur un système de capteurs redondants afin de décider si et quand un défaut s'est produit et identifier son emplacement probable parmi les composants du système redondants. Bien que cette méthode soit facile à mettre en œuvre, elle présente certains points faibles tel que l'espace supplémentaire nécessaire pour satisfaire les équipements.

Ainsi, une approche à base de modèle mathématique qui fournit la relation fonctionnelle entre les différents signaux du système est nécessaire. Ceci est le concept de « redondance analytique », qui utilise des relations analytiques redondantes entre les différentes variables mesurées du processus. Aucun matériel redondant est nécessaire dans cette approche, et donc la redondance analytique est potentiellement plus fiable et moins onéreuse que la redondance matérielle [224]. Les performances de cette méthode dépend principalement de la précision du modèle utilisé.

La redondance analytique utilise des relations fonctionnelles afin de vérifier la cohérence entre les différentes variables pour détecter les défauts. Un signal résiduel est conçu de sorte qu'il est égal à une valeur zéro en fonctionnement normal et différent de zéro lorsqu'un défaut est survenu au système (fonctionnement défaillant). La génération résiduelle est réalisée par la comparaison entre un signal mesuré et son estimation. L'estimation est effectuée à l'aide du modèle mathématique du système considéré.

L'avantage majeur d'utiliser l'approche à base de modèle réside dans le fait qu'aucun composant matériel supplémentaire est nécessaire dans le cadre de la réalisation d'algorithmes de diagnostic. En outre, Dans la majorité des cas, les mesures nécessaires pour le contrôle des processus sont suffisantes afin d'effectuer le diagnostic des défauts [121]. Par conséquent, seul l'espace de stockage supplémentaire et la puissance de calcul sont requises pour l'implémentation en ligne d'un algorithme de diagnostic de défaut à base de modèle.

3.5 Diagnostic déterministe à base de BG

Ces dernières années, plusieurs travaux ont été abordés pour la détection et l'isolation des défauts à base de modèle BG [225], parmi eux, on peut citer principalement les travaux de *Ould Bouamama & al.* [226, 169, 170, 227] appliqués en génie des procédés par *El Osta & al.* et *Mrani Alaoui & al.*, [199, 228]. Ces travaux ont été validés par des applications à des processus industrielles complexes (raffinage, centrale thermique...) dans le cadre de projets industriels et européen CHEM projet FP7 CHEM N G1RD-CT-2001-00466).

On trouve aussi les travaux de *Djeziri & al.* [174, 175, 11] et les travaux de *Touati & al.* [229, 12, 230, 231] pour le diagnostic robuste appliquées aux systèmes incertains à l'aide de la modélisation LFT en tenant compte des incertitudes paramétriques et de mesures respectivement.

3.5.1 Génération des RRAs à partir du modèle BG

On distingue deux méthodes de génération de RRAs, la première basée sur le graphe biparti et la deuxième basée sur le BG. Dans ce qui suit, un bref aperçu sur ces deux méthodes est présenté.

1. Génération des RRAs par le graphe biparti

La génération des RRAs à base du graph biparti consiste à éliminer les variables inconnues à l'aide de la notion du couplage.

Définition

Un graph biparti $G(Z, C, A)$ est un graphe composé de deux ensembles Z et C . L'ensemble C représente les contraintes physiques du système alors que l'ensemble Z représente l'ensemble des variables inconnues, de mesures, des entrées du système [232].

A est l'ensemble des arcs du graphe reliant les deux ensembles :

- Il existe un lien $a_i \in A$ entre deux sommets $c_j \in C$ et $z_i \in Z$ si et seulement si la variable z_i apparaît dans la contrainte c_j .

L'ensemble des variables Z contient deux sous ensembles K et X :

$$Z = K \cup X \quad (3.1)$$

Où K représente toutes les variables connues du système (les mesures Y et les entrées connues U). X représente l'ensemble des variables inconnues. Les contraintes C sont des relations algébriques ou différentielles reliant les variables. La FIGURE 3.2 présente la structure d'un graphe biparti.

Dans le but de générer les RRAs, le système est décomposé en trois sous systèmes : sous déterminé, juste déterminé et surdéterminé.

- Le sous déterminé S^- représente une partie du système où le nombre des variables inconnues est supérieur aux contraintes ($card(X) > card(C)$). Généralement, dans ce cas, quelques variables inconnues ne peuvent pas être éliminées, par conséquent, ce sous système n'est ni observable ni surveillable [233].

- Le sous système S^0 avec un nombre de variables inconnues égal au nombre de contraintes ($card(X) = card(C)$) est dit juste déterminé permettant l'élimination de toutes les variables inconnues de façon unique. Ce sous système est observable mais n'est pas surveillable (pas de redondance).

- Un sous système S^+ avec un nombre de variables inconnues inférieur aux nombres de contraintes ($card(X) < card(C)$). Il est dit sous système surdéterminé. Dans ce cas, toutes les variables inconnues peuvent être éliminées de plusieurs façons. Ce sous système est observable et surveillable car il y a une redondance d'informations.

La notion du couplage entre les variables et les contraintes est utilisée dans le processus d'élimination des variables inconnues. Cette notion représente une causalité permettant le calcul des variables inconnues en utilisant les variables connues (variables de mesures

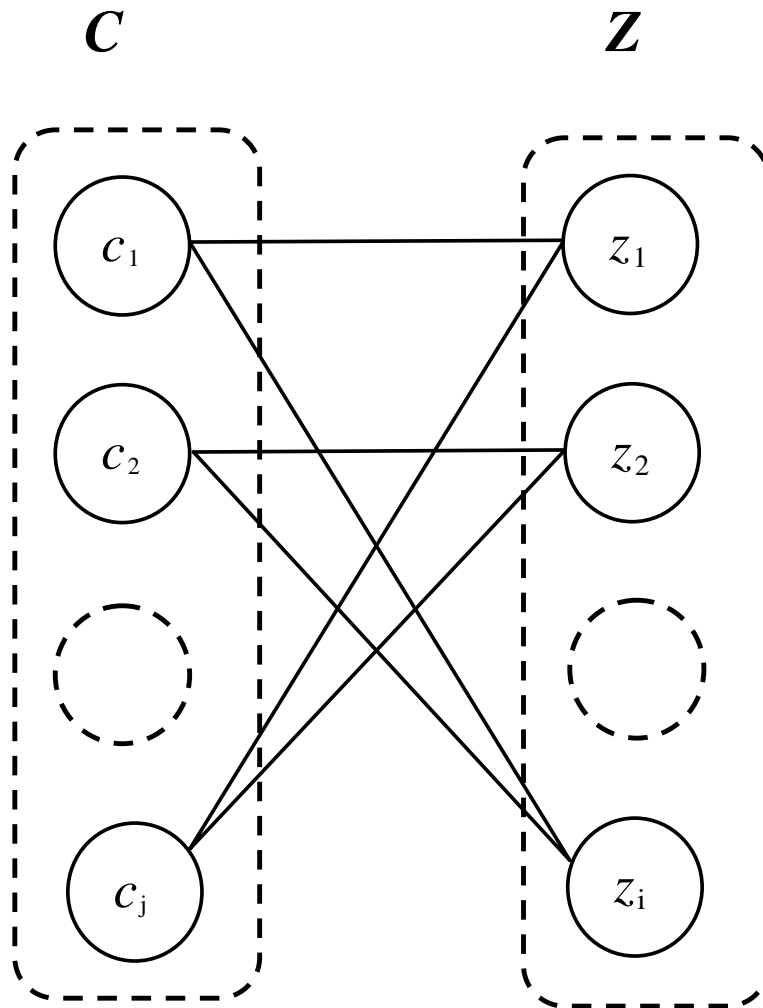


FIGURE 3.2 – La structure d'un graphe biparti

et de contrôle). Les variables qui ne peuvent pas être couplées ne sont pas éliminées. Tandis que les variables couplées de plusieurs façons peuvent être calculées autrement et donc la comparaison entre ces différentes valeurs de la même variable donne une RRA. Le couplage peut être aussi effectué sur la matrice d'incidence obtenue à partir du graphe biparti. La matricie d'incidence est une matrice booléenne A représentant en ligne l'ensemble des Contraintes C et en colonne les variable Z . Un élément a_{ij} de la matrice est égal à 1 ssi la variable z_j appartient à la contrainte c_i .

Après avoir effectué un couplage complet sur les variables inconnues, les contraintes non couplées sont des RRAs. Cela signifie que ces contraintes n'ont pas été utilisées pour l'élimination des variables : elles sont superflues et sont donc utilisées comme RRAs. Ce type de couplage est dit complet par rapport aux variables inconnues mais incomplet par rapport aux contraintes. Les autres couplages sont : 1) complet par rapport aux variables inconnues et aux contraintes (système juste déterminé) 2) incomplet par rapport aux variables inconnues mais complet par rapport aux contraintes (système sous déterminé), donc, l'obtention des sous systèmes S^+, S^0, S^- s'effectue à l'aide de la décomposition de Dulmage- Mendelshon [234] (FIGURE 3.3).

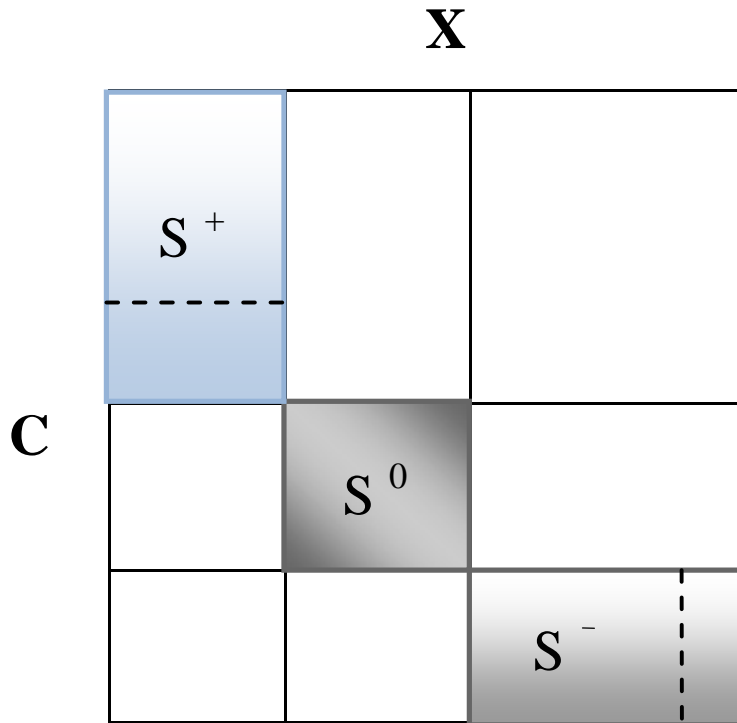


FIGURE 3.3 – Décomposition de Dulmage- Mendelshon

Les différents couplages et la détermination des variables inconnues et connues peuvent être aisément déduits du modèle BG [235].

2. Génération des RRAs par BG

Ces dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés dans le cadre de la détection et l'isolation des défauts à base de modèles et plus précisément à base de l'outil BG à l'aide des RRAs déterministes directement obtenues à partir du modèle BG, parmi eux on cite les travaux de *Samantaray & al.* et *Ould Bouamama & al.* [4, 34]. D'autres travaux ont été développés à base de modèle BG et la forme LFT dans le but d'obtenir la robustesse [174, 175, 11].

L'outil BG permet la modélisation et le diagnostic des systèmes complexes. À l'aide des propriétés structurelles, causales et comportementales de l'outil BG, les RRAs peuvent être obtenues directement à partir du modèle BG [169, 34, 236].

Relation de Redondance Analytique (RRA)

Définition

Les RRAs sont des contraintes exprimées par les variables connues tel que les entrées, les mesures de capteurs et paramètres physiques.

Dans la dérivation des RRAs symboliques à partir du modèle BG, une RRA a une forme générale donnée par l'expression suivante :

$$F_l(\theta, De, Df, u) = 0 \text{ pour } l = 1, \dots, m \quad (3.2)$$

Où m désigne des RRAs dérivées (obtenues) à partir du modèle BG, $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_p]^T$ représente les paramètres des composants, ou p représente le nombre des paramètres utilisés dans le BG pour décrire le système. u représente les entrées du système, De et Df représentent les détecteurs (capteurs) d'effort et de flux respectivement du BG.

L'évaluation numérique d'une RRA est un résidu. Etant donné que dans la plupart des cas, la formulation des RRAs nécessite l'utilisation des dérivées ou encore des dérivées d'ordre élevées des mesures des capteurs, un pré-filtre est nécessaire afin de filtrer l'influence des bruits sur les résidus.

Généralement, un résidu r_l défini par une RRA, est dit être sensible à un défaut dans un composant si la RRA dépend des paramètres du composant. Lorsque le système est en fonctionnement normal, chaque résidu calculé sera conforme avec le comportement du système, cela signifie que la valeur absolue de chaque résidu r_l devient inférieur d'une petite valeur de seuil ε_l . Afin d'appliquer l'ensemble des résidus pour la détection et l'isolation des défauts, un vecteur de cohérence binaire $C = [c_1 \dots c_m]$ est défini. Chaque composant c_l de C est obtenu par la règle de décision simple suivante :

$$c_l = \begin{cases} 1 & \text{si } |r_l| > \varepsilon_l \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \text{ Pour } l = 1, \dots, m \quad (3.3)$$

Le vecteur de cohérence binaire C sera égal à zéro en fonctionnement normal. Par ailleurs, si le système est défectueux (un défaut s'est produit) alors le vecteur de cohérence sera un vecteur normal non nul.

Afin d'étudier la détectabilité et l'isolabilité des défauts, une Matrice de Signature de Fautes (MSF) est générée à partir des m RRAs du système [169]. Une MSF est montrée à la TABLE 3.1 où les résidus r_1, \dots, r_m , la détectabilité de défaut (D_b) et l'isolabilité de défaut (I_b) sont représentés par les colonnes.

A partir d'une colonne résiduelle, un 1 dans une entrée indique que le résidu est sensible au défaut du paramètre correspondant qui se trouve dans la ligne correspondante. D'autre part, un 0 à l'entrée indique que le résidu est insensible au défaut du paramètre. Si au moins un 1 apparaît dans la signature du défaut du paramètre θ_p , alors le paramètre est dit détectable, ce cas est représenté dans la matrice par $D_b = 1$.

Lorsque la signature de défaut du paramètre est unique, alors le paramètre est dit isolable noté par $I_b = 1$ dans la matrice.

Il est noté que la détectabilité du défaut est une condition nécessaire mais non suffisante pour l'isolabilité des défauts.

TABLE 3.1 – Matrice de Signature de Fautes(MSF)

	r_1	. . .	r_m	D_b	I_b
θ_1	1 ou 0				
.					
.					
.					
θ_p					

L'algorithme de génération des RRAs (indicateurs de fautes) à partir du modèle BG est donné comme suit [192] :

- Mettre le modèle BG en causalité dérivée par l'inversion des causalités des capteurs. Par conséquent, les capteurs deviennent des sources d'information notées SSe ou SSf (source de signal).
- Ecrire l'équation de structure de jonction 0 ($\Sigma f_i = 0$) et 1 ($\Sigma e_i = 0$) (représentant la conservation de puissance) contenant au moins un détecteur. Cette équation représente la RRA candidate.
 1. Éliminer les variables inconnues (e_i ou f_i) par le parcours des chemins causaux sur le modèle BG de la variable inconnue vers une variable connue (capteur ou source)
 2. Une RRA est déduite pour tout détecteur dont la causalité est inversée
 3. Pour tout détecteur dont la causalité ne peut pas être inversée, une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature (redondance matérielle) placé dans la même jonction.

Une autre méthode est présentée par *Ould Bouamama & al.* dans [237] et par *Benmoussa & al.* dans [238] pour la détection et l'isolation des défauts en se basant sur les propriétés causales et structurelles de l'outil BG où les notions d'observabilité, la bicausalité et les chemins causaux disjoints sont utilisés.

3.6 Diagnostic des défauts à base de modèle BGH

Plusieurs travaux ont été développés dans le cadre du diagnostic des défauts pour les SDHs [148, 159, 158, 136, 135]

Dans [148, 159], les algorithmes de détection et d'isolation des défauts sont conçus afin de surveiller les défauts brusques et les défauts paramétriques naissants d'un système hybride. Cette approche est basée sur le modèle de l'automate hybride où les modèles d'espace d'état sont utilisés pour la description du système hybride. De même, le modèle automate hybride a

été également utilisé pour un système de détection et localisation de défauts basé sur les résidus de parité structurés [135].

Pour les SDHs complexes qui possèdent un grand nombre de modes, cet automate hybride nécessite un grand nombre de modèle d'espace d'état ; par conséquent, il introduit des difficultés sur la conception et l'implémentation en temps réel des algorithmes FDI.

L'extension des avantages des BGs aux SDHs par l'introduction des BGHs est donnée dans [179, 180] afin d'utiliser les BGHs pour la simulation.

Plus récemment, le BGH a été utilisé pour le développement d'un diagnostic quantitatif et qualitatif pour les SDHs avec des défauts paramétriques brusques [158, 136] sur la base des observateurs. Dans ce travail, l'observateur hybride intègre un filtre de Kalman (pour le suivi continu) et un détecteur de changement de mode. Les événements discrets sont soit des changements de mode contrôlé connus ou bien des changements de mode autonomes (déclenchés par des variables d'état continues). Une fois que les conditions de changement de mode sont détectées, un automate à état fini est utilisé afin de déterminer le nouveau mode. Le modèle d'espace d'état du nouveau mode est calculé de façon dynamique (à partir du BGH) et appliqué au filtre de Kalman. Si un défaut est détecté, l'observateur hybride est incapable de suivre les changements de mode autonomes. Par conséquent, les hypothèses de défaut sont générées dans tous les modes précédents jusqu'au niveau de diagnosibilité du système.

Une approche qualitative basée sur le Graphe Causal Temporel connue sous l'expression anglaise Temporal Causal Graph (TCG) est utilisée afin de réduire l'ensemble des hypothèses de défauts et seulement ces hypothèses qui sont compatibles avec les observations des systèmes sont considérées pour l'identification du paramètre du défaut.

Dans [239], un concept de causalité paramétré est proposé afin de traiter le problème de changement de la causalité rencontré dans [158, 136].

3.6.1 Analyse structurelle par le BGH

L'analyse structurelle a été abordée auparavant en utilisant l'outil BG, cette étude a permis l'étude des propriétés causales et structurelles du système directement sur le modèle BG. L'analyse structurelle a permis aussi l'étude de la commandabilité, observabilité et surveillabilité [193].

Ces propriétés sont importantes pour la génération des RRAs. Cette étude structurelle a été étendue et exploitée par *C.B. Low & al.* aux SDHs pour la génération des RRAGs.

3.6.2 Structure d'un modèle BGH

Le formalisme BG permet une représentation graphique des systèmes physiques fondée sur le transfert d'énergie. Les éléments commutateurs sont modélisés par des éléments résistifs non linéaires ou des transformateurs modulés ce qui conduit à la détermination d'une équation

unique à paramètres variables; ce type d'approches, appelé à topologie variante, cause des problèmes numériques au moment des changements brusques des paramètres [240]. Dans le deuxième type intitulé à topologie invariante, ces approches utilisent la notion d'interrupteur idéal qui permet d'obtenir une équation d'état pour chaque configuration valide du système (une configuration respectant les lois de *kirchhoff* généralisées appelée une configuration valide) et la détermination de fonctions de saut permettant la réinitialisation du vecteur d'état. Dans ce type d'approches, les problèmes numériques lors des changements de configuration sont éliminés.

Dans le but de représenter les interrupteurs idéaux, deux méthodes sont développées ;

- 1) Une utilisation de la notion de jonction contrôlée qui possède deux états (ON/OFF) : à l'état ON (interrupteur passant), elle se comporte comme une fonction standard et à l'état OFF, elle annule tout transfert d'énergie (interrupteur bloqué) [154];
- 2) La deuxième méthode permet une modélisation de l'interrupteur idéal sous forme de source de tension nulle à l'état ON et comme une source de flux nulle à l'état OFF.

Dans ce présent travail, la première méthode est utilisée.

3.7 Génération des Relations de Redondance Analytiques Globales (RRAGs) déterministes pour les SDHs

Une Relation de Redondance Analytique Globale (RRAG) est une contrainte où toutes les variables sont connues. Elle exprime un indicateur de fautes valide pour tous les modes de fonctionnement du système hybride.

Cette méthode de génération présente plusieurs avantages dans le cadre du diagnostic des SDHs et qui sont :

- Les RRAGs sont des équations qui expriment les relations entre les variables du modèle BGH, elle représentent une image du système, elles sont simples à comprendre et sont déduites directement à partir du graphe ;
- Puisque la génération des RRAGs est symbolique, l'implémentation informatique est facile à réaliser à l'aide des logiciels dédiés, permettant ainsi de meilleures performances de détection et d'isolation de défauts.

3.7.1 Relation de Redondance Analytique Globale (RRAG)

Il est possible d'utiliser une description unifiée pour décrire le système hybride à tous les modes de fonctionnement. Dans le langage de modélisation par BGH, on rappelle qu'une jonction contrôlée de type à l'état OFF applique aux variables de puissances respectives une valeur zéro à leur liens connectés d'une manière adjacente.

D'après cette propriété, la méthode de chemin causal peut être étendue sur la base du modèle BGH du diagnostic (BGHD) par l'intermédiaire de la procédure suivante :

1. Définir une variable booléenne a_i qui représente l'état de chaque jonction contrôlée $i = \{1, \dots, q\}$, et soit N le nombre total des capteurs $\{De, Df\}$ modélisés dans le BGH.
2. Soit n_i le nombre total des liens de la jonction contrôlée i . Pour chaque jonction contrôlée i , il existe n_i liens connectés d'une manière adjacente à cette jonction contrôlée. Chaque variable de flux f_i^j pour $j = 1, \dots, n_i$ de n_i liens changés par $a_i f_i^j$ si la jonction considérée est de type 1. De la même manière, chaque variable d'effort e_i^j pour $j = 1, \dots, n_i$ de n_i liens est remplacé par $a_i e_i^j$ dans le cas d'une jonction de type 0.
3. Répéter l'étape 2 jusqu'à ce que toutes les jonctions contrôlées q soient considérées
4. Choisir une jonction BG. La jonction peut être une jonction BG standard ou une jonction contrôlée. Il a été déjà montré par *Ould Bouamama* [34] que les relations constitutives (dites structurelles) des jonctions (1 et 0) constituent les RRAs candidates.
5. Sur la base des relations constitutives de la jonction BG considérée (qui constitue la loi de conservation d'énergie), toutes les variables inconnues de ces relations sont éliminées en utilisant le parcours de chemins causaux des variables inconnues aux variables connues du BGHD. Si toutes les variables inconnues de l'une de ces relations sont résolues, c'est-à-dire, exprimée seulement en termes de variables connues (entrée, variables des capteurs), alors la RRAG est la relation avec ses variables inconnues résolues. Répéter la résolution jusqu'à ce que toutes les relations constitutives des jonctions soient prises en compte
6. Choisir une autre jonction BG ;
7. Répéter l'étape 5 jusqu'à ce que toutes les jonctions du BGHD soient considérées, ou jusqu'à ce que le nombre des RRAGs générées soit égal à N .

L'idée principale de l'introduction des variables booléennes est de modéliser les éliminations des variables d'effort ou de flux en fonction des états ON/OFF des jonctions contrôlées.

En général, une Relation de Redondance Analytique Globale (RRAG) à la forme symbolique suivante (Équation 3.4) :

$$F_l(\theta, a, De, Df, u) \text{ pour } l = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

Où m représente le nombre des RRAs obtenues à partir du BGH du diagnostic (BGHD), $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_p]^T$ représente les paramètres des composants BGHs, p représente le nombre des paramètres BGH utilisé pour décrire le système hybride. $a = [a_1, \dots, a_n]^T$ désigne le mode de fonctionnement du système hybride. u exprime les entrées du système (représenté par des sources d'effort et de flux Se et Sf en BG), De et Df représente respectivement les capteurs de flux et d'effort du graphe.

L'équation (3.4) possède la même forme que la RRA (équation 3.2) pour les systèmes continus mais contient en plus l'information du mode du système hybride notée par la variable booléenne a dans l'équation (3.4). Cette similitude suggère que les algorithmes de détection et d'isolation de défaut déjà développés pour les systèmes continus peuvent être développés sur la base des RRAGs.

Si une RRAG est obtenue à base de la relation constitutive d'une jonction contrôlée ou à partir des relations de ses composants BG connectés d'une manière adjacente, alors la RRAG

serait désactivée si la jonction contrôlée est à l'état OFF (éteinte). Par conséquent, la RRAG ne serait pas en mesure de fournir des informations utiles sur le comportement du système hybride à tous les modes de fonctionnement. Dans ce cas, le nombre total des RRAGs ne serait pas constant à tous les modes. Néanmoins, ce type de RRAG est toujours en mesure de fournir des informations précieuses sur les modes de fonctionnement lorsque la jonction est active.

3.7.2 Analyse de la détectabilité et l'isolabilité des défauts à base de BGH

Les SDHs ont des modes multiples contrairement aux systèmes continus. Cette caractéristique exige que la détectabilité et l'isolabilité des défauts du système sont évaluées à différents modes de fonctionnement pour l'analyse et la conception du système FDI. La caractéristique unifiée des RRAGs permet de générer la matrice de signature de défaut pour chaque mode de fonctionnement.

Avant de présenter la Matrice de Signature de Fautes (MSF) pour les SDHs à partir des RRAGs, certaines définitions utiles pour décrire les différents degrés de détectabilité et d'isolabilité de défauts sont brièvement présentées ci-dessous :

Définition 3.1

Un paramètre θ_i est dit détectable à tous les modes si le paramètre est détectable à tous les modes de fonctionnement. Cette définition fait référence à un paramètre qui est détectable à tous les modes.

La définition 3.1 définit une forte propriété du diagnostic de défaut.

Certaines notions moins fortes peuvent être résumées dans ce qui suit :

Définition 3.2

Un paramètre θ_i est dit faiblement détectable s'il existe un mode tel que le paramètre est détectable.

Définition 3.3

Un paramètre θ_i est dit à tous les modes non détectables si le paramètre est indétectable à tous les modes de fonctionnement.

La définition 3.2 fait référence aux paramètres qui sont détectables à certains modes et n'ont pas à tous les modes. D'autre part, la définition 3.3 fait référence à des paramètres qui sont non détectables pour tous les modes. De la même manière, les définitions pour l'isolabilité des défauts sont définies de la manière suivante :

Définition 3.4

Un paramètre θ_i est dit isolable si le paramètre est isolable à tous les modes de fonctionnement.

Définition 3.5

Un paramètre θ_i est dit faiblement isolable s'il existe un mode où le paramètre est isolable, c'est à dire, pour que le paramètre θ_i soit faiblement isolable, il faut qu'il soit isolable au minimum dans un mode. Dans ce cas, le paramètre θ_i est dit faiblement isolable.

Définition 3.6

Un paramètre θ_i est dit non isolable à tous les modes si le paramètre est non isolable à tous les modes de fonctionnement.

Avec ces définitions, la détectabilité et l'isolabilité de chaque paramètre peut être caractérisée.

Dans [27, 33]; les RRAGs et la structure du BGH sont exploités par *Low, Chang Boon & al.* et dans [46] par *Wang, Danwei & al.* afin de déduire la détectabilité et l'isolabilité de défaut pour chaque paramètre.

Propriété 3.1

Si un composant est connecté d'une manière adjacente à une jonction contrôlée, alors tous les paramètres des composants ne sont pas détectables à tous les modes et aussi ne sont pas isolables à tous les modes.

Propriété 3.2

Si un composant est connecté d'une manière adjacente à une jonction contrôlée, alors le composant est non détectable à tous les modes de fonctionnement lorsque la jonction contrôlée est à l'état OFF.

De la même manière de la génération de la matrice de signature de fautes (MSF) pour les systèmes continus, la MSF pour les SDHs est obtenue à partir des RRAGs.

La MSF de mode a est donnée par la TABLE 3.2 dans le cas de m RRAGs.

TABLE 3.2 – Matrice de Signature de Fautes(MSF) au mode a

Mode a	r_1	. . .	r_m	D_b	I_b
θ_1	1 ou 0				
.					
.					
.					
θ_p					

La détectabilité et l'isolabilité des paramètres peuvent être déterminées pour chaque mode. Si un composant est faiblement détectable ou isolable à tous les modes, alors le composant est dit détectable à tous les modes ou isolable à tous les modes. La détectabilité de tous les modes d'un paramètre peut être directement déduite par la vérification de F_l pour $l = 1, \dots, m$. Une

condition suffisante pour ce test est la suivante :

Propriété 3.3

Un paramètre θ_i est dit détectable à tous les modes si pour chaque mode, il existe un $l = 1, \dots, m$ tel que F_l dépend de θ_i .

Les RAAGs qui sont générées à partir des relations constitutives des jonctions contrôlées peuvent être ignorées aux modes correspondants lorsque les jonctions sont inactives.

Exemple :

La FIGURE 3.4 représente un système hybride : un circuit électrique qui se compose de deux résistances R_1, R_2 , deux condensateurs C_1, C_2 , une source V_{in} , deux détecteurs d'effort De_1, De_2 et un interrupteur Sw permettant le changement de mode du système.

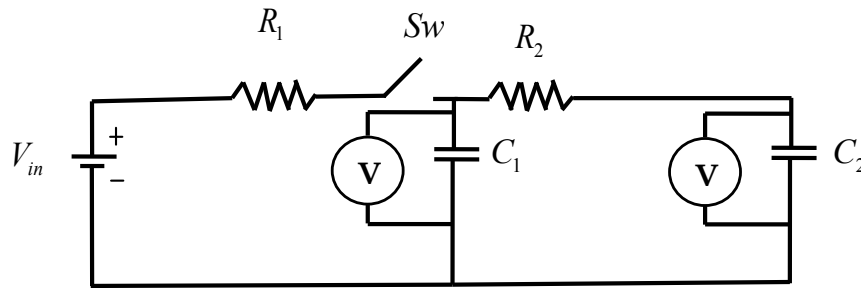


FIGURE 3.4 – Exemple d'un système hybride : Circuit électrique

Le modèle BGH est donné par la FIGURE 3.5 :

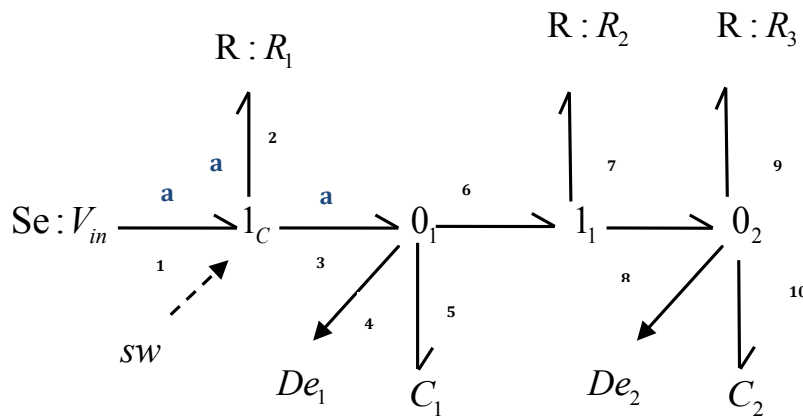


FIGURE 3.5 – Modèle Bond Graph Hybride du circuit électrique

En appliquant la procédure d'attribution de causalité (SCAPH) pour les SDHs, le modèle BGH du diagnostic (BGHD) est donné par la FIGURE 3.6 :

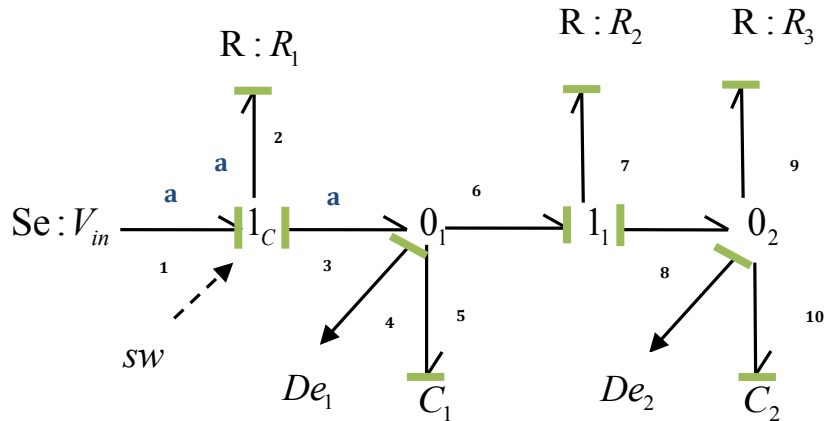


FIGURE 3.6 – Modèle Bond Graph Hybride du diagnostic (BGHD) du circuit électrique

Les relations constitutives des jonctions 1_C , 1_1 et 0_2 (et qui représentent les RRAGs candidates) sont données respectivement par les équations suivantes (Équations 3.5 -3.7) :

$$e_1 - e_2 - e_3 = 0 \quad (3.5)$$

$$af_3 - f_6 - f_5 = 0 \quad (3.6)$$

$$f_8 - f_9 - f_{10} = 0 \quad (3.7)$$

Avec $a \in \{0, 1\}$ exprime le changement de mode du système hybride, a est une variable booléenne qui représente l'état de la jonction contrôlée 1_C .

Le modèle BGH du circuit est donné par la Figure 3.5 où la jonction contrôlée 1_C modélise l'élément de commutation du circuit électrique.

Les variables inconnues sont éliminées par la méthode des chemins causaux, ces derniers sont des représentations graphiques montrant explicitement la relation entre les variables du système sur la base du concept de la causalité.

f_3 , f_5 , f_6 , f_8 , f_9 , et f_{10} sont des variables inconnues et sont éliminées sur le graphe par un parcours du chemin causal de la variable inconnue à une variable connue (capteur ou source d'effort ou de flux) comme suit :

$$f_3 = ?$$

f_3 est éliminé par le chemin causal suivant :

$$Se : V_{in} \longrightarrow e_1 \longrightarrow e_2 \longrightarrow R_1 \longrightarrow f_2 \longrightarrow f_3$$

f_3 sera déduite de l'équation de conservation de l'énergie autour de la jonction 1_C

$$f_1 = f_2 = f_3$$

$$e_1 - e_2 - e_3$$

$$\text{Donc : } f_3 = f_2 = \frac{1}{R_1} \cdot e_2$$

$$f_5 = ?$$

$$De_1 \longrightarrow e_4 \longrightarrow C_1 \longrightarrow f_5$$

$$f_5 = C_1 \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_1$$

$$f_6 = ?$$

$$De_1 \longrightarrow e_4 \longrightarrow C_1 \longrightarrow f_5 \longrightarrow f_6$$

$$1_1 : f_6 = f_7 = f_8 = \frac{1}{R_2} \cdot De_1$$

$$f_8 = \frac{1}{R_2} \cdot De_1$$

$$f_9 = ?$$

$$De_2 \longrightarrow e_{10} \longrightarrow C_2 \longrightarrow f_{10} \longrightarrow f_9 \longrightarrow R_3$$

$$f_9 = \frac{1}{R_3} \cdot De_2$$

$$f_{10} = ?$$

$$De_2 \longrightarrow e_{10} \longrightarrow C_2 \longrightarrow f_{10}$$

$$f_{10} = C_1 \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_2$$

En remplaçant les variables inconnues par leurs expressions dans les équations (3.6),(3.7), les deux RRAGs candidates sont ensuite exprimées par les deux équations (3.8),(3.9) :

$$RRAG_1 = a \cdot \frac{1}{R_1} \cdot De_1 - C_1 \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_1 - \frac{1}{R_2} \cdot De_1 \quad (3.8)$$

$$RRAG_2 = \frac{1}{R_2} \cdot De_1 - \frac{1}{R_3} \cdot De_2 - C_2 \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_2 \quad (3.9)$$

Ces deux RRAGs sont valables à tous les modes de fonctionnement en fonction de l'état de la variable a .

La matrice de signature de fautes (MSF) pour les SDHs est déduite selon les deux valeurs possibles de la variable booléenne a . Donc pour cet exemple, il y a deux tables de signature de défauts (TABLE 3.3 et TABLE 3.4) ; la première est pour $a = 1$ et la deuxième pour $a = 0$.

La TABLE 3.5 montre que les composants R_2, R_3, C_1 , et C_2 sont détectables à tous les modes,

par contre V_{in} est non détectable et R_1 est faiblement détectable au mode $a = 1$. Les composants V_{in}, R_1, R_3 et C_2 sont non-isolables, C_1 est faiblement isolable au mode $a = 0$ et R_2 isolable à tous les modes.

TABLE 3.3 – Matrice de Signature de Faute au mode a=1

$a = 1$	$RRAG_1$	$RRAG_2$	D_b	I_b
$Se:V_{in}$	0	0	0	0
R_1	1	0	1	0
R_2	1	1	1	1
R_3	0	1	1	0
C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0

3.8 Algorithmes de diagnostic robuste

La robustesse d'un système de diagnostic de défaut signifie qu'elle doit être sensible uniquement aux défauts, même en présence des différences du modèle réel (par exemple ; variations de paramètres et perturbations). En général, les variations paramètres et les perturbations agissent sur un processus réel d'une manière incertaine, ainsi il sera difficile de concevoir un système de diagnostic de défaut qui est très sensible aux défauts, et insensible aux incertitudes et aux perturbations non modélisées.

L'utilisation des BGHs pour la modélisation et le diagnostic pour les SDHs par rapport aux méthodes classiques c'est-à-dire les méthodes étendues des systèmes continus et /ou discrets présente l'avantage dans le fait que l'outil BGH n'a pas besoin d'énumérer tous les modes du système tandis que les méthodes classiques ont besoin d'effectuer une pré-énumération de tous les modes possibles dans le système.

Dans [136], une méthode de diagnostic FDI pour les SDHs est développée par *S. Narasimhan*, elle aborde les défauts paramétriques brusques et intègre les méthodes qualitatives et quantitatives [241]. Le mode actuel du système est estimé par un observateur hybride. Cet observateur utilise un filtre de Kalman, qui estime les variables d'état dans le mode actuel, et un détecteur

TABLE 3.4 – Matrice de Signature de Faute au mode a=0

$a = 0$	$RRAG_1$	$RRAG_2$	D_b	I_b
$Se:V_{in}$	0	0	0	0
R_1	0	0	0	0
R_2	1	1	1	1
R_3	0	1	1	0
C_1	1	0	1	1
C_2	1	1	1	0

TABLE 3.5 – Surveillance des composants du système électrique

θ	DéTECTABILITÉ	ISOLABILITÉ
$Se:V_{in}$	Non-déTECTABLE	Non-Isolable
R_1	Mode a=1	Non-Isolable
R_2	Tous les modes	Tous les modes
R_3	Tous les modes	Non-Isolable
C_1	Tous les modes	Mode a=0
C_2	Tous les modes	Non-Isolable

de changement de mode afin de décider quel est le mode actuel(existant). Les changements de mode sont supposés être des signaux de commande observables ou des événements autonomes causés par les variables du système traversant les valeurs limites.

Les travaux de *M. J. Daigle & al.*, étendent la méthodologie du transcendent hybride [136] pour tenir compte des défauts discrets. Par ailleurs, un diagnostiqueur à base d'événements qui est entraîné par la séquence de déviations et les événements de changement de mode contrôlé a été présenté ainsi avec la notion et les conditions suffisantes pour la diagnosabilité dans ce cadre. Les deux défauts paramétriques et discrets ont été traités. Les défauts paramétriques sont également supposés brusques et persistants comme dans le cas du travail de *M. J. Daigle & al.* [242], et une hypothèse du défaut unique est supposée. L'efficacité de cette approche a été testée sur un banc d'essai qui représente un système de distribution d'énergie au Centre national de recherche de l'aviation et de l'espace NASA.

Dans [32], *R. Levy & al.*, combine entre les notions de RRAG et matrice de la signature de changement de mode présentées dans [94] avec une approche de surveillance discrète comme dans [243]. Le résultat de cette combinaison est une méthode de diagnostic efficace pour les SDHs tenant compte des défauts paramétriques et défauts discrets et elle est entraînée par des événements observables. Le composant principal de cette approche est un nouveau diagnostiqueur de mode. Ce travail [32] a été basé sur le développement d'un nouveau diagnostiqueur et sa capacité à détecter et isoler les défauts discrets.

En comparaison avec le travail de *Daigle & al.* [242, 141] où le diagnostiqueur et le module d'isolation de défaut sont fondés sur une approche qualitative, par contre le diagnostiqueur de mode présenté dans [32] est actionné par des signaux contrôlés et des signatures de changement de mode, en utilisant une approche quantitative. Les signatures sont extraites de la matrice de signature de changement de mode (MSCM) et ce concept est propre à la méthode RRAG.

L'approche quantitative a permis une détection et une isolation efficace des différents types de défauts paramétriques (brusque, naissant, et intermittent), et elle ne se limite pas à des défauts brusques et persistants. De plus, les écarts de mesure nécessaires dans l'approche qualitative sont parfois masqués par les contrôleurs en boucle fermée.

Les systèmes de reconfiguration avec des différentes stratégies de contrôle (dans le but de faire face aux défauts et différentes conditions) peuvent être considérés comme des SDHs. Un exemple d'application [244] concerne l'implémentation d'une loi de commande pour un véhicule autonome intelligent sur-actionné changeant de mode en raison de défauts actionneurs. Un autre exemple est présenté dans [245], où une stratégie de contrôle de robots à pattes multiples et la commutation entre les modes en raison d'une défaillance de l'articulation immobilisé du robot.

Dans [28], *S. A. Arogeti & al.*, présentent un système de diagnostic quantitative appliqué sur un système mécatronique à savoir un système de direction d'un véhicule électrique. Cette méthode propose une solution systématique qui traite des défauts naissants et paramétriques brusques, défauts capteurs, et les modes de défaillance dans un cadre unique de surveillance. Les modes de défaillance sont détectés, isolés et identifiés par la capacité de suivi de mode inhérent (intrin-

sèque). Les défauts paramétriques, brusques et naissants, sont détectés, isolés et estimés. Cette méthode est basée sur la notion de RRAG, Six scénarios de défaut différents ont été introduits, et les résultats expérimentaux montrent l'efficacité et la faisabilité de la méthode.

Les événements discrets forcent le système au passage d'un mode vers un autre, ces changements sont considérés comme des changements de modes. Certains événements discrets sont connus (par exemple initiés par un contrôleur de supervision) et d'autres sont inconnus (par exemple ; déclenchés par les états continus mesurés). Pour une méthode FDI à base de modèle pour les systèmes considérés hybrides, les principaux obstacles sont les événements non-observables (par exemple ; ceux causés par les entrées discrètes inconnues) et les dynamiques discrètes inconnues. Dans de tels cas, les changements de modes imprévus et non mesurés peuvent se produire dans un ordre quelconque et à tout moment.

Dans le cas d'un changement de mode inobservable, le modèle continu (utilisé pour la surveillance) n'est plus valable pour le système surveillé. Par conséquent, les résidus utilisés pour diagnostic FDI à base de modèle présentent un comportement anormal qui peut être interprété comme deux phénomènes différents, à savoir, en tant que défaut composant ou un changement de mode.

Dans un système de surveillance pour les SDHs, il est nécessaire de faire la distinction entre ces deux scénarios et à estimer un nouveau mode du système surveillé dans le cas d'un changement de mode. Dans [246], une méthode est proposée pour le suivi de mode des SDHs. Parmi les avantages de cette méthode ; un modèle dynamique discret n'est pas exigé, et une analyse systématique sur la base des BGHs. Si la faute du système peut être modélisée comme le mode du système, ce défaut peut être détecté par le suiveur de mode. La méthode a prouvé son efficacité par une implémentation sur un banc d'essai [246].

Dans le travail de *S. McIlraith & al.* [247] : les défauts paramétriques ont été également abordés dans les SDHs où les techniques du diagnostic qualitative des systèmes continues sont exploités, ainsi l'estimation des paramètres et les techniques d'ajustement des données sont utilisées pour l'évaluation et la comparaison des tests de diagnostic.

Une méthode à base de modèle intégré est développée pour le diagnostic des deux défauts paramétriques et discrets dans les SDHs [214]. Ce travail étend les travaux précédents du diagnostic des défauts paramétriques pour les SDHs [248, 136] en incluant des défauts discrets, ce qui entraîne une méthodologie de diagnostic hybride unifiée, pour cela un cadre de modélisation hybride intégré et compact est établi à l'aide du formalisme BGH [100] qui peut représenter à la fois les défauts paramétriques et discrets. Cette approche est appliquée sur un système hybride réel, et les techniques sont démontrées à l'aide des expériences effectuées directement sur le banc d'essai.

Dans [249], *R. Levy & S. Arogeti* étendent le travail développé par *S. Arogeti & al.* par l'intégration d'un modèle de système à événement discret et le BGH de façon que les deux défauts paramétriques et discrets soient efficacement surveillés dans un cadre unifié. La méthode est basée sur un diagnostiqueur comme dans [243] pour tracer les modes de systèmes, mais contrairement à [243] le nouveau diagnostiqueur intègre l'information des résidus continus. Ces résidus représentent la cohérence des variables attendus et les variables continues mesurées, et permettent l'implémentation du concept du diagnostic à partir de [243] aux SDHs (tandis que la

méthode présentée dans [243] considère les systèmes avec les dynamiques discrètes seulement). Les performances de la nouvelle méthode de surveillance sont implémentées sur un banc d'essai. Dans ce banc d'essai, le diagnostic des défauts discrets relatives au comportement discret du relais, ainsi que les défauts paramétriques liés au processus de charge des batteries, est démontrée.

Plus récemment, d'autres chercheurs ont abordé le problème du diagnostic robuste à base de modèle BG pour les SDHs, parmi eux on trouve dans la littérature les travaux de *W. Borutzky*. L'auteur a développé récemment dans [250], une méthode pour dériver les RRAs à partir du BG pour les SDHs où les éléments de commutation sont représentés par un transformateur booléen contrôlé et une résistance en causalité conductance fixée [250]. Cette représentation a été initialement introduite par *Ducreux & al.* dans [251].

L'avantage de l'approche proposée dans [36] du diagnostic pour les SDHs est que la causalité statique (fixe) peut être affectée par l'algorithme SCAP non-modifié et que les RRAs peuvent être dérivées pour tous les modes de fonctionnement du système.

Et dans [252], une représentation BG à causalité fixe de modèle du système hybride est utilisée où les causalités sont indépendantes des modes de fonctionnement du système et attribuées selon la procédure d'affectation de causalité standard (connue sous l'expression anglaise : Standard Causality Assignment Procedure (SCAP)). Les modes de fonctionnement sont pris en compte par le module de transformateur dans un ensemble unique d'équations de mouvement. Cette approche a été utilisée pour le diagnostic de défaut dans un redresseur triphasé, les RRAs sont calculées dans une simulation hors ligne comme une partie d'un système d'équations algébriques différentielles en utilisant un modèle BG du système défectueux au lieu du système réel et le couplant à un BG du (système sans défaut) à l'aide d'un ensemble de résidus connus par l'expression : *residual sinks*.

Les Commutateurs connectent et déconnectent les parties du modèle temporairement, par conséquent, certains éléments de stockage indépendants peuvent devenir dépendants temporairement de sorte que le nombre de variables d'état n'est pas constant dans le temps. Ce problème a été abordé dans le cadre de la modélisation et la simulation des scénarios des défauts dans les SDHs par le même auteur dans [107], les résidus introduits en [252] nommés (*residual sinks*), sont utilisés afin de garder la causalité intégrale préférée invariante dans le temps au niveau des ports de stockage. Lorsque deux éléments de stockage deviennent dépendants à une occurrence de temps de commutation t_s , un résidu est activé. Il exige que les sorties des deux éléments de stockage dépendants deviennent aussitôt égaux en imposant la variable de puissance conjuguée de la valeur appropriée sur leur entrée. Cette approche est illustrée par la modélisation BG et la simulation de certains scénarios de défaut sur un onduleur de puissance commuté triphasé standard fournissant la puissance dans une charge RL dans une configuration delta. Dans le travail [107], les RRAs ont été calculées numériquement par couplage d'un BG du système avec défaut à l'un des systèmes non-défectueux à l'aide des résidus (*residual sinks*).

Dans [107], une méthode à base de BG quantitative pour la détection et l'isolation des défauts pour les SDHs est présentée à partir d'une représentation BG à causalité invariante dans le temps unique d'un modèle hybride. Le travail [107], est fondé sur une proposition connue depuis longtemps afin de modéliser les éléments de commutation par un transformateur modulé à l'aide d'une variable et une résistance en causalité conductance fixe représentant sa résistance

ON (à l'État ON). Un ensemble unique de relations de redondance analytiques valables pour tous les modes du système physiquement réalisables peuvent être obtenues automatiquement à partir du modèle BG. Les équations du modèle fixes (rigides) en raison de faibles valeurs de la résistance ON dans le modèle de commutateur peuvent être évitées par la reformulation symbolique des équations et en laissant la résistance ON de certains commutateurs tendant vers zéro, les transformant en commutateurs idéaux.

Dans la méthode proposée dans [107], l'approche proposée pour la génération des RRAs est identique à celles obtenues [33] à partir d'un modèle BGH avec des jonctions contrôlées et l'utilisation de la procédure d'affectation de causalité SCAP pour la détection et l'isolation des défauts.

En outre, l'intérêt de l'approche proposée est appliqué sur des circuits de commutation standards largement utilisés dans les systèmes d'électronique de puissance, une simulation des scénarios de certains défauts est aussi présentée. Cependant, cette approche n'est pas limitée seulement à la détection et l'isolation de tels systèmes. Les résultats de simulations obtenues sont validés analytiquement à l'aide d'un programme *Scilab*.

Dans [36], *W. Borutzky*, introduit une méthode de détection et d'isolation de défauts basée sur le BG incrémental étendu aux SDHs pour la modélisation. Dans le but d'éviter les fausses alarmes et d'assurer la robustesse par rapport aux incertitudes paramétriques du système de diagnostic, des seuils bien choisis et adaptés pour l'évolution temporelle des résidus et les différents modes de fonctionnement sont utilisés. Cette méthode de diagnostic présentée tient compte des incertitudes paramétriques et du changement du mode discret, la méthode a été appliquée sur un système hybride électrique : (convertisseur) utilisé dans l'électronique de puissance composé d'élément de commutation. L'auteur a montré que le BG incrémental peut être utilisé pour la détermination des seuils adaptatifs des RRAs, ces seuils sont générés à partir d'un modèle du modèle BG incrémental du diagnostic, ce dernier peut être systématiquement généré à partir du modèle BG incrémental initial, où les éléments BGs sont remplacés par leur modèle incrémental.

La partie incertaine des résidus (robustes aux incertitudes paramétriques) du système hybride, peut être obtenue en ajoutant les efforts ou flux respectivement aux jonctions. Les variations résultantes des résidus sont utilisées pour définir les seuils adaptatifs, Ils sont une somme des termes de valeur absolue. En général, certains termes sont multipliés par le module d'un transformateur commandé par une variable booléenne de sorte que les seuils sont dépendants du mode du système.

Le travail de *W. Borutzky* [39], est l'extension du travail développé en [36], par l'introduction des incertitudes de mesures sur le modèle bond graph nominal.

Dans [39], il est démontré comment les RRAs dérivées d'un BG d'un système à commutation à causalité fixe peut être utilisé pour l'identification du mode du système. L'application a été réalisée sur un circuit *Convertisseur Buck* et les simulations réalisées sur un logiciel *open source Scilab* [253].

Dans [185], *S. K Ghoshal & S. Samanta*, une méthode de diagnostic à base de modèle BG

fondée sur la méthode de *B. Ould Bouamama & al.* [34] pour la génération des RRAs (indicateurs de fautes) et la contrôlabilité, l'analyse de l'isolabilité des défauts et sur la méthode de *C. S Kam & G.D Tanguy* [254, 9] pour l'étude de l'étude de la robustesse. Une simulation parallèle à l'aide du modèle multi-blocs est utilisé pour isoler structurellement les défauts non isolables, une application a été faite sur un mécanisme de levage d'un véhicule.

Et dans [40], *S. K Ghoshal & al.*, développent une méthode quantitative de diagnostic robuste pour un système hybride présentant des changements du mode discret en combinant les pseudo-BG [255] et la forme LFT [254, 9], l'application a été faite sur un système Thermo-fluide hybride avec des défauts brusques, les RRA Généralisées, obtenues à partir du modèle BG du diagnostic, valables à tous les modes et robustes aux incertitudes paramétriques. La forme LFT est utilisée pour la génération des seuils adaptatifs en fonction du comportement transitoire de système (mesures) et les limites spécifiées sur les incertitudes paramétriques.

Le travail présenté par [40] consiste à concevoir un système de diagnostic basé pour un système hybride faisant intervenir deux domaines différents (système Thermo-Fluide), par conséquent, le produit effort-flux ne représente pas une puissance d'où l'utilisation des Pseudo-BG, ces derniers sont utilisés afin de modéliser le système hybride et la forme LFT afin de représenter les incertitudes paramétriques sur le modèle BG pour le test de la robustesse.

Dans le travail présenté dans cette thèse [37, 38], le système hybride utilisé est un système hybride avec des changements de modes discrets, le système utilisé représente uniquement un aspect hydraulique, le formalisme de modélisation BGH utilisant les jonctions contrôlées est utilisé afin de modéliser les changements de mode discret, quant à la forme LFT [254, 9], elle est utilisée afin de représenter les incertitudes paramétriques sur le modèle BGH, d'où le modèle résultant représente le modèle BGH-LFT, ce dernier est mis en causalité dérivée qui va servir à générer les résidus et les seuils adaptatifs nécessaires à l'étape de diagnostic.

3.8.1 Aperçu sur la robustesse des résidus et les seuils adaptatifs

1. Robustesse des résidus

La sensibilité des paramètres des résidus peut être remarquée (distinguée) par la définition des seuils appropriés puisque le comportement dynamique d'un système réel décrit par un modèle hybride peut être dans des modes différents du système ; les seuils doivent être adaptés aux modes du système.

Si les RRAs peuvent être obtenues sous forme symbolique fermé (closed symbolic form), la sensibilité peut être déterminée par une différenciation symbolique par rapport aux paramètres. Si cela est possible, la sensibilité des paramètres des RRAs peut être calculée numériquement en utilisant soit un BG de sensibilité [256, 257, 258, 259] ou bien un BG incrémental [260, 261].

Le BG incrémental a été introduit dans le but de l'analyse de sensibilité dans le domaine fréquentiel des modèles des systèmes linéaires invariant dans le temps (LIT). En plus, ils ont été aussi efficaces dans la détermination de la sensibilité des paramètres des variables d'état et des variables de sortie, les fonctions de transfert du modèle discret ainsi que du modèle inverse et dans la détermination des RRAs (résidus) à partir des modèles en temps continu [262].

Les algorithmes de détection et d'isolation robustes par rapport aux incertitudes paramétriques et de mesures ont été développés respectivement dans [10, 49, 11] et [230, 229, 12, 13] sur la base des BG incertains en utilisant la forme LFT pour les modèles

continus dans le temps.

Les Liens du BG incertain portent les variables de puissances incertaines concernant les variations des paramètres, les éléments BGs sont décomposés en une partie avec les paramètres nominaux et une autre avec les paramètres incertains.

2. Seuils adaptatifs dans le diagnostic robuste

Les efforts pour améliorer la robustesse des algorithmes FDI peuvent être faits à l'étape de prise de décision [263, 264, 265]. En raison des incertitudes paramétriques, perturbations et bruits rencontrés dans les applications réelles, une situation est rare où les conditions pour une génération résiduelle parfaitement robuste. Il est donc nécessaire de fournir une robustesse suffisante non seulement dans la phase de génération résiduelle, mais aussi dans la prise de décision. Lorsque la prise de décision est réalisée robuste contre les incertitudes, on peut parler de *robustesse passive* [266, 267, 268] dans le FDI dans ce cas, il peut ne pas être nécessaire (ou difficile) de construire le résidu robuste. La robustesse passive est donc une alternative à la *robustesse active* qui doit être utilisée lorsque les informations disponibles sont très limitées du système.

L'objectif de la prise de décision robuste est donc de minimiser les taux des fausses alarmes et les alarmes manquantes dues aux effets que l'incertitude de modélisation et des perturbations inconnues auront sur les résidus. Ceci peut être réalisé de plusieurs façons, par exemple, par le traitement de données statistiques, la moyenne, en cherchant et en utilisant le seuil le plus efficace.

Dans des situations pratiques, le résidu n'est jamais nul, même si aucun des défauts apparaît. Un seuil doit être alors utilisé dans l'étape d'évaluation résiduelle. Le seuil doit être fixé plus grand que la plus grande amplitude de la fonction d'évaluation résiduelle pour le cas sans défaut. Le plus petit défaut détectable est un défaut qui entraîne seulement le dépassement du seuil de la fonction d'évaluation résiduelle. Tout défaut qui produit une réponse résiduelle inférieure à cette amplitude est non détectable.

Le choix du seuil n'est pas une tâche facile comme l'a souligné *E. G Gal & al.*[269]. Lorsque les seuils fixés sont utilisés, la sensibilité aux défauts est réduite si le seuil est choisi trop élevé, tandis que le taux de fausse alarme sera trop grand lorsque le seuil est choisie trop faible. Le bon choix du seuil est un problème délicat, *Walker & al.* [269, 270, 271] ont démontré sa réalisation en utilisant la théorie des processus de Markov.

Dans [272, 273, 274], *Ding & Frank* ont proposé un moyen pour calculer la faute minimale détectable dans le domaine fréquentiel, avec l'ensemble de seuil légèrement supérieur que la fonction d'évaluation résiduelle en réponse à la faute minimale détectable. La détermination du seuil dans le domaine temporel est étudiée par *Seliger, R & Frank, PM* [275] et a été également traité par *Frank, PM* [274].

Faitakis & al.[276] ont étudié le calcul des seuils à l'aide des opérations vectorielles et les normes matricielles.

La solution à ces problèmes est d'utiliser des seuils adaptatifs [277] où les seuils varient selon l'activité de contrôle, et le bruit et les propriétés de signalisation de défaut du

système surveillé. Ce concept est illustré en FIGURE 3.7 et montre la forme typique d'un seuil adaptatif pour l'évaluation résiduelle directe.

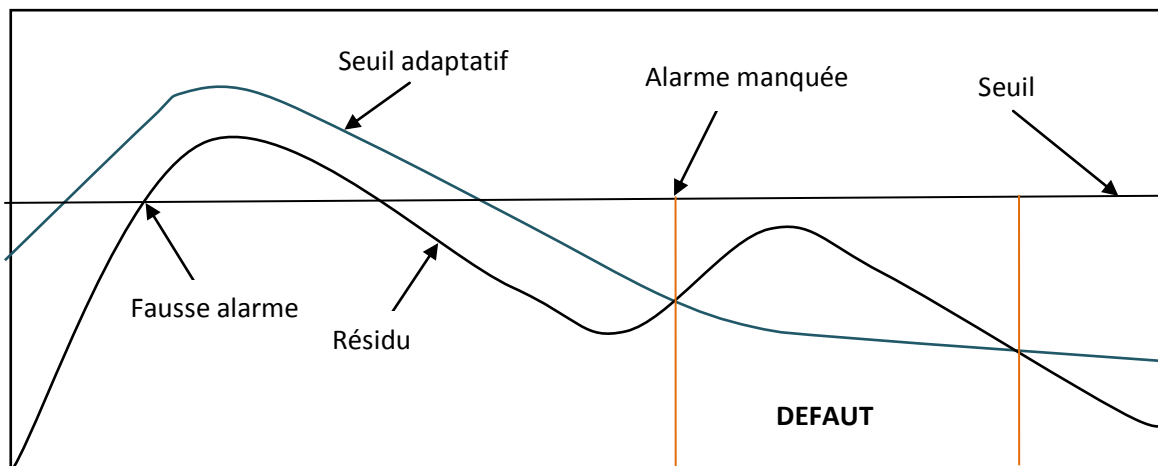


FIGURE 3.7 – Application d'un seuil adaptatif

Une question intéressante est de savoir comment déterminer la forme fonctionnelle de la loi du seuil adaptatif ?. [277] a utilisé une loi d'adaptation empirique, *W.Emami-Naeini & al.* [278, 264] ont proposé la méthode de sélecteur de seuil (ou seuil adaptateur) et *Ding & Frank* [265] ont développé ce concept dans le cadre des approches du domaine des fréquences. Cela a également été développé par *Isaksson* [279].

Toutes les recherches ont montré que le seuil adaptatif peut être obtenu d'une manière systématique et il présente un outil d'analyse et de synthèse des systèmes FDI.

L'efficacité d'un système de diagnostic dépend de précision et le choix de la modélisation du processus surveillé [196].

La forme LFT appliquée au BG a permis : d'une part la génération de résidus robustes et d'autre part le calcul des seuils adaptatifs en fonctionnement normal [10].

3.8.2 Algorithme proposé pour la génération des résidus robustes à base de modèle BGH

1. Génération des résidus robustes

La FIGURE 3.8 présente le principe du système de surveillance robuste proposé à base de modèle BGH-LFT pour la détection et l'isolation des défauts.

Les RAAGs sont utilisées pour la détection et l'isolation Hors ligne des défauts, et pour la génération en ligne des résidus qui sont essentiels dans un système de diagnostic. Par l'extension de l'applicabilité des RRAs, les RRAGs sont bien adaptées dans la théorie des BGs pour les systèmes hybrides. Sur la partie gauche, à partir du modèle à base de BG, un ensemble de résidus est généré par l'évaluation des RRAGs qui devrait être théoriquement nulle en présence d'incertitudes paramétriques des composants. Sur la partie droite, les signaux du système hybride sont collectés par un ensemble de capteurs, et ces signaux sont transmis aux RRAGs pour générer des résidus en temps réel.

Dans le but d'améliorer la procédure de décision de génération, pour éviter de fausses alarmes et les non-détections des seuils adaptatifs tenant compte des incertitudes paramétriques sont générés à partir du modèle bond graph. Cette démarche systématique de conception de système de surveillance est basée sur les propriétés causales, structurelles et comportementales du bond graph. Son aspect graphique permet l'automatisation des procédures de génération d'algorithmes de surveillance, à l'aide d'un outil logiciel dédié.

Deux types de robustesse sont considérés dans la littérature : la robustesse active et la robustesse passive [280, 281]. La robustesse active se focalise dans l'étape de génération de résidus afin de rendre les résidus insensibles aux incertitudes du modèle ou aux perturbations. La robustesse passive se focalise sur l'étape d'évaluation de résidus, par exemple dans le choix des seuils adaptables pour la tâche de détection.

Ainsi, en associant le BG et le principe de la forme LFT, il est possible d'obtenir le comportement physique des systèmes, et l'amélioration de la surveillance par la déduction des résidus et les seuils adaptatifs, pour la détection robuste et l'isolation des imperfections. Les résidus sont analysés pour décider s'il y a ou non présence de défaut, en général, en fonctionnement normal les résidus sont nuls et en présence de défaut, ces résidus sont non nuls. La décision peut s'effectuer à l'aide d'un simple test de dépassement de seuil en utilisant des seuils adaptatifs tenant compte des incertitudes paramétriques du système physique sont générés directement du modèle bond graph, ces seuils sont importants afin d'améliorer les performances de décision dans l'étape de détection.

Le modèle BG-LFT est utilisé pour générer automatiquement les résidus et les seuils adaptatifs du fonctionnement normal ; ces seuils assurent la robustesse aux incertitudes et s'adaptent automatiquement aux changements des modes de fonctionnement

L'utilisation des propriétés de la valeur absolue pour générer les seuils assure la robustesse de cet algorithme aux fausses alarmes.

Dans notre travail, toutes les incertitudes ont été fixées à (5%), des défauts de nature multiplicatives sur les paramètres sont introduits avec une valeur égale (5%) et supérieur (9.4%) afin de montrer la robustesse.

2. Forme générale de la RRAG incertaine

La dérivation des RRAGs à partir du modèle BGH propre, observable et surdéterminé peut être résumée par les procédures suivantes :

- (a) Première étape : Modéliser le système hybride par l'outil BGH basé sur les jonctions contrôlées en tenant compte des changements de mode discret du système hybride.
- (b) Deuxième étape : Vérification de l'état du couplage sur le modèle BGH déterministe en causalité dérivée, si le système est surdéterminé, alors poursuivre les étapes suivantes.
- (c) Troisième étape : l'algorithme d'affectation de causalité SCAPHD permettant l'inversion de la causalité des capteurs est appliqué dans le but d'obtenir le modèle BGH du diagnostic (BGHD).
- (d) Quatrième étape : le modèle BGH-LFT du système hybride incertain est formé en tenant compte des incertitudes paramétriques.
- (e) Cinquième étape : Dériver les RRAGs candidates qui sont robustes et globales à l'aide des équations de jonction :

Pour la jonction 0

$$\sum a_{cj} \cdot b_i \cdot f_{in} + \sum Sf + \sum w_i = 0$$

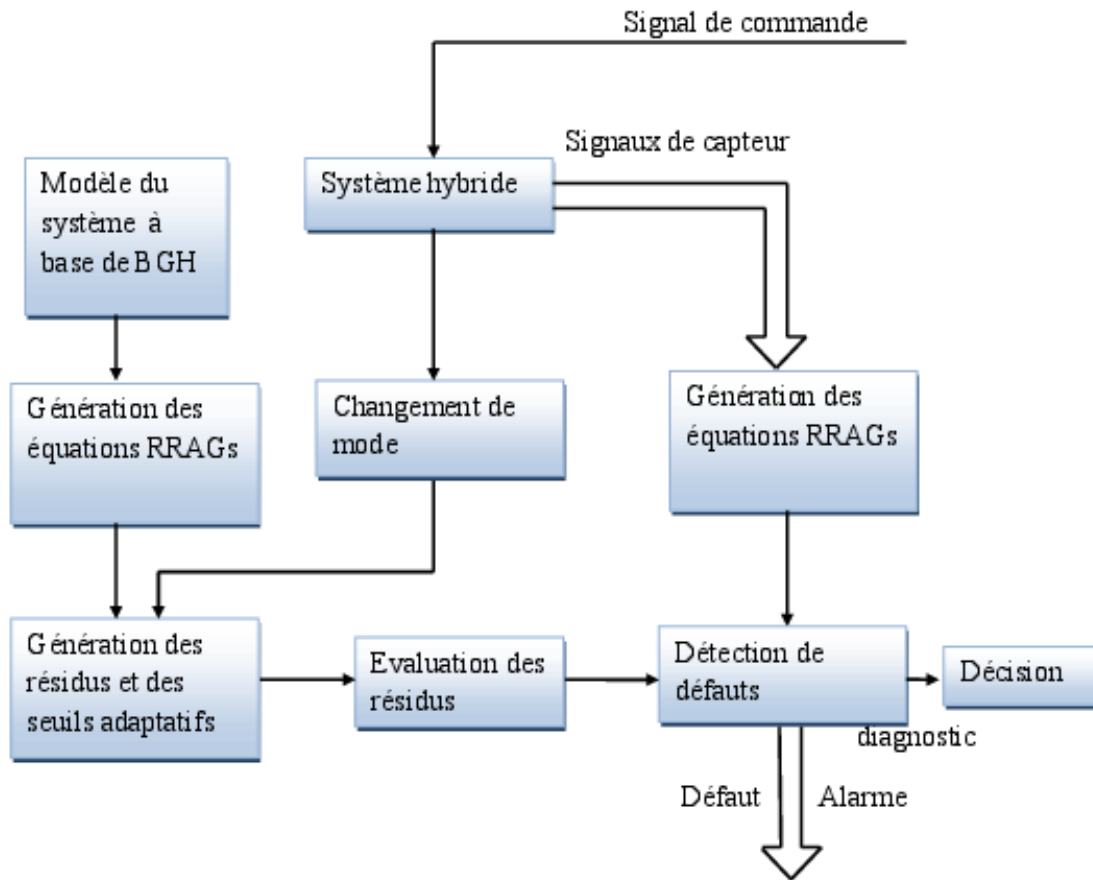


FIGURE 3.8 – Principe du système de surveillance robuste proposé

Et pour la jonction 1

$$\sum a_{cj} \cdot b_i \cdot e_{i_n} + \sum Se + \sum w_i = 0$$

Avec :

a_{cj} Une variable discrète représentant l'état de la jonction contrôlée 1_{cj} ou 0_{cj}

e_{i_n} et f_{i_n} sont les variables inconnues.

i c'est le nombre des liens connectés à la jonction et $b = \pm 1$ en fonction de l'orientation de la demi flèche.

(f) Sixième étape : les variables inconnues des RRAGs candidates sont éliminées par

le parcours des chemins causaux de la variable inconnue vers une variable connue (mesures et entrées) [49]

(g) Septième étape : écrire les RRAGs candidates sous la forme suivante :

$$RRAG : \phi \left(\sum Se, \sum Sf, a_{cj}, De, Df, \tilde{D}e, \tilde{D}f, \sum w_i, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n, \right)$$

Avec

TF_n et GY_n sont, respectivement, les valeurs nominales des jonctions TF et GY .
 R_n, C_n, I_n et RS_n sont les valeurs nominales des éléments des éléments R, C, I et RS .

a_{cj} est une variable discrète représentant l'État de la jonction contrôlée 1_{cj} ou 0_{cj} .
 $\sum w_i$ est la somme des entrées modulées correspondantes à des incertitudes sur les éléments.

Ces RRAGs [37, 38], générées sont incertaines et globales et elles se composent de deux parties parfaitement séparables ; l'utilisation de la valeur absolue permet la robustesse aux fausses alarmes [282] de cette méthode.

3. Génération des seuils adaptatifs

Les RRAGs candidates générées sont composés de deux parties séparées à cause de l'utilisation de la forme LFT ; une partie nominale :

$$r = \phi \left(\sum Se, \sum Sf, a_{cj}, De, Df, \tilde{D}e, \tilde{D}f, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n, \right)$$

et une autre partie incertaine :

$$a = \sum |w_i|$$

Tel que : $w_i = \phi \left(De, Df, \tilde{D}e, \tilde{D}f, R_n, C_n, I_n, TF_n, GY_n, RS_n, \delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_{RS}, \delta_{TF}, \delta_{GY}, \right)$

Avec : $\delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_{RS}, \delta_{TF}$ et δ_{GY} sont respectivement, les valeurs des incertitudes multiplicatives sur les éléments R, C, I, RS, TF et GY .

Ces deux parties peuvent se mettre sous la forme suivante :

Dans le cas d'une jonction de type 1

$$\begin{cases} r &= \sum a_{cj} \cdot b_i \cdot e_{i_n} + \sum Se \\ a &= |w_i| \end{cases} \quad (3.10)$$

Et dans le d'une jonction de type 0

$$\begin{cases} r &= \sum a_{cj}.b_i.f_{i_n} + \sum Sf \\ a &= |w_i| \end{cases} \quad (3.11)$$

Avec

$$\begin{cases} r &: \text{résidus} \\ a &: \text{seuils} \end{cases} \quad (3.12)$$

Si les valeurs des incertitudes paramétriques ne peuvent pas être quantifiées parfaitement selon [283], ils peuvent être estimés en utilisant les informations disponibles (en ligne) par exemple ; la déviation standard ou la valeur maximale du paramètre.

L'utilisation des valeurs absolues pour génération des seuils du fonctionnement normal assure la robustesse de cet l'algorithme aux fausses alarmes.

La forme LFT permet d'obtenir deux parties séparées l'une de l'autre des RRAGs générées, une partie nominale notée r représente le résidu et une partie incertaine notée a . Cette partie incertaine a de la RRAG est utilisée pour générer les seuils adaptatifs sous une forme d'enveloppe qui contient des résidus en l'absence de défauts ($-a \leq r \leq +a$).

L'incertitude paramétrique peut être constante ou variable et peut varier de façon aléatoire dans un sens positif ou négatif.

La forme BG-LFT permet la génération automatique des résidus et les seuils adaptatifs. Ces seuils adaptatifs permettent la robustesse aux incertitudes et sont automatiquement adaptés aux changements dans les modes de fonctionnement du système. L'outil BG permet de suivre la propagation de l'influence des incertitudes en termes d'effort ou de flux à travers le modèle à l'aide des chemins causaux, par conséquent, il permet une solution pratique au problème de la dépendance des paramètres [49].

Cette méthode de diagnostic robuste pour les SDHs peut être illustrée par la FIGURE 3.9.

Exemple illustratif

En appliquant l'algorithme de génération des RRAGs sur le modèle BGHD mis sous la forme LFT de la figure 2.18 (Chapitre 2), quatre RRAGs peuvent être déduites :

$$RRAG_1 : V_1 - De_1 - R_{n1}.Df + w_{R1} = 0 \quad (3.13)$$

$$RRAG_2 : a_1 - Df - \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - w_{1/R3} - C_{n1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_1 - \left(\frac{1}{R_{n2}}\right) - w_{1/R3} + w_{C1} = 0 \quad (3.14)$$

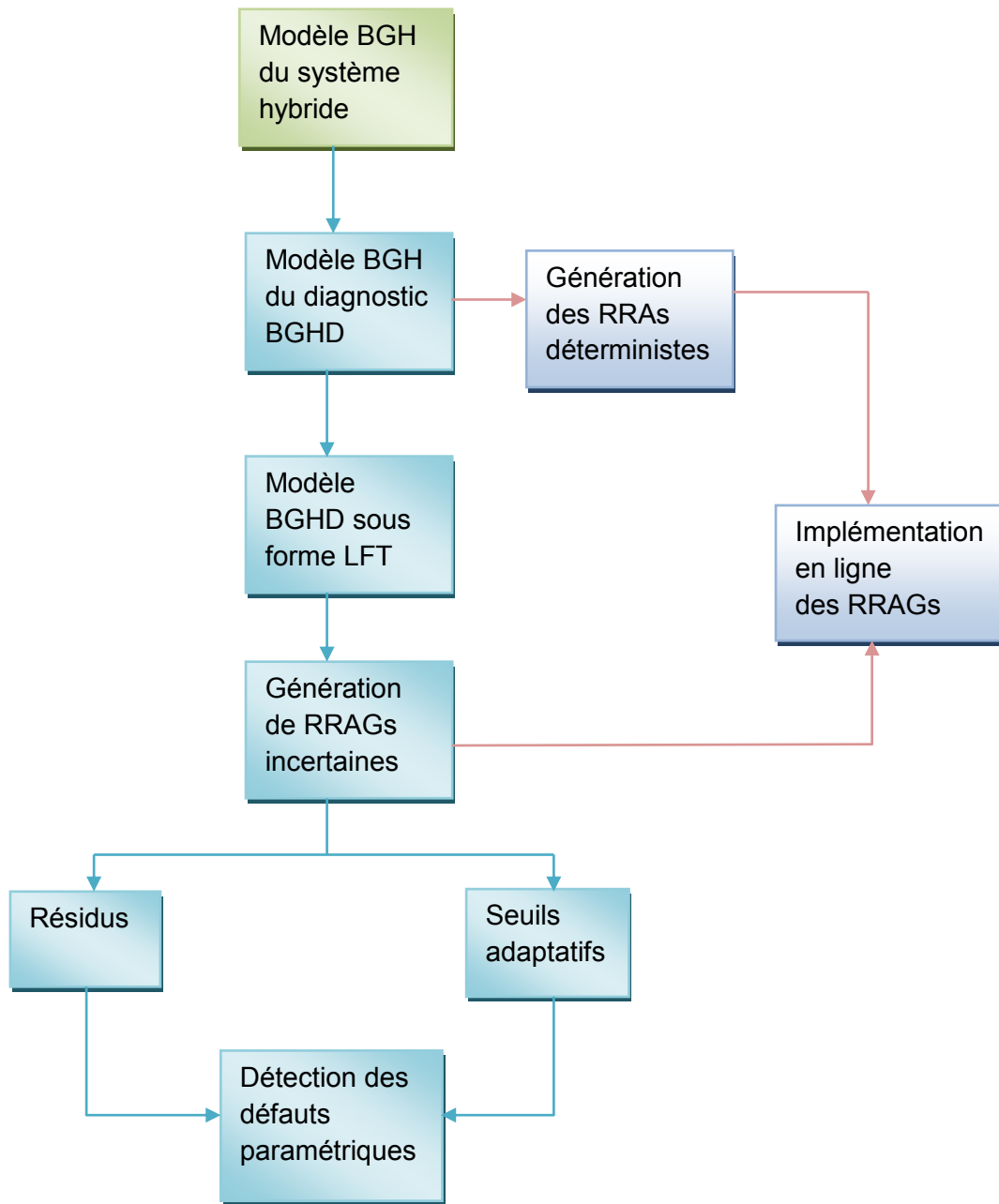


FIGURE 3.9 – Principe de la méthode proposée pour le diagnostic robuste des systèmes hybrides incertains

$$RRAG_3 : \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - w_{1/R3} - a_2 \frac{1}{R_{n4}}(De_2 - De_3) - w_{1/R4} - C_{n2} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_2 - +w_{c2} = 0 \quad (3.15)$$

$$RRAG_4 : a_2 \cdot \frac{1}{R_{n4}}(De_2 - De_3) - w_{1/R4} - \frac{1}{R_{n5}} \cdot De_3 - w_{1/R5} \cdot \frac{1}{R_{n5}} \cdot De_3 = 0 \quad (3.16)$$

Avec :

$w_{R1}, w_{1/R3}, w_{C1}, w_{1/R4}, w_{C2}$ représentent les incertitudes sur les résidus et leurs expressions sont données par les équations suivantes :

$$w_{R1} = -\delta_{R1} \cdot R_{n1} \cdot Df \quad (3.17)$$

$$w_{1/R3} = -\delta_{1/R3} \cdot \frac{1}{R_{n3}} \cdot (De_1 - De_2) \quad (3.18)$$

$$w_{C1} = -\delta_{C1} \cdot C_{n1} \cdot \frac{d}{dt} De_1 \quad (3.19)$$

$$w_{1/R4} = -\delta_{1/R4} \cdot \frac{1}{R_{n4}} \cdot (De_2 - De_3) \quad (3.20)$$

$$w_{C2} = -\delta_{C2} \cdot C_{n2} \cdot \frac{d}{dt} De_2 \quad (3.21)$$

$$w_{1/R5} = -\delta_{1/R5} \cdot \frac{1}{R_{n5}} \cdot De_3 \quad (3.22)$$

Chaque RRAG est composé de deux parties ; une partie nominale et une autre incertaine telle que :

$$RRAG_1 = \begin{cases} r &= V_1 - De_1 - R_{n1} \cdot Df \\ a &= \pm |-\delta_{R1} \cdot R_{n1} \cdot Df| \end{cases} \quad (3.23)$$

$$RRAG_2 = \begin{cases} r &= a_1 - Df - \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - C_{n1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_1 - \left(\frac{1}{R_{n2}} De_1\right) \\ a &= \pm \left| -\delta_{1/Rn3} \cdot \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - \delta_{1/Rn3} \cdot \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - \delta_{C1} \cdot C_{n1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_1 \right| \end{cases} \quad (3.24)$$

$$RRAG_3 = \begin{cases} a &= \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - a_2 \cdot \left(\frac{1}{R_{n4}}(De_2 - De_3)\right) - C_{n2} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_2 \\ r &= \pm \left| -\delta_{1/R3} \cdot \frac{1}{R_{n3}}(De_1 - De_2) - \delta_{1/R4} \cdot (De_2 - De_3) - \delta_{C2} \cdot C_{n2} \cdot \frac{d}{dt} \cdot De_2 \right| \end{cases} \quad (3.25)$$

$$RRAG_4 = \begin{cases} r &= a_2 \cdot \left(\frac{1}{R_{n4}} \cdot (De_2 - De_3)\right) - \frac{1}{R_{n5}} \cdot De_3 \\ a &= \pm \left| -\delta_{1/Rn4} \cdot (De_2 - De_3) - \delta_{1/Rn5} \cdot \frac{1}{R_5} \cdot De_3 \right| \end{cases} \quad (3.26)$$

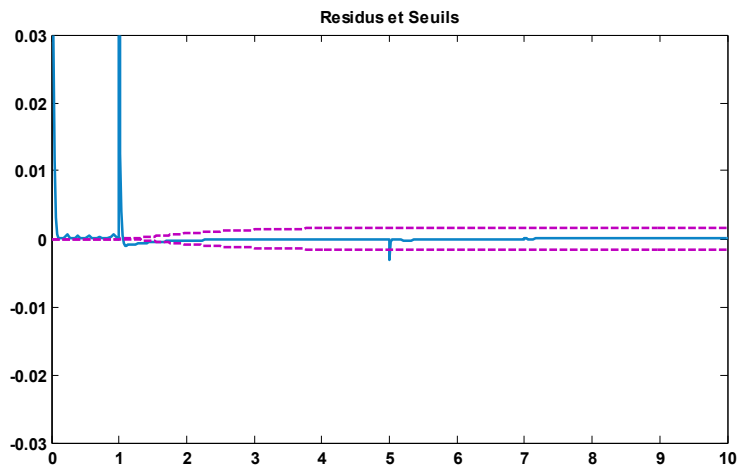
Résultats de simulation

Un défaut de 9.4% est introduit sur les paramètres R_1, R_4 à $t = 5s$ et $t = 7s$ respectivement. Les résultats de simulation sont donnés par la figure 3.10(a)-(b) et figure 3.11(a)-(b) montrant l'efficacité de la méthode de diagnostic.

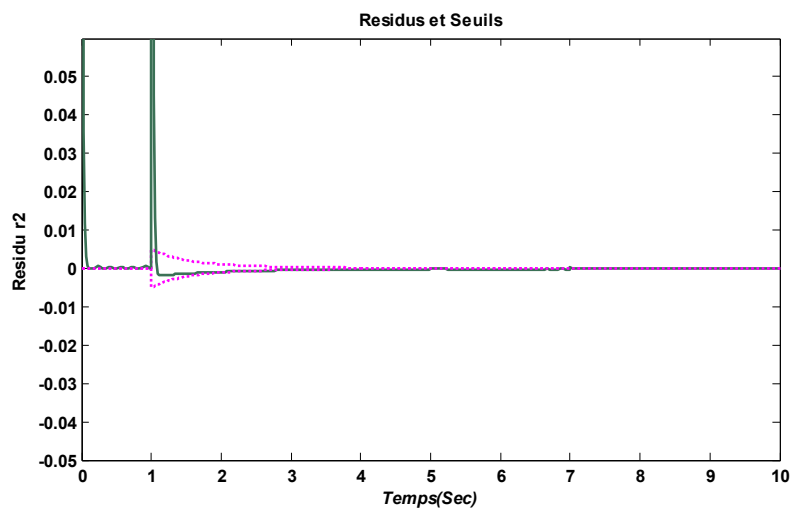
3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, le principe du diagnostic par BG et par BGH est présenté, les différents algorithmes de diagnostic robustes pour les SDHs sont exposés. L'algorithme proposé dans ce chapitre est appliqué sur un circuit électrique, se distingue par rapport aux d'autres méthodes par le fait qu'on a utilisé les jonctions contrôlées afin de modéliser les changements de mode discret. *W. Borutzky* introduit dans son travail [36] introduit dans son travail une méthode de détection et d'isolation de défauts basée sur le BG incrémental (où les éléments BGs sont remplacés par leur modèle incrémental) étendu aux SDHs pour la modélisation et le diagnostic robuste par rapport aux incertitudes paramétriques : les résidus et les seuils sont générés à partir du modèle BG-incrémental du diagnostic. Et dans le travail de *S. K Ghoshal et al.*, [40] une méthode de diagnostic robuste aux incertitudes paramétriques est développée afin d'assurer la robustesse, le modèle hybride utilisé étant composé de deux parties (système Thermofluide), ce dernier est modélisé par les Pseudo-BG.

Notre contribution par rapport aux travaux cités est le fait d'utiliser les BGHs basés sur les jonctions contrôlées sous la forme LFT. Dans le but d'améliorer les performances de décision dans l'étape de détection, une méthode de diagnostic robuste pour les SDHs est proposée, sur la base des propriétés causales structurelles et comportementales de l'outil BG, les RRAGs générées à partir du modèle BG sous la forme LFT se composent de deux parties parfaitement séparables, une partie nominale appelée *résidu* et une autre incertaine appelée *seuil adaptatif* en tenant compte des incertitudes paramétriques et des changements de modes. Le système hybride est modélisé à l'aide du formalisme BGH en utilisant les jonctions contrôlées.

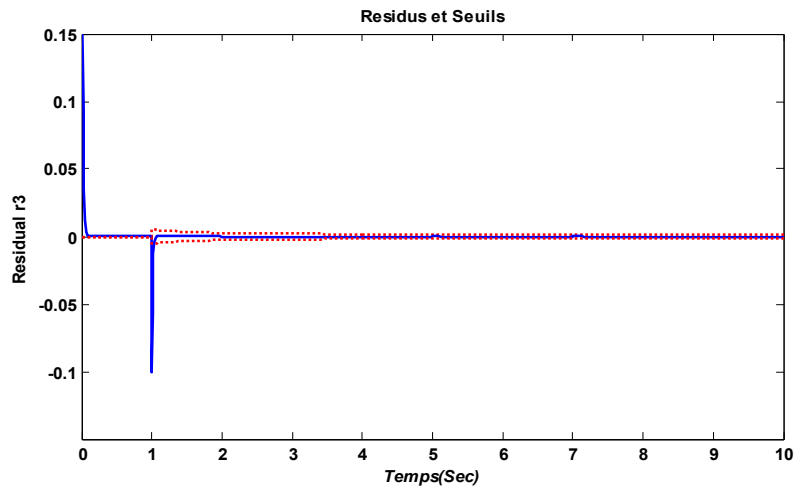


(a)

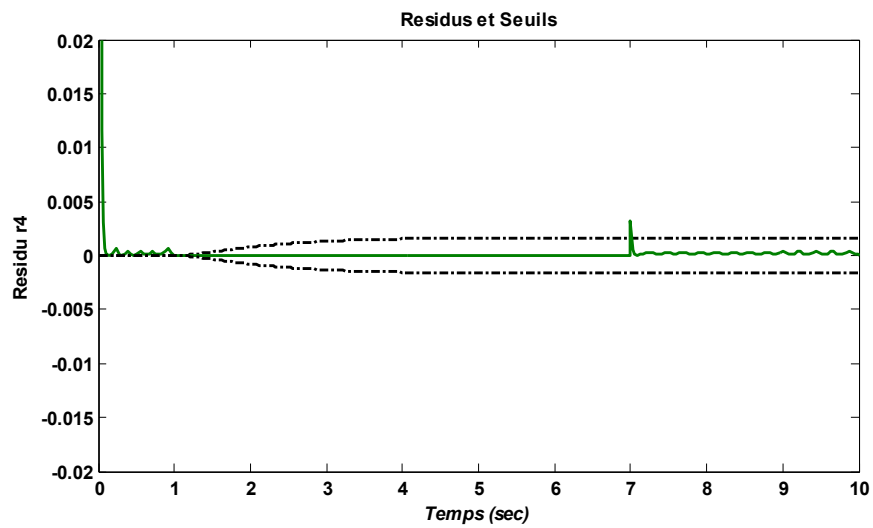


(b)

FIGURE 3.10 – Résidus et seuils de fonctionnement défaillant en présence de défauts. (a) : Résidu r_1 , (b) : Résidu r_2 .



(c)



(d)

FIGURE 3.11 – Résidus et seuils de fonctionnement défaillant en présence de défauts. (c) : Résidu r_3 , (d) : Résidu r_4 .

Chapitre 4

Application à un système hydraulique

Guide de lecture

Dans ce chapitre, est présentée l'application de l'algorithme proposé à un système hydraulique hybride de deux réservoirs afin de tester son efficacité. Des résultats de simulations sont présentés et discutés avant de proposer quelques perspectives.

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de tester l'algorithme de diagnostic robuste proposé dans le chapitre 3 sur un système hydraulique hybride. Le but alors consiste à générer des résidus sensibles aux défauts mais insensibles aux incertitudes paramétriques.

4.2 Description du système

Un système à deux réservoirs est considéré dans cette application, représenté par la FIGURE 4.1. Le système est composé de deux réservoirs, pompe centrifuge modélisée comme une source de pression $P_{in}(t)$ [Pa] et quatre vannes tout ou rien représentées par R_1, R_2, R_3 et R_4 . $A_1[m^2]$ et $A_2[m^2]$ sont les superficies de section transversale des deux réservoirs. Le système est équipé de deux capteurs de pression P_1 et P_2 pour mesurer la pression au fond des réservoirs A_1 et A_2 respectivement ; cette pression est proportionnelle au niveau de liquide, d'après la relation suivante :

$$P_i(t) = \rho g h_i(t), i = 1, 2 \quad (4.1)$$

Où ρ est la densité du liquide [kg/m^3] , g est l'accélération due à la pesanteur [m/s^2] et $h_i(t)$ est la hauteur de liquide dans le réservoir [m]

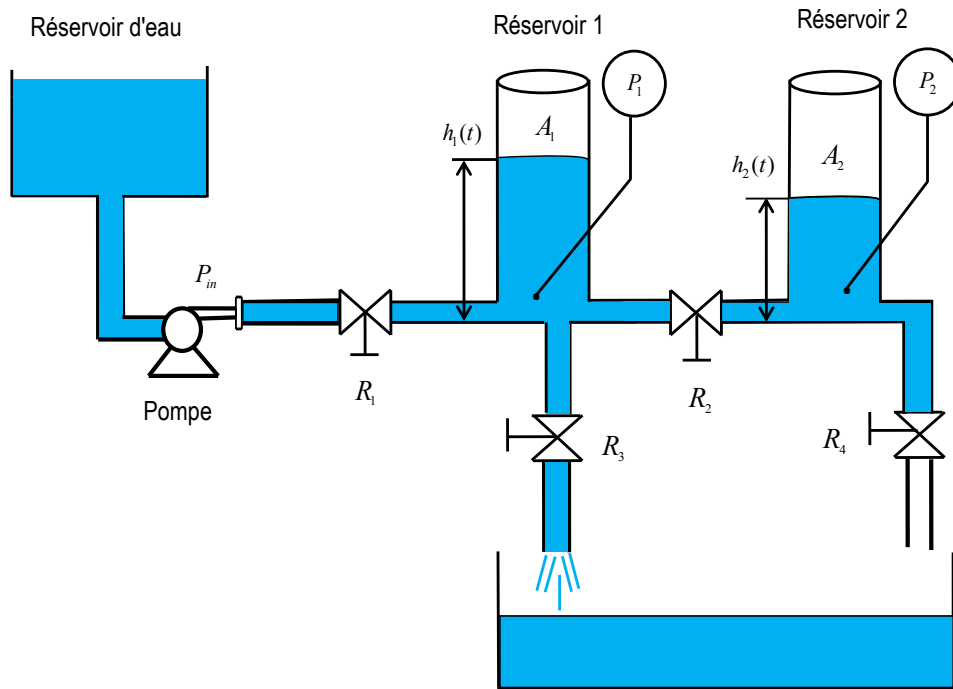


FIGURE 4.1 – un système à deux réservoirs

Les parties discontinues de ce système sont les quarts vannes, où chaque vanne à deux états discrets *on* et *off*. Le système possède donc 2^4 modes et chaque mode est déterminé par l'état de la vanne (ouverte/ fermée).

Le modèle BGH du système hydraulique ainsi que l'automate à état fini des jonctions contrôlées sont présentés dans la FIGURE 4.2

La dynamique des vannes est donnée par l'équation 4.2[46] :

$$\begin{cases} f_j(t) = 0, & j = 1, 2, 3, 4 \text{ lorsque la vanne est fermée (V.F)} \\ f_j(t) = \frac{\text{sign}(\Delta P(t)) \cdot \sqrt{|\Delta P(t)|}}{R_j} = Cd_j \cdot \text{sign}(\Delta P(t)) \cdot \sqrt{|\Delta P(t)|}, & j = 1, 2, 3, 4 \text{ (V.O)} \end{cases} \quad (4.2)$$

Avec :

f_j [m^3/s] est le flux de liquide à travers la vanne

$\Delta P(t)$ [Pa] est la différence de pression à travers la vanne

Cd_j [$\sqrt{kg.m}$] sont les coefficients de décharge

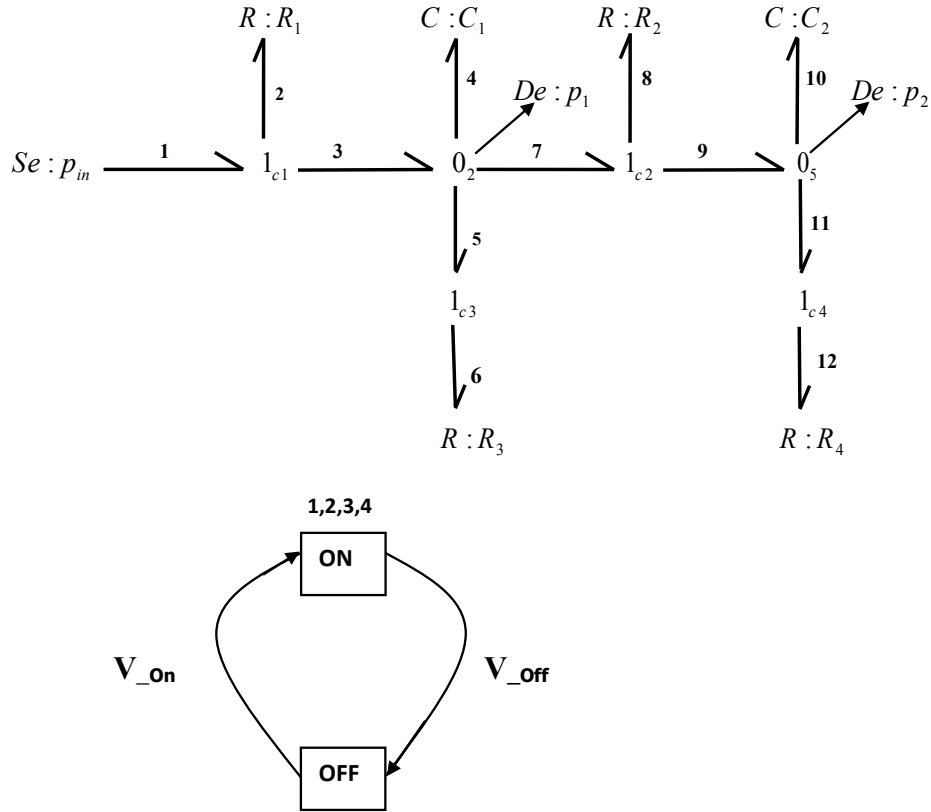


FIGURE 4.2 – Modèle BGH du système hydraulique et l’automate à état fini des jonctions contrôlées

Dans le modèle BGH de la FIGURE 4.2 ; la variable flux est le flux volumique liquide c’est à dire m^3/s et la variable effort c’est la pression [Pa] .

Les deux réservoirs sont modélisés par les composants de stockage avec des coefficients $C_i = \frac{A_i}{\rho \cdot g}$ pour $i = 1, 2$ et ρ est la masse volumique du liquide. Chacune des quatre vannes est modélisée par un ensemble de résistance avec des paramètres $R_j = \frac{1}{Cd_j}$ pour $j = 1, 2, 3, 4$ avec $(f_j(t) = Cd_j \cdot \text{sign}(\Delta P(t)) \cdot \sqrt{|\Delta P(t)|})$ et de jonction contrôlée avec des variables booléennes a_j , $j = 1, 2, 3, 4$ qui représentent l’état des jonctions contrôlées.

Les valeurs des paramètres du système à deux réservoirs sont données dans le tableau (TABLE 4.1) et ils sont utilisés pour les différentes simulations :

Une incertitude paramétrique de valeur θ peut être introduite sous forme additive ou multiplicative selon les equations suivantes :

$$\begin{cases} \theta = \theta_n + \Delta\theta \\ \theta = \theta_n(1 + \delta_\theta) \end{cases} \quad (4.3)$$

Avec $\Delta\theta$ et $\delta_\theta = \Delta\theta/\theta_n$ représentent respectivement la déviation absolue et relative par

TABLE 4.1 – Les paramètres du modèle du système à deux réservoirs

Symbole	Description	Valeur
A_i	Superficie de la section transversale des deux réservoirs Réservoir _{<i>i</i>} ($i = 1, 2$)	$1.54 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
g	Accélération due à la gravité	9.81 ms^{-2}
ρ	Masse volumique du liquide	$1000 \text{ kg} / \text{ m}^3$
Cd_1	Coefficient de décharge de la première vanne	$1.593 \times 10^{-2} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$
Cd_2	Coefficient de décharge de la deuxième vanne	$1.593 \times 10^{-2} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$
Cd_3	Coefficient de décharge de la troisième vanne	$1.0 \times 10^{-2} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$
Cd_4	Coefficient de décharge de la quatrième vanne	$1.0 \times 10^{-2} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$

rapport à la valeur nominale du paramètre. On s'intéresse aux incertitudes paramétriques de type multiplicative.

δ_θ sont les incertitudes relatives des paramètres du modèle, elles sont indiquées en pourcentage de déviation de la valeur du paramètre par rapport à celle nominale. Les valeurs nominales ainsi que les incertitudes relatives des paramètres du système sont données par la TABLE 4.2 :

TABLE 4.2 – Valeurs nominaux et Incertitudes relatives des paramètres du système hydraulique

Symbole	Description	Valeur nominale	Incertitude relative
$R_1 = \frac{1}{Cd_1}$	Resistance hydraulique de la 1ere vanne	$R_{n1} = \frac{1}{1.593 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$	$\delta_{1/R_1} = 0.05$
$R_2 = \frac{1}{Cd_2}$	Resistance hydraulique de la 2eme vanne	$R_{n2} = \frac{1}{1.593 \cdot 10^{-2}} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$	$\delta_{1/R_2} = 0.05$
$R_3 = \frac{1}{Cd_3}$	Resistance hydraulique de la 3eme vanne	$R_{n3} = \frac{1}{10^{-2}} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$	$\delta_{1/R_3} = 0.05$
$R_4 = \frac{1}{Cd_4}$	Resistance hydraulique de la 4eme vanne	$R_{n4} = \frac{1}{10^{-2}} \sqrt{\text{kg} \cdot \text{m}}$	$\delta_{1/R_4} = 0.05$
$C_1 = \frac{A_1}{\rho \cdot g}$	Capacité du 1 ^{er} réservoir	$C_{n1} = 1.56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \text{ s}^2 / \text{kg}$	$\delta_{C_1} = 0.05$
$C_2 = \frac{A_2}{\rho \cdot g}$	Capacité du 2 ^{eme} réservoir	$C_{n2} = 1.56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \text{ s}^2 / \text{kg}$	$\delta_{C_2} = 0.05$

4.3 Application de la méthode proposée du diagnostic robuste sur le système hydraulique

- 1 ère étape : Le modèle BGH du système de deux réservoirs est donnée par la FIGURE 4.2,
- 2 ème étape : L'étude des propriétés structurelles (propreté et observabilité) du BGH nominale de la FIGURE 4.3

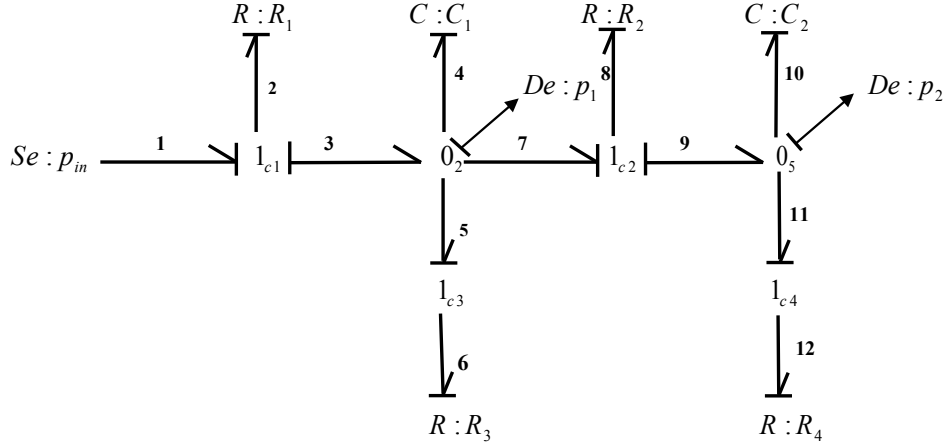


FIGURE 4.3 – Modèle BGH du système hydraulique en causalité dérivée

Sur le modèle BGH de la FIGURE 4.3, tous les éléments sont liés par des chemins causaux par au moins un détecteur. La dualisation des deux capteurs a permis de mettre les deux éléments dynamiques C en causalité dérivée lorsque le modèle BGH est dans la causalité dérivée préférentielle [282], le système est donc propre et observable [193].

– 3^{ème} étape : L’algorithme d’affectation de causalité pour les SDHs est appliqué où toutes les jonctions contrôlées sont assignées d’une causalité valide.

1. Les jonctions contrôlées 1_{c3} , 1_{c2} et 1_{c4} ne sont connectées à aucune source adjacente. Les variables de sortie de toutes les jonctions contrôlées sont des entrées à des composants 1 port (R_1 , R_2 , R_3 et R_4). Exemple la sortie de la jonction 1_{c1} qui est e_2 est bien l’entrée de l’élément 1 port R_1 .
2. La source $Se : p_{in}$ est reliée à la jonction contrôlée 1_{c1} ; la sortie de cette dernière est affectée en tant que variable d’entrée d’un composant à 1-port R_1 , (la sortie de la jonction 1_{c1} lorsqu’elle est active est e_2 et est égale à la différence entre les efforts sur Se et le lien 3 ($e_2 = e_1 - e_3$)
3. En appliquant l’algorithme d’affectation des causalités au modèle BGH de la FIGURE 4.2, on obtient un BGH de diagnostic causalement valide. Les détecteurs sont dualisés. Donc le modèle BGH du diagnostic (BGHD) est donné par la FIGURE 4.4.

Un détecteur d’effort qui a une causalité inversée est considéré comme une source de signal SSe après dualisation des capteurs (FIGURE 4.4), on remarque qu’il n’y a pas de conflit de causalité lorsque les éléments de stockage C sont en causalité dérivée. Le système est donc sur-déterminé [10], et la génération des RRAs Globales (RRAGs) candidates est possible.

4. Le modèle BGH-LFT du système à deux réservoirs est formé, tenant compte des incertitudes paramétriques (FIGURE 4.5), avec w_i : entrées fictives, z_i : sorties fictives, δ_{1/R_1} , δ_{1/R_2} et δ_{1/R_3} et δ_{1/R_4} représentent les incertitudes multiplicatives sur le paramètre R_j ($j = 1, 2, 3, 4$).

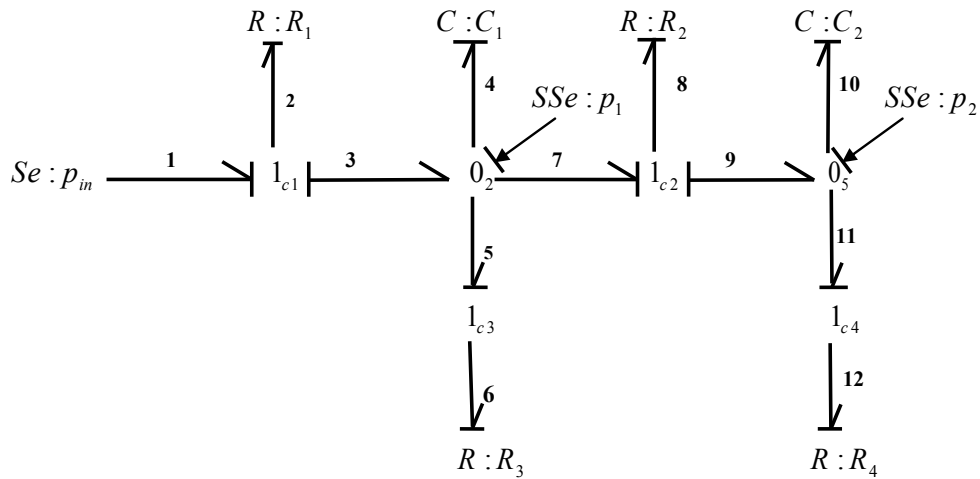


FIGURE 4.4 – Modèle BGH du diagnostic (BGHD) système hydraulique

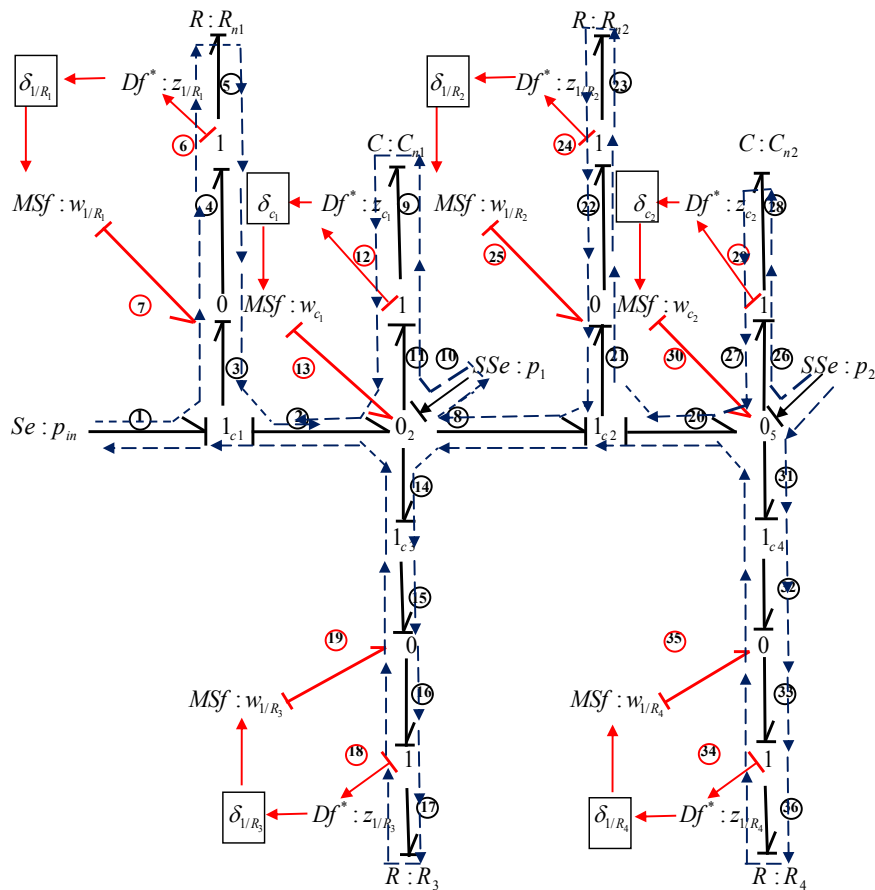


FIGURE 4.5 – Modèle BGH du diagnostic (BGHD) sous la forme BG-LFT

5. Cette étape consiste à dériver les RRAGs candidates à partir du modèle BGHD sous la forme LFT de la FIGURE 4.5. A l'aide de ce modèle (BGH-LFT) de la FIGURE 4.5 [38], la procédure de génération des *RRAGs Robustes* peut être appliquée. En se basant sur la variable booléenne a_{cj} , pour $j = 1, 2, 3, 4$, les variables du flux des liens $\{1, 2, 3\}$ sont remplacés par $\{a_{c1} \cdot f_1, a_{c1} \cdot f_2, a_{c1} \cdot f_3\}$, et les variables du flux des liens $\{8, 20, 21\}$ sont remplacés par $\{a_{c2} \cdot f_8, a_{c2} \cdot f_{20}, a_{c2} \cdot f_{21}\}$ et ainsi de suite, et

seuls les jonctions reliées avec les capteurs sont considérées. De plus, pour chaque détecteur dont la causalité est inversée, une RRA est déduite [284].

Le calcul des RRAGs prend en compte les deux états (*ON / OFF*) de chaque vanne comme indiqué dans les equations suivantes (équations(4.5)-(4.23)) :

Le premier capteur P_1 est considéré, la relation constitutive de jonction 0_2 est donnée par

$$a_{c1}.f_2 - f_9 - a_{c2}.f_8 - a_{c3}.f_{14} + f_{13} = 0 \quad (4.4)$$

f_2, f_9, f_8, f_{14} , et f_{13} sont des variables inconnues.

Pour obtenir une RRAG (où toutes les variables sont connues), les variables inconnues sont éliminées à l'aide du parcours des chemins causaux de la variable inconnue à la variable connue (mesures et entrées) comme résumé ci dessous :

f_2 est éliminé par le chemin causal suivant :

$$Se : p_{in} \longrightarrow e_3 \longrightarrow e_4 \longrightarrow e_5 \longrightarrow f_5 \longrightarrow f_4 \longrightarrow f_3 \longrightarrow f_2 \quad (4.5)$$

A partir de la FIGURE 4.5 on aura :

$$f_2 = f_3 = f_5 - f_7 \quad (4.6)$$

Avec

$$f_5 = \begin{cases} 0 & \text{lorsque la 1}^{\text{ère}} \text{ vanne est fermée} \\ \frac{\text{sign}(P_{in}-P_1)\sqrt{|P_{in}-P_1|}}{R_1} = Cd_1.\text{sign}(P_{in} - P_1).\sqrt{|P_{in} - P_1|} & \text{lorsque la 1}^{\text{ère}} \text{ vanne est ouverte} \end{cases} \quad (4.7)$$

$$f_7 = MSf^* : w_{1/R_1} = \delta_{1/R_1} . z_{1/R_1} = \delta_{1/R_1} . \frac{1}{R_{n_1}} . P_1 \quad (4.8)$$

On peut écrire f_2 sous la manière suivante :

$$f_2 = Cd_1.\text{sign}(P_{in} - P_1)\sqrt{|P_{in} - P_1|} - w_{1/R_1} \quad (4.9)$$

f_9 est éliminé par le chemin causal suivant :

$$SSe : p_1 \longrightarrow e_{11} \longrightarrow e_9 \longrightarrow f_9 \quad (4.10)$$

$$f_9 = f_{11} = C_1 \cdot \frac{d}{dt} P_1 = \frac{A_1}{g \cdot \rho} \cdot \frac{d}{dt} P_1 \quad (4.11)$$

f_8 est éliminé par le chemin causal suivant :

$$SSe : p_1 \longrightarrow e_{11} \longrightarrow e_9 \longrightarrow f_9 \longrightarrow f_{11} \longrightarrow f_8 \quad (4.12)$$

$$f_8 = f_{23} - f_{25} \quad (4.13)$$

$$f_{23} = \begin{cases} 0 & \text{lorsque la 2}^{\text{ème}} \text{ vanne est fermée} \\ Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \cdot \sqrt{|P_1 - P_2|} & \text{lorsque la 2}^{\text{ème}} \text{ vanne est ouverte} \end{cases} \quad (4.14)$$

$$f_{25} = MSf^* : w_{1/R_2} = \delta_{1/R_2} \cdot z_{1/R_2} = \delta_{1/R_2} \cdot \frac{1}{R_{n2}} \cdot P_2 \quad (4.15)$$

$$f_8 = Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \cdot \sqrt{|P_1 - P_2|} - w_{1/R_2} \quad (4.16)$$

f_{14} est éliminé par le chemin causal suivant :

$$SSe : p_1 \longrightarrow e_{14} \longrightarrow e_{15} \longrightarrow e_{16} \longrightarrow e_{17} \longrightarrow f_{17} \longrightarrow f_{16} \longrightarrow f_{15} \longrightarrow f_{14} \quad (4.17)$$

$$f_{14} = f_{17} - f_{19} \quad (4.18)$$

$$f_{17} = \begin{cases} 0 & \text{lorsque la 3}^{\text{ème}} \text{ vanne est fermée} \\ f_{17} = \frac{\text{sign}(P_1) \cdot \sqrt{|P_1|}}{R_3} = Cd_3 \cdot \sqrt{P_1} & \text{lorsque la 3}^{\text{ème}} \text{ vanne est ouverte} \end{cases} \quad (4.19)$$

$$f_{19} = MSf^* : w_{1/R_3} = \delta_{1/R_3} \cdot z_{1/R_3} = \delta_{1/R_3} \cdot \frac{1}{R_{n3}} \cdot P_1 \quad (4.20)$$

$$f_{14} = Cd_3 \cdot \sqrt{P_1} - w_{1/R_3} \quad (4.21)$$

et f_{13}

$$MSf \longrightarrow f_{13} \quad (4.22)$$

$$f_{13} = MSf^* : w_{c1} = \delta_{c1} \cdot z_{c1} = \delta_{c1} \cdot C_{n1} \cdot \frac{d}{dt} P_1 \quad (4.23)$$

$a_{cj} \in \{0, 1\}$ est une variable discrète représentant l'état de la jonction contrôlée 1_{cj} , $j = \{1, 2, 3, 4\}$, c'est à dire, $a_{cj} = 1$ lorsque la jonction est à l'état *on* et $a_{cj} = 0$ lorsque la jonction est à l'état *off*.

En remplaçant chaque variable par son expression (de l'équation (4.5) à (4.23)) dans l'équation (4.4), la première RRA Globale candidate est obtenue et peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned} \text{RRAG}_1 : & a_{c1} \left[\left(Cd_1 \cdot \text{sign}(P_{in} - P_1) \sqrt{|P_{in} - P_1|} \right) - w_{1/R_1} \right] - C_1 \cdot \frac{d}{dt} P_1 - \\ & a_{c2} \cdot \left[Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \sqrt{|P_1 - P_2|} - w_{1/R_2} \right] - a_{c3} \cdot \left[Cd_3 \cdot \sqrt{P_1} - w_{1/R_3} \right] + w_{c1} = 0 \end{aligned}$$

De la même manière, à l'aide de la jonction 0_5 attachée au deuxième capteur P_2 , la deuxième RRAGlobale candidate est donnée par l'équation suivante :

$$\text{RRAG}_2 : a_{c2} \cdot \left[Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \sqrt{|P_1 - P_2|} - w_{1/R_2} \right] - C_2 \cdot \frac{d}{dt} P_2 - a_{c4} \cdot \left[Cd_4 \sqrt{P_2} - w_{1/R_4} \right] + w_{c2} = 0$$

Chaque RRA Globale robuste candidate se compose de deux parties séparées données dans l'équation 4.24.

Avec (r_1, r_2) et (a_1, a_2) sont respectivement la partie nominale et la partie incertaine des RRAGs, la partie incertaine représente les seuils du fonctionnement normale [174] :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = a_{c1} \cdot (Cd_1 \cdot \text{sign}(P_{in} - P_1) \cdot \sqrt{|P_{in} - P_1|} - C_1 \cdot \frac{d}{dt} P_1 - \\ \quad a_{c2} \cdot (Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \sqrt{|P_{in} - P_1|} - a_{c3} \cdot Cd_3 \cdot \sqrt{P_1}) \\ \quad a_1 = |a_{c1} \cdot w_{R_1}| + |a_{c2} \cdot w_{R_2}| + |a_{c3} \cdot w_{R_3}| + |w_{c1}| \\ r_2 = a_{c2} \cdot (Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \cdot \sqrt{|P_1 - P_2|} - C_2 \cdot \frac{d}{dt} P_2 - a_{c4} \cdot (Cd_4 \cdot \sqrt{P_2})) \\ \quad a_2 = |a_{c2} \cdot w_{1/R_2}| + |a_{c4} \cdot w_{1/R_4}| + |w_{c2}| \end{array} \right. \quad (4.24)$$

Les entrées fictives w_i sont reliées aux sorties fictives z_i par les relations suivantes (équation 4.25)

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{1/R_1} = \delta_{1/R_1} \cdot z_{1/R_1}; z_{1/R_1} = \frac{1}{R_{n1}} \cdot P_1 \\ w_{1/R_2} = \delta_{1/R_2} \cdot z_{1/R_2}; z_{1/R_2} = \frac{1}{R_{n2}} \cdot P_2 \\ w_{1/R_3} = \delta_{1/R_3} \cdot z_{1/R_3}; z_{1/R_3} = \frac{1}{R_{n3}} \cdot P_1 \\ w_{1/R_4} = \delta_{1/R_4} \cdot z_{1/R_4}; z_{1/R_4} = \frac{1}{R_{n4}} \cdot P_2 \\ w_{c1} = \delta_{c1} \cdot z_{c1}; z_{c1} = C_{n1} \frac{d}{dt} \cdot P_1 \\ w_{c2} = \delta_{c2} \cdot z_{c2}; z_{c2} = C_{n2} \frac{d}{dt} \cdot P_2 \end{array} \right. \quad (4.25)$$

Où $\delta_{1/R_1}, \delta_{1/R_2}, \delta_{1/R_3}$ et δ_{1/R_4} représentent les incertitudes multiplicatives sur les paramètres $R_j (j = 1, 2, 3, 4)$ qui représentent les quartes résistances hydrauliques représentant les quartes vannes, et δ_{c1}, δ_{c2} sont, respectivement, les incertitudes multiplicatives sur les deux composants de stockage (capacité hydraulique) C_1, C_2 qui représentent les deux réservoirs.

Les deux parties distinctes [174] qui constituent les RRAGs sont données dans par les expressions suivantes (equation 4.26)

$$\left\{ \begin{array}{l}
r_1 = a_{c1} \cdot [(Cd_1 \cdot \text{sign}(P_{in} - P_1) \cdot \sqrt{|P_{in} - P_1|})] - a_{c2} \cdot [(Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2))] - a_{c3} \cdot Cd_3 \cdot \sqrt{P_1} - C_1 \cdot \frac{d}{dt} P_1 \\
a_1 = \left| a_{c2} \cdot \delta_{1/R_2} \cdot \frac{1}{R_{n2}} \cdot P_2 \right| + \left| a_{c1} \cdot \delta_{1/R_1} \cdot \frac{1}{R_{n1}} \cdot P_1 \right| + \left| a_{c3} \cdot \delta_{1/R_3} \cdot \frac{1}{R_{n3}} \cdot P_1 \right| + \left| \delta_{c1} \cdot C_{n1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot P_1 \right| \\
r_2 = a_{c2} \cdot [(Cd_2 \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \cdot \sqrt{(P_1 - P_2)})] - a_{c4} \cdot Cd_4 \cdot \sqrt{P_2} - C_2 \cdot \frac{d}{dt} \cdot P_2 \\
a_2 = \left| a_{c4} \cdot \delta_{1/R_4} \cdot \frac{1}{R_{n4}} \cdot P_2 \right| + \left| \delta_{c2} \cdot C_{n2} \cdot \frac{d}{dt} \cdot P_2 \right| + \left| a_{c2} \cdot \delta_{1/R_2} \cdot \frac{1}{R_{n2}} \cdot P_2 \right|
\end{array} \right. \quad (4.26)$$

Les matrices de signature de défauts sont déduites des équations(4.26) et données par la TABLE 4.3 et TBALE 4.4 où D_b et I_b représentent respectivement l'état de détectabilité et d'isolabilité sur chaque paramètre à chaque mode de fonctionnement selon l'état des vannes (ouverte et fermée). D_b et I_b sont égaux à 1 lorsque le paramètre est surveillable, et 0 dans le cas contraire, $a_{ci} = 0$ pour vanne fermée et $a_{ci} = 1$ pour vanne ouverte.

4.4 Étude de la robustesse

Afin d'améliorer la procédure de décision de la génération d'alarmes, pour éviter les fausses alarmes et les non-détections, des *seuils adaptatifs*, tenant compte des incertitudes paramétriques sont générés directement à partir du modèle BG. Cette approche systématique de conception de système de surveillance est basé sur les propriétés structurelles, comportementales et causales de l'outil BG, son aspect graphique permet l'automatisation des procédures pour la génération d'algorithmes de surveillance utilisant un logiciel dédié [47].

δ_{ci} : δ_i sont les incertitudes des paramètres qui représentent la déviation des valeurs des paramètres par rapport à leurs valeurs nominales.

La valeur de delta δ doit être aussi faible que possible pour éviter une mauvaise détection[185]. Dans la simulation, les incertitudes de tous les paramètres sont fixés à 5% de la valeur nominale.

Les incertitudes relatives fixées égaux à (5%) dans la simulation et le test de la robustesse est obtenu en introduisant des incertitudes égales (5%) et supérieures (9,4%) à l'incertitude relative fixée (5%).

Quelques résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes, qui montrent la réaction des résidus sans et avec défauts introduits sur les paramètres, ces défauts sont égaux et supérieurs aux incertitudes paramétriques afin de tester la robustesse.

TABLE 4.3 – Matrices de signature de fautes pour la vanne 1 et 2

1ere vanne ouverte : $a_{c1}=1$					1ere vanne fermée : $a_{c1}=0$				
$a_{c1}=1$	r_1	r_2	D_b	I_b	$a_{c1}=0$	r_1	r_2	D_b	I_b
P_{in}	1	0	1	0	P_{in}	0	0	0	0
R_1	0	0	0	0	R_1	0	0	0	0
R_2	0	0	0	0	R_2	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0	R_3	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0	R_4	0	0	0	0
C_1	1	0	1	0	C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0	C_2	0	1	1	0

2eme vanne ouverte : $a_{c2}=1$					2eme vanne Fermée : $a_{c2}=0$				
$a_{c2}=1$	r_1	r_2	D_b	I_b	$a_{c2}=0$	r_1	r_2	D_b	I_b
P_{in}	1	0	1	0	P_{in}	1	0	1	0
R_1	0	0	0	0	R_1	0	0	0	0
R_2	0	0	0	0	R_2	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0	R_3	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0	R_4	0	0	0	0
C_1	1	0	1	0	C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0	C_2	0	1	1	0

TABLE 4.4 – Matrices de signature de fautes pour la vanne 3 et 4

3eme vanne ouverte : $a_{c3}=1$

$a_{c3}=1$	r_1	r_2	D_b	I_b
P_{in}	1	0	1	0
R_1	0	0	0	0
R_2	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0
C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0

3eme vanne Fermée : $a_{c3}=0$

$a_{c3}=0$	r_1	r_2	D_b	I_b
P_{in}	1	0	1	0
R_1	0	0	0	0
R_2	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0
C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0

4eme vanne ouverte : $a_{c4}=1$

$a_{c4}=1$	r_1	r_2	D_b	I_b
P_{in}	1	0	1	0
R_1	0	0	0	0
R_2	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0
C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0

4eme vanne ouverte : $a_{c4}=0$

$a_{c4}=0$	r_1	r_2	D_b	I_b
P_{in}	1	0	1	0
R_1	0	0	0	0
R_2	0	0	0	0
R_3	0	0	0	0
R_4	0	0	0	0
C_1	1	0	1	0
C_2	0	1	1	0

Les variables d'état (sorties) représentant les capteurs de pression P_1 , P_2 sont montrés par la figure suivante (FIGURE 4.6) :

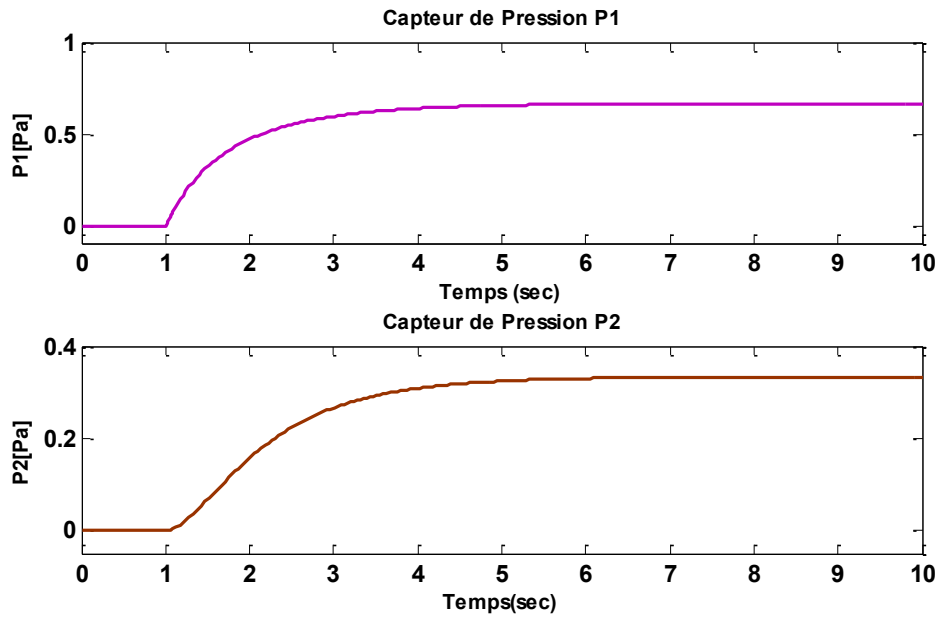


FIGURE 4.6 – Les capteurs de pression P_1, P_2

L'état des jonctions contrôlées est représenté par les figures suivantes (FIGURES 4.7 - 410) :

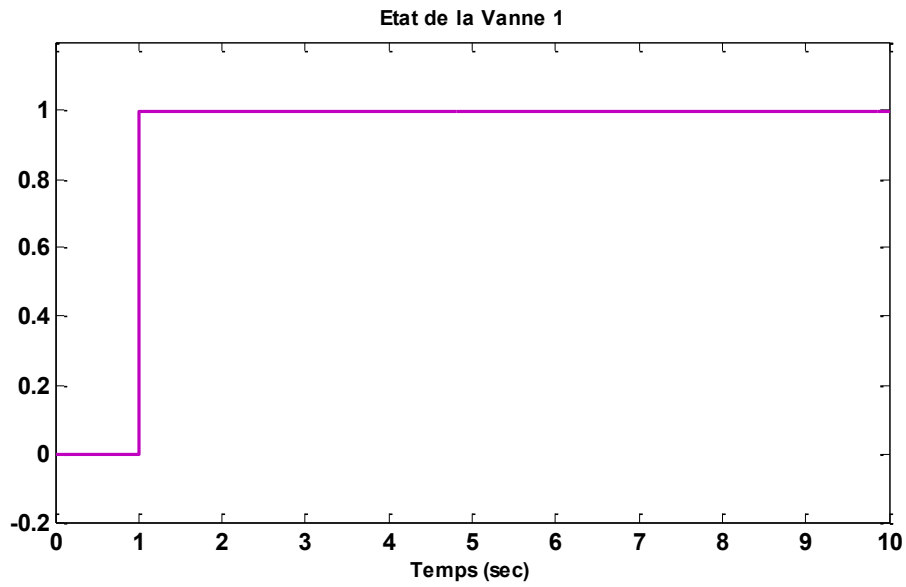


FIGURE 4.7 – L'état de la vanne 1

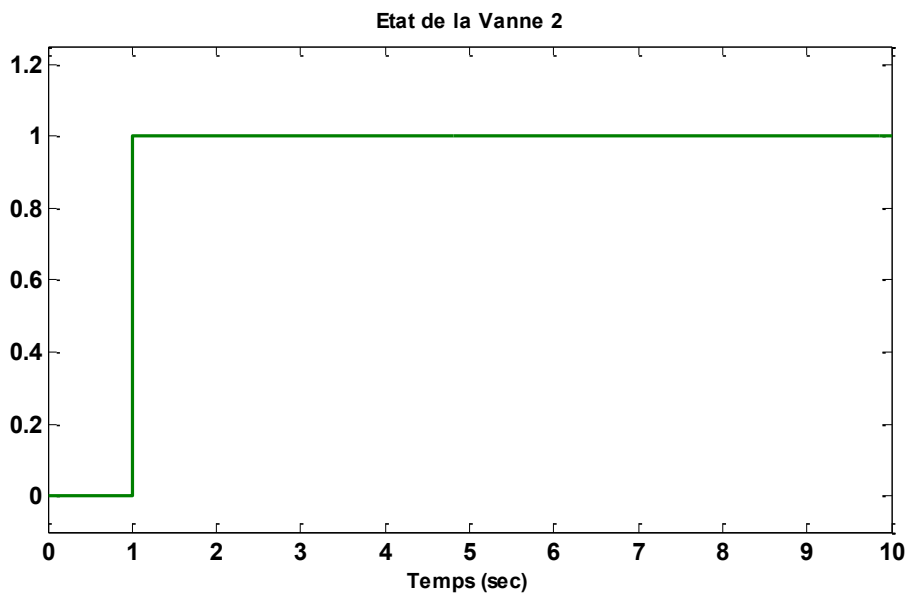


FIGURE 4.8 – L'état de la vanne 2

4.5 Résultats de Simulations

4.5.1 Incertitudes multiplicative

1. 1^{er} Scénario

Le premier scénario de la simulation est présenté dans la FIGURE 4.11.

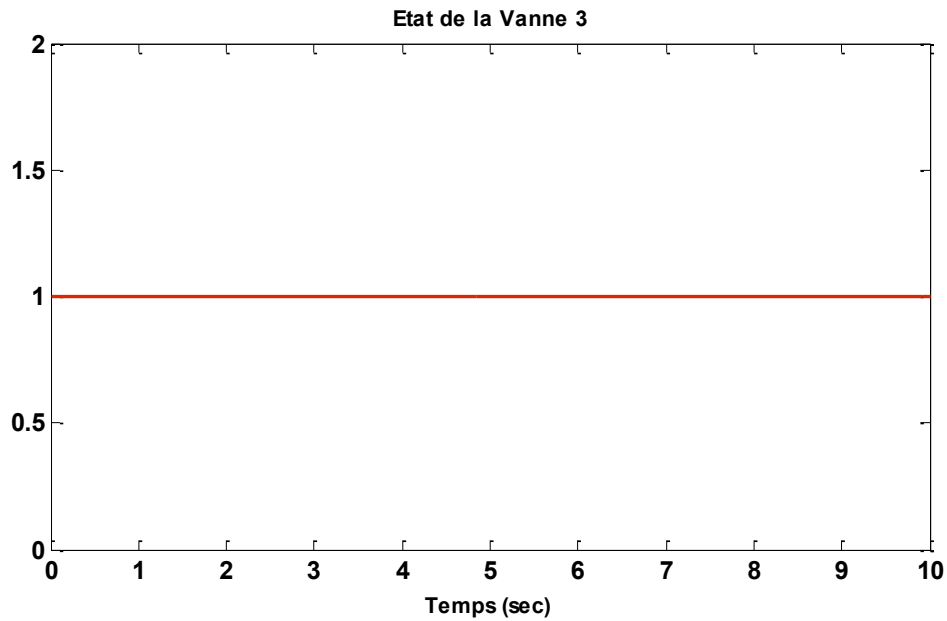


FIGURE 4.9 – L'état de la vanne 3

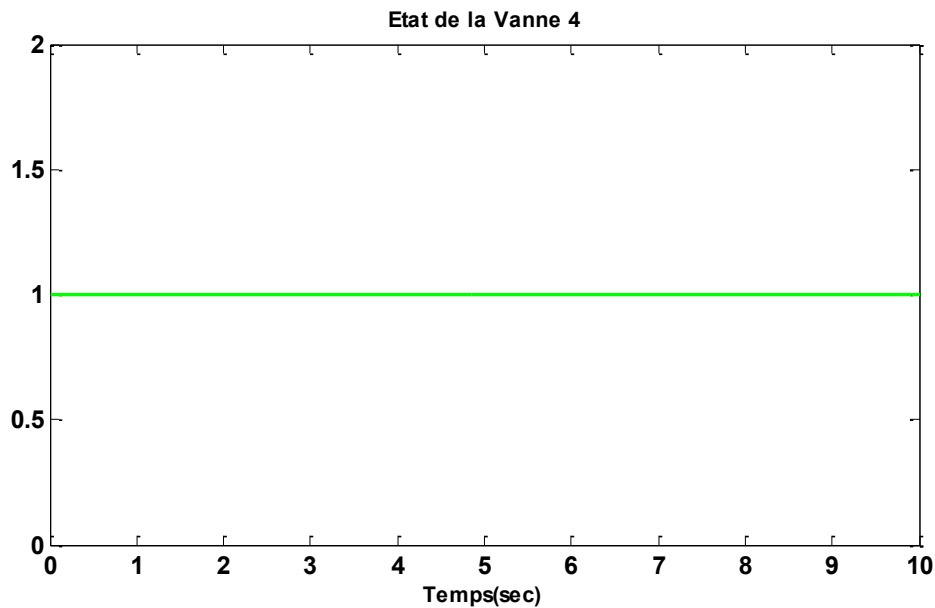


FIGURE 4.10 – L'état de la vanne 4

La nature physique des défauts correspond aux composants matériels construits en série (résistance électrique, condensateur, etc.).

Les défauts représentent la déviation des valeurs des paramètres des éléments BGs de leur valeurs nominales et la valeur absolue des incertitudes données. Ces défauts peuvent représenter un blocage de la vanne (représenté par l'élément BG R), et une fuite du réservoir (représenté par des éléments BGs C). Dans le modèle BG, les défauts sont ex-

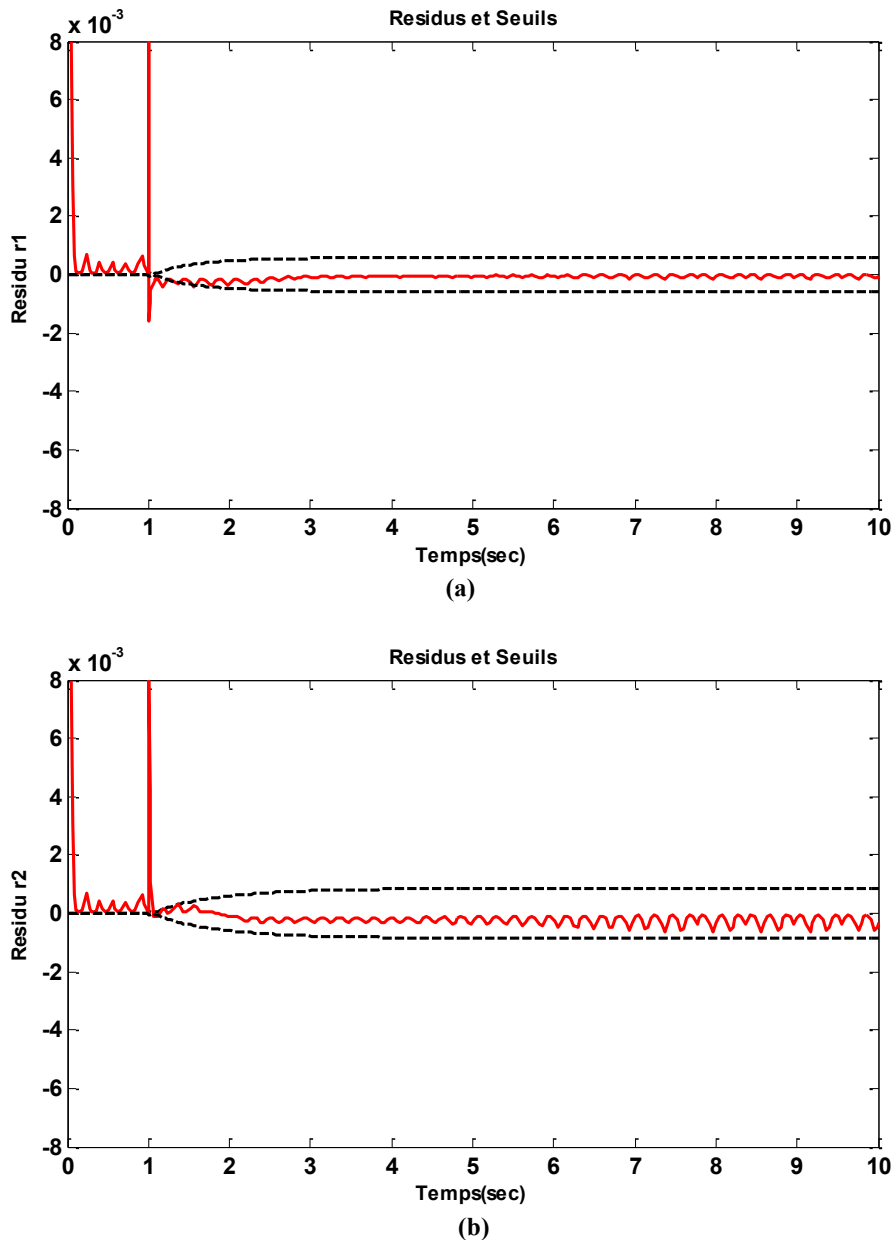
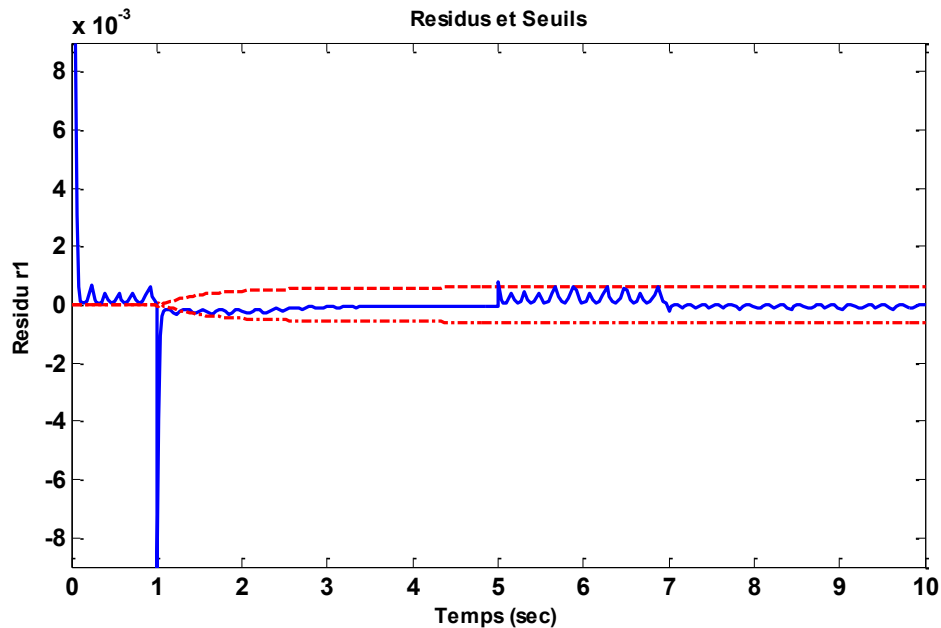


FIGURE 4.11 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 sans défauts du premier scénario

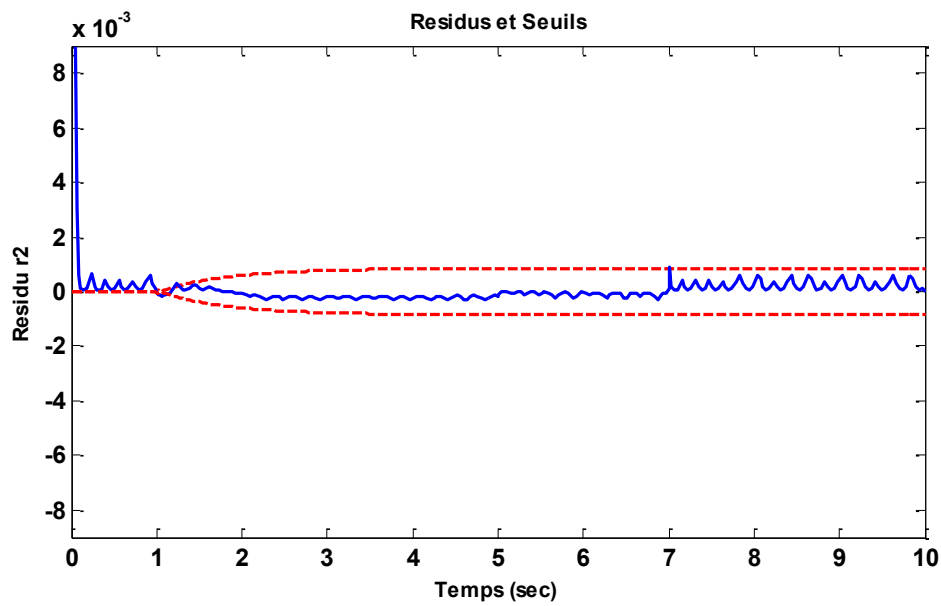
plicitement montrés par le composant physique.

2. 2^{eme} Scénario

Le deuxième scénario de simulation (test de robustesse) est présenté dans la FIGURE 4.12 et FIGURE 4.13, c'est à dire les résultats de simulation du test de robustesse des résidus à l'égard des incertitudes paramétriques. Dans ce but, la valeur du coefficient de décharge Cd_1 de la première vanne et la valeur du coefficient de décharge Cd_2 de la deuxième vanne ont été augmentées brusquement d'une valeur de 5% de leurs valeurs nominales à $t = 5s$, et $t = 7s$ respectivement. L'incertitude paramétrique relative introduite est égale à la valeur de l'incertitude fixée (5%). Les réactions des résidus sont montrées dans la FIGURE 4.12.



(a)



(b)

FIGURE 4.12 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 sans défauts du deuxième scénario avec un défaut sur les paramètres Cd_1, Cd_2 respectivement à $t = 5s$ et $t = 7s$

On remarque que ces résidus sont sensibles à ces paramètres, mais ne dépassent pas les seuils adaptatifs ne générant ainsi aucune alarme car l'incertitude paramétrique relative introduite est égale à celle fixée (5%).

Le modèle BGH-LFT permet de générer automatiquement les résidus et les seuils adaptatifs, ces derniers assurent la robustesse aux incertitudes et sont automatiquement adaptés aux changements dans les modes de fonctionnement du système. L'outil BG fournit une solution pratique au problème de dépendance paramétrique, car il est possible de suivre

la propagation de l'influence des incertitudes en termes d'effort ou de flux dans le modèle à travers des chemins causaux[5].

Un autre cas de test, mais cette fois le défaut est introduit sur les paramètres Cd_1, Cd_2 respectivement à $t = 5s$ et $t = 7s$ en déviant leurs paramètres d'une valeur égale à 9,6% de leur valeurs nominales c'est à dire 4,6% supérieure à 5% qui est l'incertitude fixée relative). La FIGURE 4.13 montre la réponse des résidus r_1, r_2

On note que défauts sont détectés par les deux résidus r_1, r_2 , générant ainsi une alarme.

4.5.2 Réaction des résidus par rapport aux bruits de mesures

Dans le but d'évaluer la sensibilité des RRAGs vis à vis le bruit de mesure, ce dernier peut être considéré en introduisant des filtres.

L'influence des bruits de mesures sur les réponses des résidus avec et sans défaut sont présentés dans les FIGURES 4.14 , 4.15 et 4.16.

- **Résidus r_1, r_2 avec bruit de mesure et sans défauts** (cf.FIGURE 4.14)
- **Résidus r_1, r_2 avec bruit de mesure et avec défaut de (5%)**(cf.FIGURE 4.15)
- **Résidus r_1, r_2 avec bruit de mesure et avec défaut de (9.4%)**(cf.FIGURE 4.16)

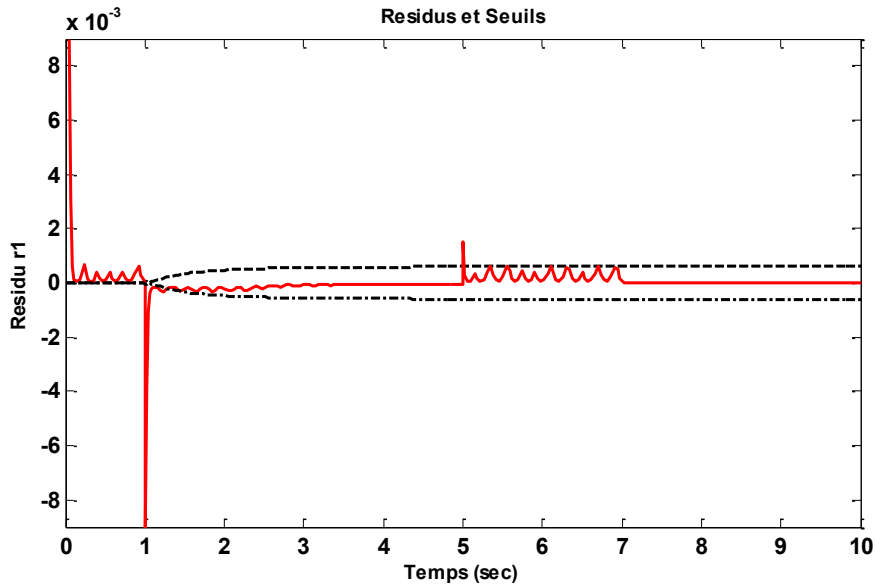
Bien que les résidus r_1, r_2 sont influencés par le bruit sur les mesures, ils permettent de détecter les défauts.

4.5.3 Défaut additif

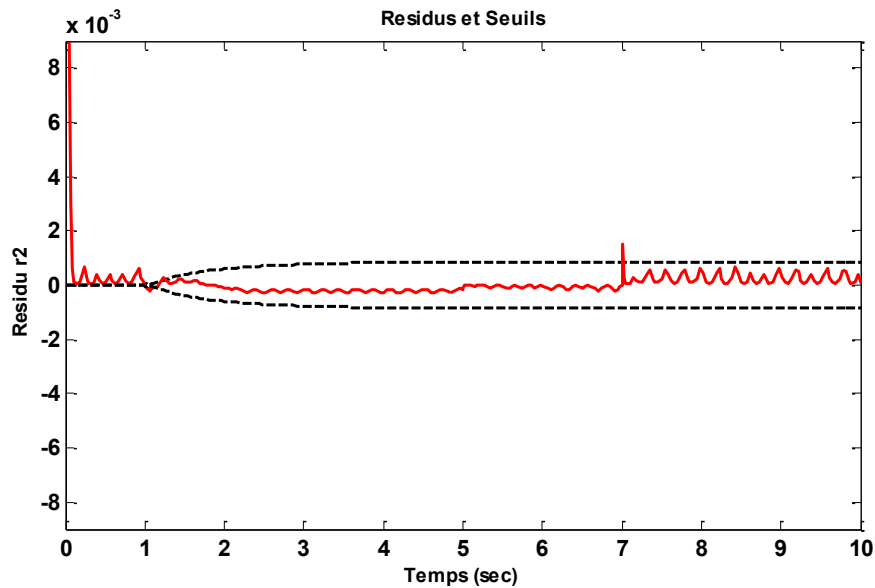
Un défaut d'additif est introduit sur la mesure P_2 à $t = 6s$ avec une amplitude de 1.8 [Pa], les résidus r_1, r_2 dans ce cas sont représentés par la FIGURE 4.17

- **Résidus r_1, r_2 en présence d'un défaut additif sur la mesure P_2 à $t = 6s$** (cf.FIGURE 4.17)

On peut remarquer que les résidus r_1, r_2 sont sensibles au défaut, dans ce cas le défaut est détecté par les deux résidus r_1, r_2 et dépassant les seuils, générant une alarme.



(a)



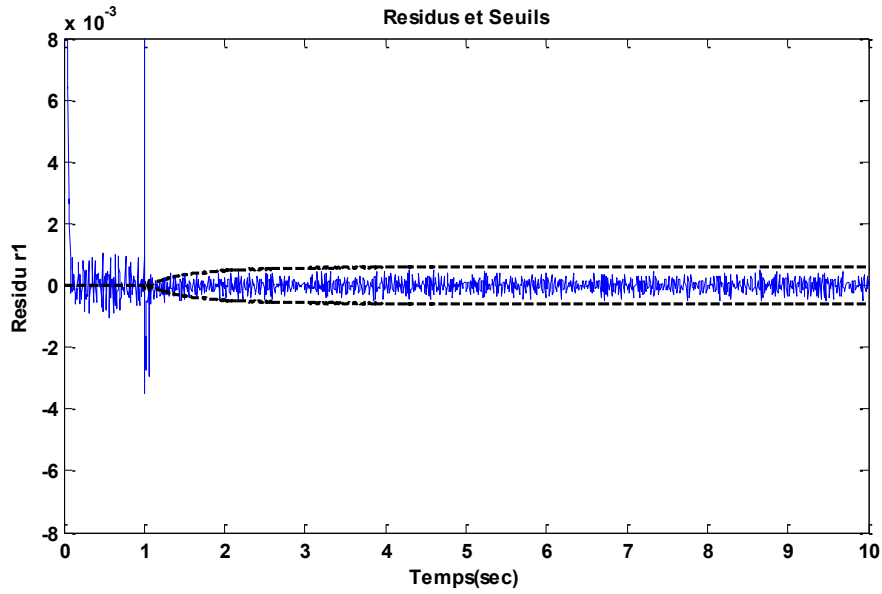
(b)

FIGURE 4.13 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 sans défauts du deuxième scénario avec un défaut sur les paramètres Cd_1, Cd_2 respectivement à $t = 5s$ et $t = 7s$

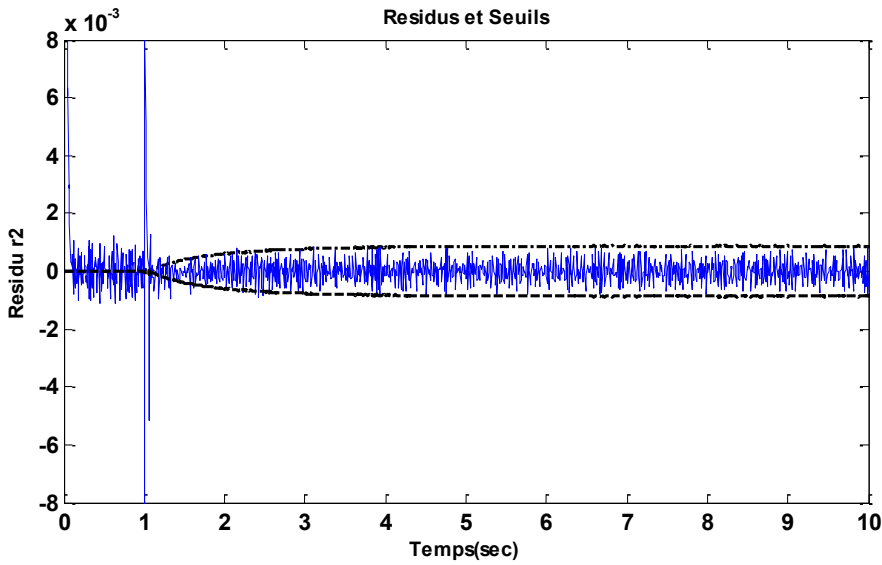
Les mesures des pressions c'est à dire les deux capteurs P_1, P_2 sont montrés dans la FIGURE 4.18.

Un défaut de 9.4% sur les paramètres Cd_1, Cd_2 à $t = 5s$ est introduit, le changement de mode est survenu à $t = 6s$. Les résultats de simulations donnés par les figures 4.19-4.22 montrant l'apparition de défaut dans des modes de fonctionnement différents (à $t = 5s$ présence de défaut où la vanne 1 et 2 sont ouvertes par contre la vanne 3 et 4 sont fermées).

Les résultats de simulation montrant les résidus, l'état des vannes et les capteurs sont donnés par la FIGURE 4.19, 4.20, 4.21 et FIGURE 4.22 :



(a)



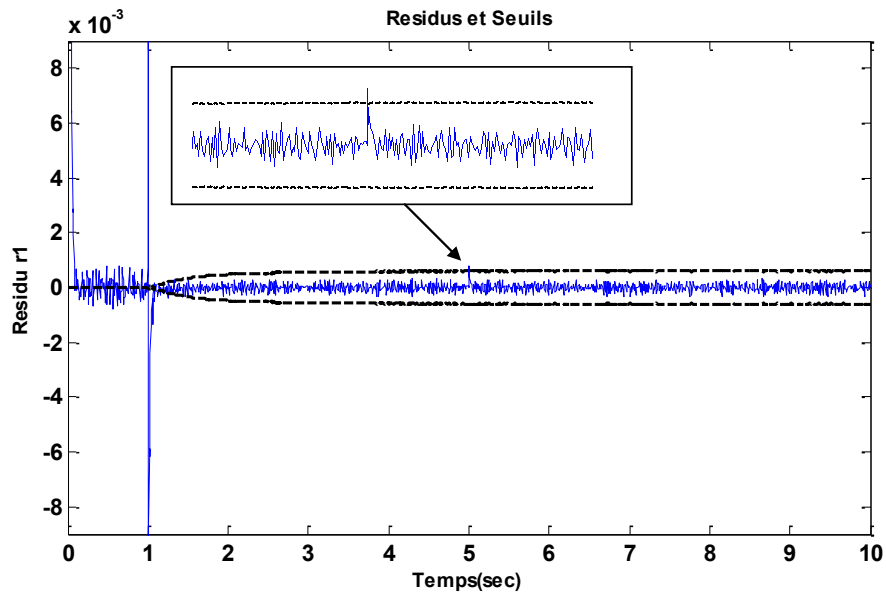
(b)

FIGURE 4.14 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 en fonctionnement normal et en présence de bruit de mesure

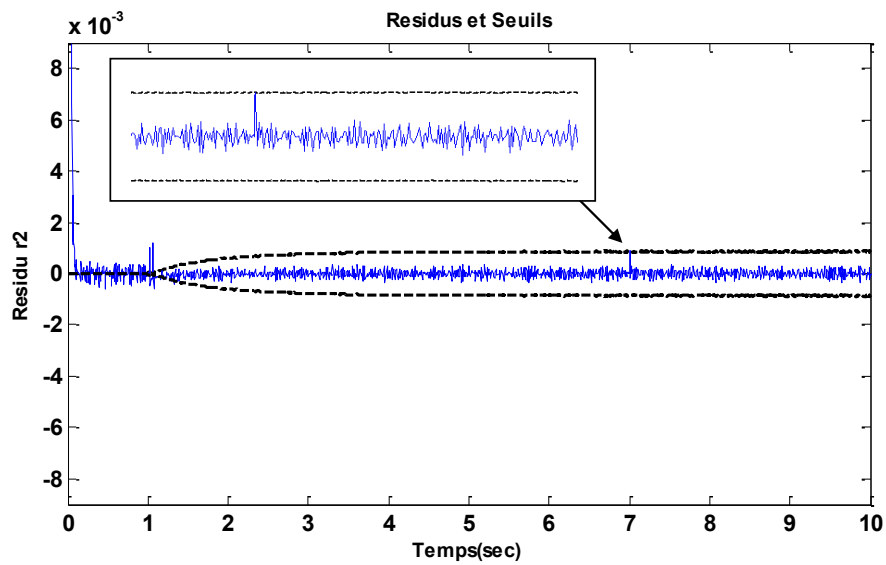
La méthode proposée pour le diagnostic robuste des SDHs à permis la détection des défauts de type multiplicatifs dans des modes de fonctionnement similaires et différents et défauts additives en présence et absence de bruit de mesures.

4.6 Conclusion

Le but de ce chapitre est d'appliquer l'algorithme proposé dans le chapitre 3 sur un système hybride de deux réservoirs. L'outil BGH a été utilisé non seulement pour la modélisation du



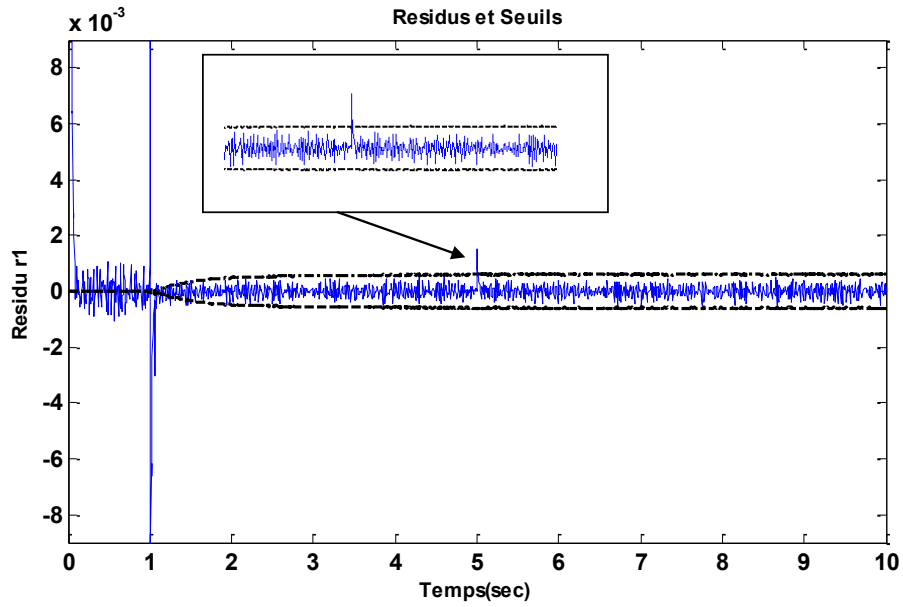
(a)



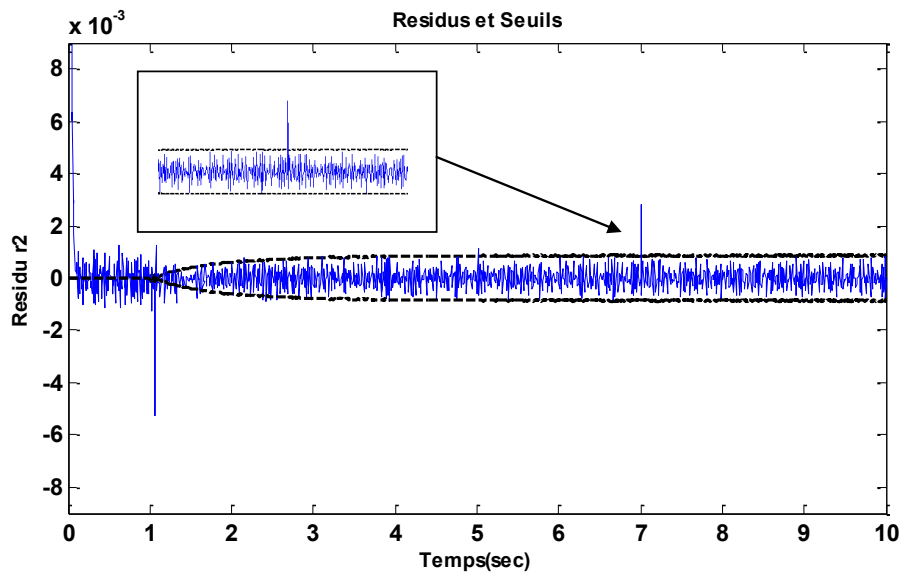
(b)

FIGURE 4.15 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 en fonctionnement défectueux (5%) et en présence de bruit mesure

système hybride mais aussi pour la génération des résidus et les seuils adaptatifs. Des résultats de simulation ont été donnés dans le but de montrer l'efficacité de l'algorithme proposé en terme de robustesse de détection.

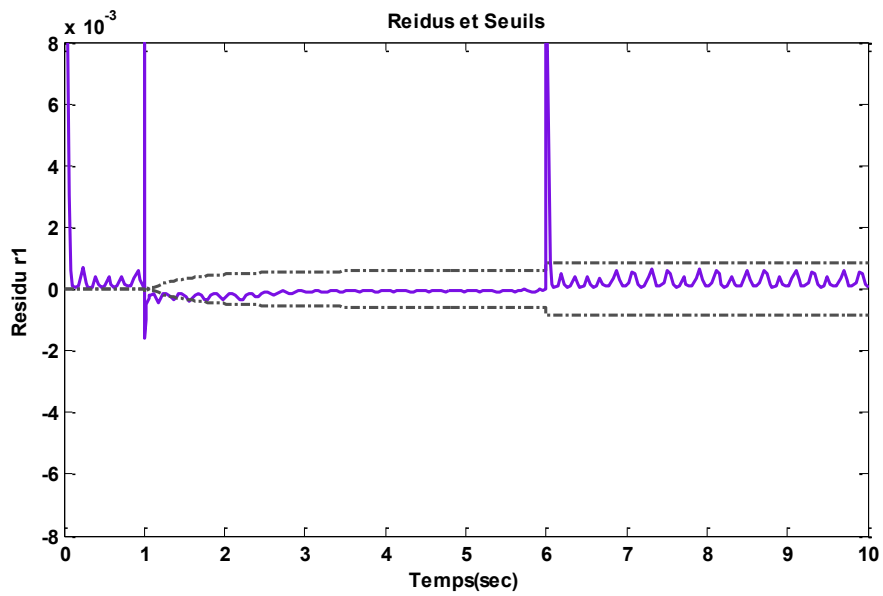


(a)

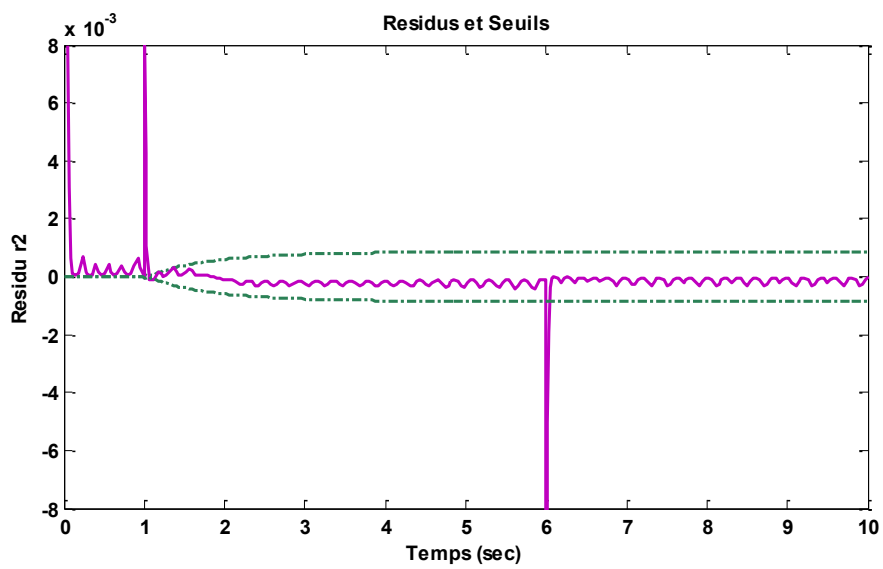


(b)

FIGURE 4.16 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 en fonctionnement défectueux (9,4%) et en présence de bruit de mesure



(a)



(b)

FIGURE 4.17 – (a),(b) les résidus r_1, r_2 en présence d'un défaut additif sur la mesure P_2 à $t = 6s$

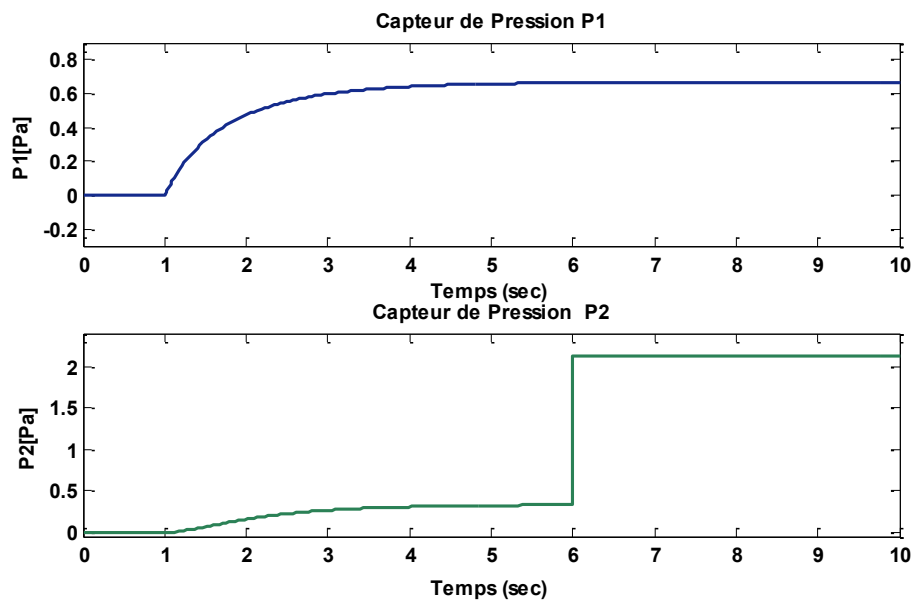
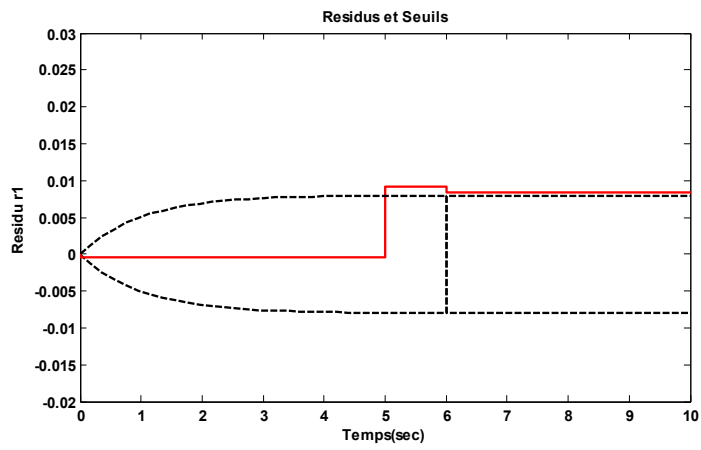
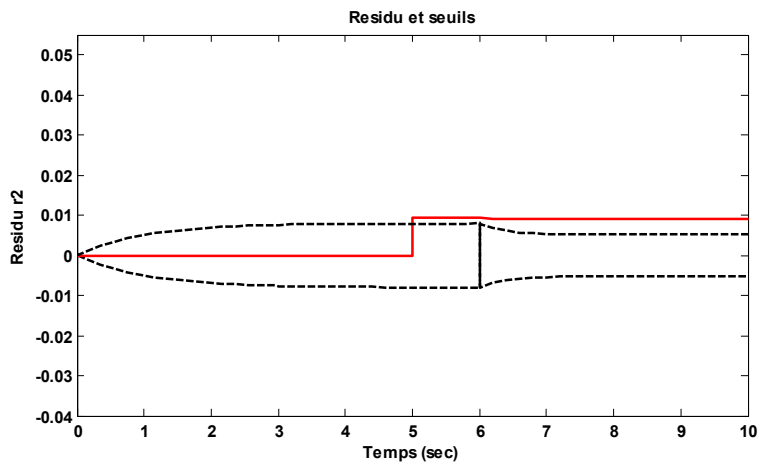


FIGURE 4.18 – Les capteurs P_1 , P_2



(a)



(b)

FIGURE 4.19 – Les résidus r_1 , r_2 avec défaut de 9.4% à $t = 5s$ sur les paramètres Cd_1 , Cd_2

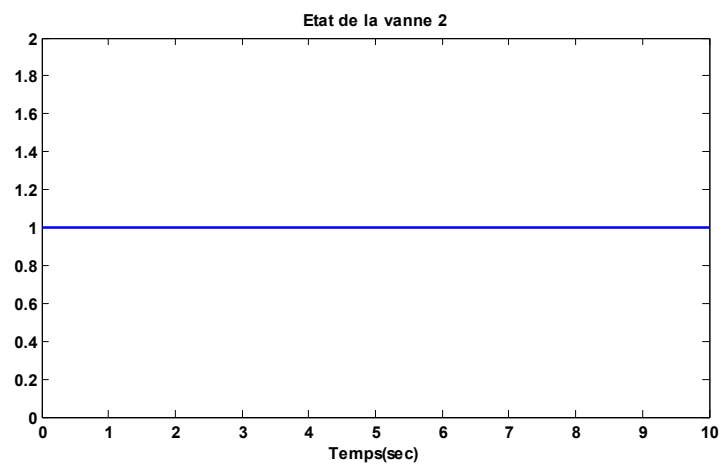
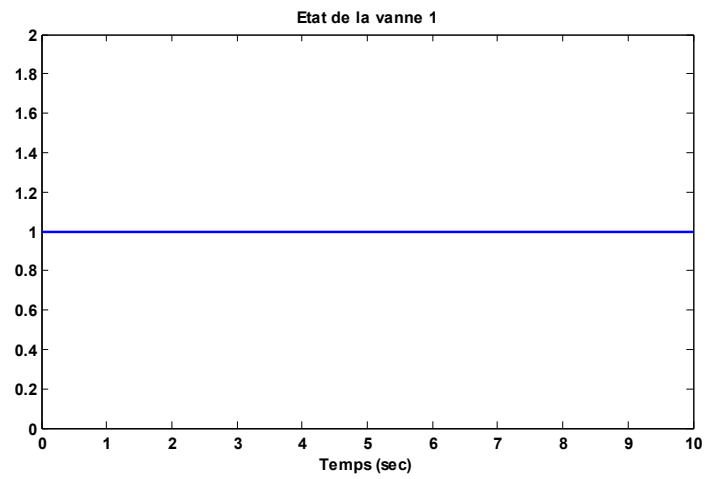


FIGURE 4.20 – État de la vanne 1 et 2

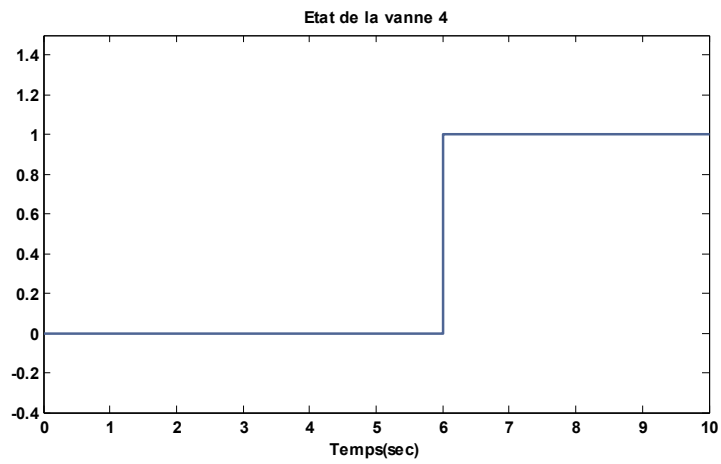
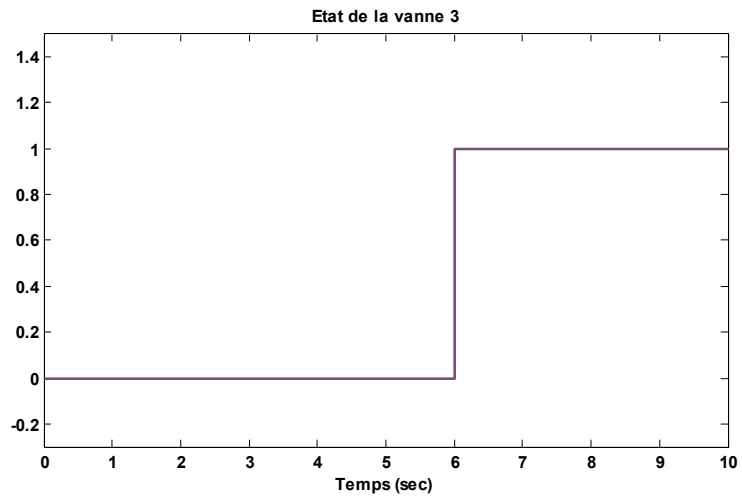


FIGURE 4.21 – État de la vanne 3 et 4

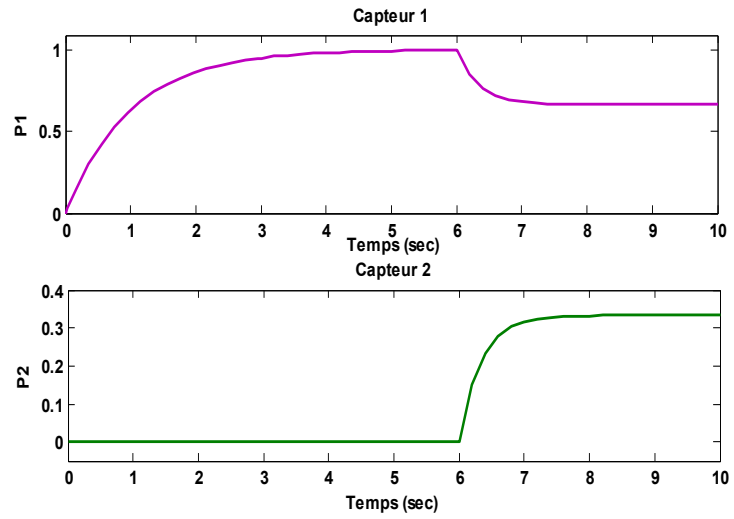


FIGURE 4.22 – Les capteurs P_1 , P_2

Conclusion générale et perspectives

Ces dernières années, une grande importance a été donnée à la thématique de surveillance des SDHs en raison de ses diverses applications industrielles. Ce travail de recherche présenté dans cette thèse est réalisé dans le cadre d'une thématique pour la conception intégrée des systèmes de supervision à base de modèle BG développé en collaboration entre les deux laboratoires, laboratoire CRISAL¹ (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) et le Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT)².

Le but de ce travail est de présenter une nouvelle perspective sur le diagnostic des défauts pour les SDHs présentant l'avantage d'utiliser un seul outil (Bond graph) pour la modélisation et le diagnostic du système hybride. L'approche proposée est démontrée sur un système hydraulique hybride.

L'outil BG a prouvé son efficacité pour la conception de systèmes de supervision pour les systèmes complexes continus, dans ce présent travail, l'outil BG a été utilisé comme outil de modélisation et diagnostic pour les SDHs, l'outil BG a été exploité afin de concevoir un système de diagnostic dans le but de la détection des défauts, en exploitant les propriétés causales et structurelles du BG.

Le choix de l'outil BG dans ce présent travail a permis non seulement une modélisation du système hybride mais aussi un diagnostic robuste aux incertitudes paramétriques, à l'aide de l'aspect graphique de l'outil BG, ces incertitudes, sont représentés sur le modèle BGH,

Dans ce mémoire, nous avons exposé une méthode de diagnostic robuste pour les SDHs allant de la modélisation jusqu'à la génération des RRAGs en utilisant un seul outil fédérateur qui est le BG.

La forme LFT est utilisée afin de représenter graphiquement les incertitudes paramétriques directement sur le modèle BGH. Cette forme BG-LFT a permis la génération systématique d'indicateurs de défauts robustes. En effet, du point de vue de la surveillance, les propriétés causales et structurelles du BG sont utilisées pour la détection de fautes affectant les composants physiques du procédé de chaque mode de fonctionnement.

Pour cela le système hybride est modélisé par BGH avec jonctions contrôlées tenant compte du changement de mode discret, ensuite le modèle BGH est mis sous la forme LFT (BGH-LFT) afin de représenter les incertitudes paramétriques, ce dernier est alors mis en causalité dérivée (modèle du diagnostic), sur la base des propriétés causales, comportementales et structurelles, les RRAGs générées sont donc robustes par rapport aux incertitudes paramétriques présentées par des seuils adaptatifs. Ces RRAGs ou indicateurs de défaut appelées généralisées sont valables à tous les modes de fonctionnement et sont obtenus systématiquement à partir du modèle. Enfin, une application à un système hydraulique a été donnée pour illustrer cette méthode.

1. <http://www.cristal.univ-lille.fr/>

2. <http://lat.univ-tlemcen.dz/index.php>

La principale contribution dans le travail présenté dans cette thèse consiste à développer une méthode de diagnostic robuste aux incertitudes paramétriques pour les SDHs, cette méthode est basée sur l'utilisation de l'outil BG en exploitant ses propriétés causales, structurelles et aussi son aspect graphique et comportemental.

On peut résumer donc cette contribution dans les points suivants :

- Modélisation des SDHs incertains par BGH.
- Diagnostic des SDHs incertains à l'aide de la forme LFT et l'outil BGH.

Comme perspectives, on propose :

- Une analyse de la sensibilité des résidus aux défauts et aux incertitudes dans le but d'estimer à priori les valeurs détectables des défauts.
- Une implémentation informatique de l'algorithme proposé sur un logiciel dédié aux BGs, allant de la modélisation jusqu'à la génération des indicateurs de défauts par exemple Symbols2000.
- Un pronostic, car dans certains cas, la détection anticipée de la présence d'une défaillance peut seulement limiter les dégâts. Le but donc est de prévenir ces défaillances avant qu'elles se produisent pour éviter les dangers possibles.

Bibliographie

- [1] B Ould Bouamama. Modélisation et supervision des systèmes en génie des procédés : Approche bond graph. *Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle USTL, Lille, France, HDR Thesis*, 2002. 14
- [2] Arun K Samantaray, Kamal Medjaher, B Ould Bouamama, Marcel Staroswiecki, and Geneviève Dauphin-Tanguy. Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(3) :237–262, 2006. 14, 46, 81
- [3] B Ould Bouamama, M Staroswiecki, and AK Samantaray. Software for supervision system design in process engineering industry. In *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, volume 6, pages 646–650, 2006. 14
- [4] Arun Kumar Samantaray and Belkacem Ould Bouamama. *Model-based process supervision : A bond graph approach*. Springer Science & Business Media, 2008. 14, 31, 47, 87
- [5] Rochdi Merzouki, AK Samantaray, M Pathak, and Belkacem Ould Bouamama. Intelligent mechatronic systems : Modelling, control and diagnosis. 2013. 14, 134
- [6] RM Redheffer. On a certain linear fractional transformation. *J. Math. Phys*, 39(0960) :269–286, 1960. 14, 69, 73
- [7] G Dauphin-Tanguy and C Siè Kam. How to model parameter uncertainties in a bond graph framework. In *European simulation symp*, volume 33, pages 121–125, 1999. 15, 69
- [8] Mohand Arab Djeziri, Rochdi Merzouki, and Belkacem Ould Bouamama. Robust monitoring of an electric vehicle with structured and unstructured uncertainties. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(9) :4710–4719, 2009. 15, 40, 69
- [9] MA Djeziri, R Merzouki, B Ould Bouamama, and G Dauphin-Tanguy. Fault detection of backlash phenomenon in mechatronic system with parameter uncertainties using bond graph approach. In *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, pages 600–605. IEEE, 2006. 15, 52, 104
- [10] Mohand Arab Djeziri. *Diagnostic des Systèmes Incertains par l'Approche Bond Graph*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2007. 15, 19, 104, 106, 120
- [11] Mohand Arab Djeziri, Rochdi Merzouki, B Ould Bouamama, and Genevieve Dauphin-Tanguy. Robust fault diagnosis by using bond graph approach. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 12(6) :599–611, 2007. 15, 40, 47, 52, 53, 69, 84, 87, 104
- [12] Youcef Touati, Rochdi Merzouki, and Belkacem Ould Bouamama. Robust diagnosis to measurement uncertainties using bond graph approach : application to intelligent autonomous vehicle. *Mechatronics*, 22(8) :1148–1160, 2012. 15, 84, 104
- [13] Youcef Touati. *Diagnostic robuste et estimation de défauts à base de modèle Bond Graph*. PhD thesis, Ph. D. dissertation, Lille 1, 2012. 15, 104
- [14] Sriram Narasimhan, Gautam Biswas, Gabor Karsai, Tal Pasternak, and Feng Zhao. Building observers to address fault isolation and control problems in hybrid dynamic systems. In *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 2393–2398. IEEE, 2000. 16, 81

- [15] Andrea Balluchi, Luca Benvenuti, Maria D Di Benedetto, and Alberto L Sangiovanni-Vincentelli. Design of observers for hybrid systems. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 76–89. Springer, 2002. 16, 41, 42
- [16] M Gomaa and S Gentil. Hybrid industrial dynamical system supervision via hybrid continuous causal petri nets. In *IEEE/SMC IMACS Symposium on Discrete Events and Manufacturing Systems*, pages 380–384, 1996. 16, 42
- [17] Gabor Karsai, Sherif Abdelwahed, and Gautam Biswas. Integrated diagnosis and control for hybrid dynamic systems. In *AIAA Guidance, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Austin, Texas (August 2003)*, 2003. 16, 41, 42
- [18] Prodip Bhowal, Dipankar Sarkar, Siddhartha Mukhopadhyay, and Anupam Basu. Fault diagnosis in discrete time hybrid systems—a case study. *Information Sciences*, 177(5) :1290–1308, 2007. 16, 43
- [19] J Lunze. Diagnosis of quantised systems. In *4th Symposium on Fault Detection*, pages 28–39, 2000. 16, 43
- [20] Jan Lunze. Diagnosis of discretely controlled continuous systems (diagnose ereignisgesteuerter systeme). *at-Automatisierungstechnik*, 54(8/2006) :385–395, 2006. 16, 43
- [21] Touria El Mezayani. *Méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides*. PhD thesis, Lille 1, 2005. 16, 82
- [22] Takrouni Asma, Nadia Zanzouri, Vincent Cocquempot, and Mekki Ksouri. Robust diagnosis for hybrid dynamical systems. 17, 45, 51, 78
- [23] Wenhui Wang, DH Zhou, and Zhengxi Li. Robust state estimation and fault diagnosis for uncertain hybrid systems. *Nonlinear Analysis : Theory, Methods & Applications*, 65(12) :2193–2215, 2006. 17, 51, 78
- [24] DEC Belkhiat, N Messai, and N Manamanni. Design of a robust fault detection based observer for linear switched systems with external disturbances. *Nonlinear Analysis : Hybrid Systems*, 5(2) :206–219, 2011. 17, 51, 78
- [25] Ye Hu and NH El-Farra. Robust fault detection and monitoring of hybrid process systems with uncertain mode transitions. In *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on*, pages 6833–6838. IEEE, 2010. 17, 51
- [26] Pieter J Mosterman and Gautam Biswas. Behavior generation using model switching a hybrid bond graph modeling technique. *SIMULATION SERIES*, 27 :177–177, 1994. 17, 49, 52, 73
- [27] Chang Boon Low, Danwei Wang, Shai Arogeti, and Ming Luo. Quantitative hybrid bond graph-based fault detection and isolation. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 7(3) :558–569, 2010. 18, 48, 94
- [28] Shai A Arogeti, Danwei Wang, Chang Boon Low, and Ming Yu. Fault detection isolation and estimation in a vehicle steering system. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 59(12) :4810–4820, 2012. 18, 48, 49, 100
- [29] Shai A Arogeti, Danwei Wang, and Chang Boon Low. Mode identification of hybrid systems in the presence of fault. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(4) :1452–1467, 2010. 18, 48, 49
- [30] Shai A Arogeti, Danwei Wang, and Chang Boon Low. Mode tracking and fdi of hybrid systems. In *Control, Automation, Robotics and Vision, 2008. ICARCV 2008. 10th International Conference on*, pages 892–897. IEEE, 2008. 18, 48
- [31] Chang Boon Low, Danwei Wang, Shai A Arogeti, and Ming Luo. Fault parameter estimation for hybrid systems using hybrid bond graph. In *Control Applications,(CCA) & Intelligent Control,(ISIC), 2009 IEEE*, pages 1338–1343. IEEE, 2009. 18, 48

- [32] Rami Levy, Shai A Arogeti, and Danwei Wang. An integrated approach to mode tracking and diagnosis of hybrid systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61(4) :2024–2040, 2014. 18, 48, 50, 100
- [33] Chang Boon Low, Danwei Wang, Shai Arogeti, and Jing Bing Zhang. Monitoring ability analysis and qualitative fault diagnosis using hybrid bond graph. In *proceedings of the 17th World Congress*, pages 10516–10521, 2008. 18, 47, 48, 49, 94, 103
- [34] B Ould Bouamama, AK Samantaray, M Staroswiecki, and G Dauphin-Tanguy. Derivation of constraint relations from bond graph models for fault detection and isolation. *SIMULATION SERIES*, 35(2) :104–109, 2003. 18, 46, 47, 87, 92, 104
- [35] Mohand Arab Djeziri. *Diagnostic des Systèmes Incertains par l’Approche Bond Graph*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2007. 18
- [36] W Borutzky. Fault indicators and adaptive thresholds from hybrid system models. In *7th Vienna international conference on mathematical modelling*, 2012. 18, 53, 54, 102, 103, 113
- [37] Mohamed Ilyas Rahal, B Ould Bouamama, and Abdelmajid Meghebbar. Hybrid bond graph for robust diagnosis-application to hydraulic system. In *Systems and Control (ICSC), 2013 3rd International Conference on*, pages 1080–1085. IEEE, 2013. 18, 104, 109
- [38] Mohamed Ilyas Rahal, Belkacem Ould Bouamama, and Abdelmajid Meghebbar. Hybrid bond graph model based for robust fault detection and isolation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 230(2) :145–163, 2016. 18, 104, 109, 121
- [39] W Borutzky. Bond graph model-based system mode identification and mode-dependent fault thresholds for hybrid systems. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 20(6) :584–615, 2014. 18, 53, 54, 103
- [40] Sanjoy K Ghoshal, Subrata Samanta, and Arun K Samantaray. Robust fault detection and isolation of hybrid systems with uncertain parameters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 226(8) :1013–1028, 2012. 18, 53, 54, 104, 113
- [41] Henry Martyn Paynter. Hydraulics by analog-an electronic model of a pumping plant. *J. Boston Society of Civil Engineering*, pages 197–219, 1959. 19, 31, 47
- [42] Ronald C Rosenberg and DC Karnopp. A definition of the bond graph language. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 94(3) :179–182, 1972. 19
- [43] DC Karnopp, DL Margolis, and RC Rosenberg. System dynamics : Modeling and simulation of mechatronic systems, © 2006 wiley. Hoboken, NJ. 19
- [44] Mohand Arab Djeziri, B Ould Bouamama, and Rochdi Merzouki. Modelling and robust fdi of steam generator using uncertain bond graph model. *Journal of Process control*, 19(1) :149–162, 2009. 19, 69
- [45] Rafika El Harabi. *Supervision des processus chimiques à base de modèles Bond Graphs*. PhD thesis, Lille 1, 2011. 19
- [46] Danwei Wang, Ming Yu, Chang Boon Low, and Shai Arogeti. *Model-based health monitoring of hybrid systems*. Springer, 2013. 19, 35, 46, 59, 63, 67, 68, 69, 94, 117
- [47] B Ould Bouamama. Conception intégrée pour la surveillance robuste des systèmes. *technique de l’ingénieur*, 2013. 19, 50, 56, 126
- [48] B Ould Bouamama. Contrôle en ligne d’une installation de générateur de vapeur par bond graph. *technique de l’ingénieur*, 2014. 19, 52

- [49] Rochdi Merzouki, Arun Kumar Samantaray, Pushparaj Mani Pathak, and Belkacem Ould Bouamama. *Intelligent mechatronic systems : modeling, control and diagnosis*. Springer Science & Business Media, 2012. 19, 47, 104, 109, 110
- [50] Alexey S Matveev and Andrey V Savkin. *Qualitative theory of hybrid dynamical systems*. Springer Science & Business Media, 2000. 22
- [51] Three-Dimensional Kneed Bipedal Walking. Hybrid systems : Computation and control. *Lecture Notes in Computer Science*, 5469, 2009. 22
- [52] Krogh B. Lynch N. *Hybrid Systems : Computation and Control*, volume 1790. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000. 22
- [53] O Maler. Hybrid and real-time systems, volume 1201 of lecture notes in computer science, 1997. 22
- [54] Yi-Liang Chen and Gregory Provan. Modeling and diagnosis of timed discrete event systems-a factory automation example. In *American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997*, volume 1, pages 31–36. IEEE, 1997. 22, 26
- [55] Janan Zaytoon. *Systèmes dynamiques hybrides*. Hermes Science Publications, 2001. 22, 26
- [56] Panos J Antsaklis. A brief introduction to the theory and applications of hybrid systems. In *Proc IEEE, Special Issue on Hybrid Systems : Theory and Applications*. Citeseer, 2000. 23
- [57] Peter J Ramadge and W Murray Wonham. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM journal on control and optimization*, 25(1) :206–230, 1987. 23
- [58] Christos G Cassandras and Stephane Lafortune. *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2008. 23
- [59] René David and Hassane Alla. *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Springer Science & Business Media, 2010. 23
- [60] Branislav Hruz and MengChu Zhou. *Modeling and control of discrete-event dynamic systems : With petri nets and other tools*, volume 59. Springer Science & Business Media, 2007. 23
- [61] Michael Stephen Branicky. *Studies in Hybrid Systems : Modeling, Analysis, and Control*. PhD thesis, Citeseer, 1995. 8, 24, 25
- [62] Yves Quenec’hdu, Hervé Gueguen, and Jean Buisson. Les systèmes dynamiques hybrides. *Automation Des Processus Mixtes : Les Systèmes Dynamiques Hybrides (ADPM)*, pages 1–8, 1994. 26
- [63] G Dauphin-Tanguy and C Rombaut. Bond graph approach of commutation phenomena. In *Proc. IFAC Conf. AIPA*, volume 89, 1989. 26
- [64] A Castelain, JP Ducreux, G Dauphin-Tanguy, and C Rombaut. Modelling and analysis of power electronic networks by bond graph. In *IMACS-TCI 90 ? Nancy*, pages 405–410. 1990. 26, 29
- [65] Jean Buisson. Analysis of switching devices with bond graphs. *journal of the Franklin Institute*, 330(6) :1165–1175, 1993. 26, 29
- [66] Jan-Erik StrSmberg. *A mode switching modelling philosophy*. PhD thesis, LinkSping University, Dept. of Electrical Eng, 1994. 26
- [67] C Valentin, M Magos, and B Maschke. Hybrid port–hamiltonian systems : From parameterized incidence matrices to hybrid automata. *Nonlinear Analysis : Theory, Methods & Applications*, 65(6) :1106–1122, 2006. 26

- [68] Claire Valentin, Miguel Magos, and Bernhard Maschke. A port-hamiltonian formulation of physical switching systems with varying constraints. *Automatica*, 43(7) :1125–1133, 2007. 26
- [69] Jean Le Bail, Hassane Alla, and René David. Hybrid petri nets. In *European Control Conference*, volume 1477. Grenoble, France, 1991. 26
- [70] H Alla, JB Cavaille, J Le Bail, and G Bel. Les systèmes de production par lot : une approche discret-continu utilisant les réseaux de petri hybrides. In *Proc. of 1st Int. Conf. on Automation of Mixed Processes (Paris, France)*, 1992. 26
- [71] Mohamed Allam. Sur l’analyse quantitative des réseaux de petri hybrides—une approche basée sur les automates hybrides. *Laboratoire d’Automatique de Grenoble*, 1998. 26
- [72] Rajeev Alur, Costas Courcoubetis, Thomas A Henzinger, and Pei-Hsin Ho. Hybrid automata : An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems. In *Hybrid Systems*, pages 209–229. Springer-Verlag, 1993. 27, 28
- [73] Yonit Kesten and Amir Pnueli. Timed and hybrid statecharts and their textual representation. In *Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems*, pages 591–620. Springer, 1991. 27
- [74] Hassane Alla and René David. Continuous and hybrid petri nets. *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, 8(01) :159–188, 1998. 27, 28
- [75] Latéfa GHOMRI. *Synthèse de contrôleur de systèmes hybrides à flux continu par réseaux de Petri hybrides*. PhD thesis, 2012. 27
- [76] Sonia Batis. *Commande d’une classe de systèmes hybrides par automates hybrides rectangulaires*. PhD thesis, Grenoble, 2013. 28
- [77] W Kopke Peter. *The Theory of Rectangular Hybrid Automata*. PhD thesis, PhD thesis, Cornell University, 1996. 28
- [78] Thomas A Henzingerz, Peter W Kopkex, Anuj Puriy, and Pravin Varaiyay. What’s decidable about hybrid automata ? y. *Sciences*, 57 :94–124, 1998. 28
- [79] CA Petri. *Kommunikation mit Automaten (English translation : Technical Report RADCTR-65-377, Vol. 1, Suppl 1, Applied Data Research, Princeton, NJ)*. PhD thesis, PhD thesis, University of Bonn, 1962. 28
- [80] R David and H Alla. Discrete, continuous and hybrid petri nets. 2005. 28
- [81] Mohamed Allam and Hassane Alla. From hybrid petri nets to hybrid automata. *Journal européen des systèmes automatisés*, 32(9-10) :1165–1185, 1998. 28
- [82] JU Thoma and Alan S Perelson. Introduction to bond graphs and their applications. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (11) :797–798, 1976. 29
- [83] Peter Dransfield. Hydraulic control systems—design and analysis of their dynamics. *Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag, Berlin*. <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0005627>, 1981. 29
- [84] Geneviève Dauphin-Tanguy and Christian Rombaut. Why a unique causality in the elementary commutation cell bond graph model of a power electronics converter. In *Systems, Man and Cybernetics, 1993. ‘Systems Engineering in the Service of Humans’, Conference Proceedings., International Conference on*, pages 257–263. IEEE, 1993. 29, 31
- [85] Jan F Broenink and Klaas CJ Wijbrans. Describing discontinuities in bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 25 :120–120, 1993. 29
- [86] GM Asher. The robust modelling of variable topology circuits using bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 25 :126–126, 1993. 29

- [87] U Soderman, Jan Top, and J-E Stromberg. The conceptual side of mode switching. In *Systems, Man and Cybernetics, 1993. 'Systems Engineering in the Service of Humans', Conference Proceedings., International Conference on*, pages 245–250. IEEE, 1993. 29
- [88] Jan-Erik Strömberg, Jan Top, and Ulf Söderman. Variable causality in bond graphs caused by discrete effects. 1993. 29
- [89] Pieter J Mosterman, Feng Zhao, Gautam Biswas, et al. An ontology for transitions in physical dynamic systems. In *AAAI/IAAI*, pages 219–224, 1998. 29, 31
- [90] Peter J Gawthrop. Hybrid bond graphs using switched i and c components. 1997. 29
- [91] W Borutzky. Discontinuities in a bond graph framework. *Journal of the Franklin Institute*, 332(2) :141–154, 1995. 29
- [92] Arun K Samantaray. Modeling and analysis of preloaded liquid spring/damper shock absorbers. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(1) :309–325, 2009. 29
- [93] Amod C Umarikar and L Umanand. Modelling of switching systems in bond graphs using the concept of switched power junctions. *Journal of the Franklin Institute*, 342(2) :131–147, 2005. 29
- [94] Chang Boon Low, Danwei Wang, Shai Arogeti, and Jing Bing Zhang. Causality assignment and model approximation for hybrid bond graph : Fault diagnosis perspectives. *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, 7(3) :570–580, 2010. 29, 47, 48, 67, 68, 100
- [95] Rebecca Margetts et al. *Modelling & analysis of hybrid dynamic systems using a bond graph approach*. PhD thesis, University of Bath, 2013. 29
- [96] Krister Edström, Jan-Erik Strömberg, and Ulf Soderman. Modelling and simulation of a switched power converter. 1997. 31
- [97] Krister Edström. Switched bond graphs : Simulation and analysis. 1999. 31
- [98] Pieter J Mosterman. An overview of hybrid simulation phenomena and their support by simulation packages. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 165–177. Springer, 1999. 31
- [99] Pieter J Mosterman and Gautam Biswas. Formal specifications for hybrid dynamical systems. In *IJCAI (1)*, pages 568–577, 1997. 31
- [100] Pieter J Mosterman and Gautam Biswas. A theory of discontinuities in physical system models. *Journal of the Franklin Institute*, 335(3) :401–439, 1998. 31, 101
- [101] Pieter J Mosterman and Gautam Biswas. A comprehensive methodology for building hybrid models of physical systems. *Artificial Intelligence*, 121(1) :171–209, 2000. 31
- [102] Pieter J Mosterman, Jan F Broenink, and Gautam Biswas. Model semantics and simulation of time scale abstractions in collision models. *Proc. Eurosim-98, Helsinki, Finland*, pages 230–237, 1998. 31
- [103] Pieter J Mosterman. Implicit modeling and simulation of discontinuities in physical system models. In *The 4th international conference on automation of mixed processes : hybrid dynamic systems*, pages 35–40, 2000. 31
- [104] Ernesto Kofman and Sergio Junco. Quantized bond graphs : An approach for discrete event simulation of physical systems. *SIMULATION SERIES*, 33(1) :369–374, 2001. 31
- [105] Ernesto Kofman. Discrete event simulation of hybrid systems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 25(5) :1771–1797, 2004. 31
- [106] Dirk Zimmer and François E Cellier. Impulse-bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 39(1) :3, 2007. 31

- [107] Wolfgang Borutzky. Bond graph modelling and simulation of fault scenarios in switched power electronic systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, page 0959651812454636, 2012. 31, 49, 102, 103
- [108] Steven X Ding. *Model-based fault diagnosis techniques : design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 2008. 36
- [109] Cristian Ghiaus. Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. *Energy and buildings*, 30(3) :221–232, 1999. 36, 80
- [110] Benjamin Kuipers. Qualitative simulation. *Artificial intelligence*, 29(3) :289–338, 1986. 36
- [111] Benjamin Kuipers. Qualitative simulation as causal explanation. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 17(3) :432–444, 1987. 36
- [112] Hwee Tou Ng. Model-based, multiple fault diagnosis of time-varying, continuous physical devices. In *Artificial Intelligence Applications, 1990., Sixth Conference on*, pages 9–15. IEEE, 1990. 36
- [113] Siddarth Subramanian and Raymond J Mooney. Qualitative multiple-fault diagnosis of continuous dynamic systems using behavioral modes. In *Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence-Volume 2*, pages 965–970. AAAI Press, 1996. 36
- [114] Q Shen and RR Leitch. Qualitative model based diagnosis of continuous dynamic systems. In *Intelligent Systems Engineering, 1992., First International Conference on (Conf. Publ. No. 360)*, pages 147–152. IET, 1992. 37
- [115] S Xia, DA Linkens, and S Bennett. Automatic modelling and analysis of dynamic physical systems using qualitative reasoning and bond graphs. *Intelligent Systems Engineering*, 2(3) :201–212, 1993. 37
- [116] DA Linkens and H Wang. Fault diagnosis based on a qualitative bond graph model, with emphasis on fault localisation. 1995. 37
- [117] CH Lo, YK Wong, and Ahmad B Rad. Intelligent system for process supervision and fault diagnosis in dynamic physical systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(2) :581–592, 2006. 37, 38, 46
- [118] CH Lo, YK Wong, and AB Rad. Model-based fault diagnosis in continuous dynamic systems. *ISA transactions*, 43(3) :459–475, 2004. 38
- [119] CH Lo, YK Wong, AB Rad, and KM Chow. Fusion of qualitative bond graph and genetic algorithms : A fault diagnosis application. *ISA transactions*, 41(4) :445–456, 2002. 38
- [120] Matthew J Daigle, Xenofon D Koutsoukos, and Gautam Biswas. Distributed diagnosis in formations of mobile robots. *Robotics, IEEE Transactions on*, 23(2) :353–369, 2007. 38, 81
- [121] J Chen and RJ Patton. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. 1999. 38, 83, 84
- [122] Marcel Staroswiecki and G Comtet-Varga. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37(5) :687–699, 2001. 38
- [123] Sohail Anwar and Lei Chen. An analytical redundancy-based fault detection and isolation algorithm for a road-wheel control subsystem in a steer-by-wire system. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 56(5) :2859–2869, 2007. 38

- [124] CH Lo, YK Wong, and Ahmad B Rad. Bond graph based bayesian network for fault diagnosis. *Applied Soft Computing*, 11(1) :1208–1212, 2011. 38
- [125] Paul M Frank and Xianchun Ding. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of process control*, 7(6) :403–424, 1997. 39
- [126] Ron J Patton, Robert N Clark, and Paul M Frank. *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*. Springer Science & Business Media, 2000. 39
- [127] S Simani, C Fantuzzi, RJ Patton, et al. Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques. 2003. 40
- [128] Rolf Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. *Automatica*, 20(4) :387–404, 1984. 40
- [129] Inseok Hwang, Sungwan Kim, Youdan Kim, and Chze Eng Seah. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 18(3) :636–653, 2010. 40
- [130] Jie Chen, Ron J Patton, and Hong-Yue Zhang. Design of unknown input observers and robust fault detection filters. *International Journal of Control*, 63(1) :85–105, 1996. 40
- [131] Sheng-Fuu Lin and An-Ping Wang. Design of observers with unknown inputs using eigenstructure assignment. *International Journal of Systems Science*, 31(6) :705–711, 2000. 40
- [132] Dan T Horak. Failure detection in dynamic systems with modeling errors. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 11(6) :508–516, 1988. 40
- [133] Z Shi, Fengshou Gu, Barry Lennox, and AD Ball. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system. *Control Engineering Practice*, 13(11) :1357–1367, 2005. 40
- [134] Sheila A. McIlraith, Gautam Biswas, Dan Clancy, and Vineet Gupta. Hybrid systems diagnosis. In *Proceedings of the Third International Workshop on Hybrid Systems : Computation and Control*, HSCC '00, pages 282–295, London, UK, UK, 2000. Springer-Verlag. 41
- [135] Vincent Cocquempot, Touria El Meznyani, and Marcel Staroswiecki. Fault detection and isolation for hybrid systems using structured parity residuals. In *Control Conference, 2004. 5th Asian*, volume 2, pages 1204–1212. IEEE, 2004. 41, 42, 44, 83, 89, 90
- [136] Sriram Narasimhan and Gautam Biswas. Model-based diagnosis of hybrid systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 37(3) :348–361, 2007. 41, 81, 82, 89, 90, 98, 100, 101
- [137] Bo Yan and Guanling Chen. Model-based fault diagnosis for ieee 802.11 wireless lans. In *Mobile and Ubiquitous Systems : Networking & Services, MobiQuitous, 2009. MobiQuitous' 09. 6th Annual International*, pages 1–10. IEEE, 2009. 41
- [138] Jordi Meseguer, Vicenç Puig, and Teresa Escobet. Fault diagnosis using a timed discrete-event approach based on interval observers : application to sewer networks. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 40(5) :900–916, 2010. 41
- [139] Jérémy Van Gorp. *Diagnostic et observation d'une classe de systèmes dynamiques hybrides. Application au convertisseur multicellulaire série*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013. 41, 43
- [140] Asma Takrouni-Hedfi. *Surveillance par observateur des systèmes dynamique hybrides*. PhD thesis, Lille 1, 2013. 41

- [141] Matthew J Daigle, Indranil Roychoudhury, Gautam Biswas, Xenofon D Koutsoukos, Ann Patterson-Hine, and Scott Poll. A comprehensive diagnosis methodology for complex hybrid systems : A case study on spacecraft power distribution systems. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 40(5) :917–931, 2010. 41, 100
- [142] Rasul Mohammadi, Shahin Hashtrudi-Zad, and Khashayar Khorasani. Diagnosis of hybrid systems : part 2-residual generator selection and diagnosis in the presence of unreliable residual generators. In *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, pages 3340–3345. IEEE, 2009. 41
- [143] Mehdi Bayoudh and Louise Travé-Massuyes. An algorithm for active diagnosis of hybrid systems casted in the des framework. In *2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems*, pages 329–334, 2009. 41, 44
- [144] Zhuohua Duan, Tengfang Long, and Zixing Cai. Fault diagnosis for hybrid dynamic systems with imperfect model based on particle filters. In *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 1212–1217, 2008. 41
- [145] Djamel Eddine Chouaib Belkhiat. *Diagnostic d’une classe de systèmes linéaires à commutations : approche à base d’observateurs robustes*. PhD thesis, Reims, 2011. 41, 45
- [146] Moamar Sayed-Mouchaweh HananeLouajri and Cécile Labarre. Diagnoser with hybrid structure for fault diagnosis of a class of hybrid dynamic systems. 2013. 41, 45
- [147] Sriram Narasimhan Feng, Feng Zhao, Gautam Biswas, and Elmer Hung. Fault isolation in hybrid systems combining model based diagnosis and signal processing. In *In Proc. 4th IFAC Symp. SAFEPROCESS*. Citeseer, 2000. 41
- [148] Xenofon Koutsoukos, Feng Zhao, Horst Haussecker, Jim Reich, and Patrick Cheung. Fault modeling for monitoring and diagnosis of sensor-rich hybrid systems. In *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on*, volume 1, pages 793–801. IEEE, 2001. 41, 82, 83, 89
- [149] Elom Ayih Domlan, Didier Maquin, and José Ragot. Diagnostic des systèmes à commutation, approche par la méthode de l’espace de parité. In *Conférence Internationale Francophone d’Automatique, CIFA*, pages 22–24, 2004. 41
- [150] Fatiha Zidani, Demba Diallo, Mohamed El Hachemi Benbouzid, and Rachid Naït-Saïd. A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed pwm inverter induction motor drive. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(2) :586–593, 2008. 41
- [151] V Coquempot, Touria El Mezyani, and Marcel Staroswiecki. Hybrid dynamical system monitoring using structured analytical redundancy relations. In *proceedings of 17ème IMACS World Congress, Paris, France*, 2005. 42
- [152] Zheng Guo Li, Chang Yun Wen, and Yeng Chai Soh. Observer-based stabilization of switching linear systems. *Automatica*, 39(3) :517–524, 2003. 42
- [153] Mostafa Mahmoud Mahmoud Gomaa. *Representation et supervision des systemes hybrides par reseaux de Petri*. PhD thesis, 1997. 42
- [154] Pieter J Mosterman. *Hybrid Dynamic Systems : A hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis*. PhD thesis, Vanderbilt University, 1997. 42, 81, 91
- [155] Haithem Derbel. *Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d’une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides*. PhD thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009. 42, 44
- [156] Talel Zouari. *Diagnostic des systèmes dynamiques hybrides à modes non linéaires*. PhD thesis, Lille 1, 2013. 43, 45

- [157] Tomohiro Takagi and Michio Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, (1) :116–132, 1985. 43
- [158] Sriram Narasimhan. *Model-based diagnosis of hybrid systems*. PhD thesis, Vanderbilt University, 2002. 43, 81, 89, 90
- [159] Feng Zhao, Xenofon Koutsoukos, Horst Haussecker, James Reich, and Patrick Cheung. Monitoring and fault diagnosis of hybrid systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, IEEE Transactions on*, 35(6) :1225–1240, 2005. 44, 83, 89
- [160] Touria El Mezayani. *Méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides*. PhD thesis, 2005. 44
- [161] Nelly Olivier. *Surveillance des systèmes dynamiques hybrides : application aux procédés*. PhD thesis, Toulouse, INSA, 2007. 44
- [162] Hamdi Fatiha. *Contribution à la synthèse d'observateurs pour les systèmes hybrides*. PhD thesis, Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2010. 44
- [163] F Kratz and D Aubry. Finite memory observer for state estimation of hybrid systems. In *Proceedings of IFAC Safeprocess*, volume 3, 2003. 45
- [164] Hassan Saadaoui, Noureddine Manamanni, Mohamed Djemai, Jean-Pierre Barbot, and Thierry Floquet. Exact differentiation and sliding mode observers for switched lagrangian systems. *Nonlinear Analysis : Theory, Methods & Applications*, 65(5) :1050–1069, 2006. 45
- [165] Jun Xu, Ai Poh Loh, and Kai Yew Lum. Observer-based fault detection for piecewise linear systems : Continuous-time cases. In *Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on*, pages 379–384. IEEE, 2007. 45
- [166] S Petterson. Switched state jump observers for switched systems. In *Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic*, 2005. 45
- [167] A Lj Juloski, WPMH Heemels, Y Boers, and F Verschure. Two approaches to state estimation for a class of piecewise affine systems. In *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on*, volume 1, pages 143–148. IEEE, 2003. 45
- [168] M Tagina, J Ph Cassar, G Dauphin-Tanguy, and M Staroswiecki. Monitoring of systems modelled by bond-graphs. *SIMULATION SERIES*, 27 :275–275, 1994. 46
- [169] B Ould Bouamama, K Medjaher, M Bayart, AK 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. 46, 81, 84, 87, 88
- [170] B Ould Bouamama, K Medjaher, AK Samantaray, and M Staroswiecki. Supervision of an industrial steam generator. part i : Bond graph modelling. *Control Engineering Practice*, 14(1) :71–83, 2006. 46, 84
- [171] K Medjaher, AK Samantaray, B Ould Bouamama, and M Staroswiecki. Supervision of an industrial steam generator. part ii : Online implementation. *Control engineering practice*, 14(1) :85–96, 2006. 46
- [172] Pieter J Mosterman and Gautam Biswas. Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 29(6) :554–565, 1999. 46, 80, 81, 82
- [173] Geneviève Dauphin-Tanguy. *Les bond graphs*. Hermès science publications, 2000. 47, 55
- [174] MA Djeziri, R Merzouki, B Ould Bouamama, and G Dauphin-Tanguy. Bond graph model based for robust fault diagnosis. In *American Control Conference, 2007. ACC'07*, pages 3017–3022. IEEE, 2007. 47, 53, 84, 87, 124, 125

- [175] Mohand Arab Djeziri, B Ould Bouamama, and Rochdi Merzouki. Robust fault diagnosis of energetic system with parameter uncertainties. In *Proceedings of the 17 th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, 2008*. 47, 52, 53, 84, 87
- [176] Chang Boon Low, Danwei Wang, Shai Arogeti, and Jing Bing Zhang. Causality assignment and model approximation for quantitative hybrid bond graph-based fault diagnosis. *International Federation of Automatic Control (IFAC), submitted, Korea, 2008*. 47, 48
- [177] Danwei Wang, Chang Boon Low, Hong Dan Zhang, Junhong Zhou, et al. Mode tracking of hybrid systems in fdi framework. In *2008 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pages 841–846, 2008. 48
- [178] MO Aguilar-Justo and CA de Luna-Ortega. Fdi with hybrid bond graphs in the full bridge inverter. In *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011 8th International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2011. 49
- [179] Indranil Roychoudhury, Matthew Daigle, Pieter J Mosterman, Gautam Biswas, and Xenofon Koutsoukos. A method for efficient simulation of hybrid bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 39(1) :177, 2007. 49, 62, 81, 90
- [180] Indranil Roychoudhury, Matthew Daigle, Gautam Biswas, and Xenofon Koutsoukos. Efficient simulation of hybrid systems : An application to electrical power distribution systems. In *Proceedings of the 22nd European Conference on Modeling and Simulation*, pages 471–477, 2008. 49, 62, 90
- [181] Indranil Roychoudhury, Matthew J Daigle, Gautam Biswas, and Xenofon Koutsoukos. Efficient simulation of hybrid systems : A hybrid bond graph approach. *Simulation*, 87(6) :467–498, 2011. 49
- [182] Taher Mekki, Slim Triki, and Anas Kamoun. Diagnosis of switching systems using hybrid bond graph. *arXiv preprint arXiv :1312.2047*, 2013. 50
- [183] Wenhui Wang, Linglai Li, Donghua Zhou, and Kaidi Liu. Robust state estimation and fault diagnosis for uncertain hybrid nonlinear systems. *Nonlinear analysis : Hybrid systems*, 1(1) :2–15, 2007. 51, 78
- [184] Casimir Sié Kam. *Les Bond Graphs pour la modélisation des systèmes Linéaires Incertains*. PhD thesis, 2001. 52, 72
- [185] SK Ghoshal and S Samanta. Robust fault diagnosis and prognostics of a hoisting mechanism : A simulation study. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3(2), 2011. 52, 103, 126
- [186] Walid Bouallegue, Salma Bouslama Bouabdallah, and Moncef Tagina. Diagnosis of bond graph modeled uncertain parameters systems using residuals sensitivity. In *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on*, pages 593–600. IEEE, 2010. 52
- [187] Belkacem OULD BOUAMAMA and Geneviève Dauphin-Tanguy. Modélisation par bond graph : Éléments de base pour l'énergétique. *Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique*, (BE8280), 2006. 55
- [188] W MARQUIS-FAVRE and A JARDIN. Bond graph pour la conception des systèmes mécatroniques. *Techniques de l'ingénieur*, 2012. 55
- [189] Geneviève Dauphin-Tanguy, Ahmed Rahmani, and Christophe Sueur. Bond graph aided design of controlled systems. *Simulation Practice and Theory*, 7(5) :493–513, 1999. 55
- [190] J Thoma and B Ould Bouamama. *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering : A Bond Graph Approach*. Springer Science & Business Media, 2000. 55

- [191] Bruno ALLARD and Hervé MOREL. Utilisation des graphes de liens en électronique de puissance. *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, 4(D3064), 2005. 55
- [192] G Dauphin-Tanguy, B Ould Bouamama, C Sueur, and A Rahmani. la modélisation, la commande et la surveillance. 56, 89
- [193] C Sueur and G Dauphin-Tanguy. Structural controllability/observability of linear systems represented by bond graphs. *Journal of the Franklin Institute*, 326(6) :869–883, 1989. 72, 90, 120
- [194] Ming Yu, Danwei Wang, Ming Luo, and Lei Huang. Prognosis of hybrid systems with multiple incipient faults : augmented global analytical redundancy relations approach. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 41(3) :540–551, 2011. 73
- [195] Paul M Frank. Enhancement of robustness in observer-based fault detection†. *International Journal of control*, 59(4) :955–981, 1994. 77, 78
- [196] Jie Chen. *Robust residual generation for model-based fault diagnosis of dynamic systems*. PhD thesis, University of York, 1995. 78, 106
- [197] Weiyi Liu and Inseok Hwang. Robust estimation algorithm for a class of hybrid systems with unknown continuous fault inputs. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 136–141. IEEE, 2010. 78
- [198] Ye Hu and NH El-Farra. Robust fault detection and monitoring of hybrid process systems with uncertain mode transitions. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 78
- [199] Wassim El Osta. *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I; ECOLE CENTRALE DE LILLE, 2005. 79, 80, 84
- [200] Jiurgen Greifeneder and François E Cellier. Modeling convective flows using bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 33(1) :276–284, 2001. 80
- [201] Hang Wang and Derek Linkens. *Intelligent supervisory control*. World Scientific, 1996. 80
- [202] Takehisa Kohda, Hideaki Katsube, Hiroshi Fujihara, and Koichi Inoue. Identification of system failure causes using bond graph models. In *Systems, Man and Cybernetics, 1993. 'Systems Engineering in the Service of Humans', Conference Proceedings., International Conference on*, pages 269–274. IEEE, 1993. 80
- [203] P Haves, TI Salsbury, and JA Wright. Condition monitoring in hvac subsystems using first principles models. Technical report, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), 1996. 80
- [204] Won-Yong Lee, Cheol Park, and George E Kelly. Fault detection in an air-handling unit using residual and recursive parameter identification methods. *Transactions-American Society Of Heating Refrigerating And Air Conditioning Engineers*, 102 :528–539, 1996. 80
- [205] Johan de Kleer and Brian C Williams. Readings in model-based diagnosis. *chapter Diagnosing multiple faults*, pages 100–117, 1992. 80
- [206] Johan De Kleer and Brian C Williams. Diagnosing multiple faults. *Artificial intelligence*, 32(1) :97–130, 1987. 80
- [207] Sheila A McIlraith. Explanatory diagnosis : Conjecturing actions to explain observations. 1998. 80

- [208] Andreas Malik and Peter Struss. Diagnosis of dynamic systems does not necessarily require simulation. In *Proc. 7th Int. Workshop on Principles of Diagnosis*, pages 147–156, 1996. 80
- [209] DL Rosenberg, DL Margolis, and DC Karnopp. System dynamics : modeling and simulation of mechatronic systems, 2000. 81
- [210] Eric-J Manders, Sriram Narasimhan, Gautam Biswas, and Pieter J Mosterman. A combined qualitative/quantitative approach for fault isolation in continuous dynamic systems. *Budapest, Hungary*, pages 1074–1079, 2000. 81
- [211] Matthew Daigle, Indranil Roychoudhury, Gautam Biswas, and Xenofon Koutsoukos. Efficient simulation of component-based hybrid models represented as hybrid bond graphs. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 680–683. Springer, 2007. 81
- [212] Matthew Daigle, Indranil Roychoudhury, Gautam Biswas, and Xenofon Koutsoukos. Efficient simulation of component-based hybrid models represented as hybrid bond graphs. *ISIS*, 6 :712. 81
- [213] Eric-J Manders, Gautam Biswas, Nagabhushan Mahadevan, and Gabor Karsai. Component-oriented modeling of hybrid dynamic systems using the generic modeling environment. In *null*, pages 159–168. IEEE, 2006. 81
- [214] Matthew Daigle, Xenofon Koutsoukos, and Gautam Biswas. An integrated approach to parametric and discrete fault diagnosis in hybrid systems. *ISIS*, 7 :815. 81, 83, 101
- [215] Matthew Daigle, Xenofon Koutsoukos, and Gautam Biswas. An integrated approach to parametric and discrete fault diagnosis in hybrid systems. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 614–617. Springer, 2008. 81, 83
- [216] Michael W Hofbaur and Brian C Williams. Hybrid diagnosis with unknown behavioral modes. Technical report, DTIC Document, 2002. 83
- [217] Sriram Narasimhan and Lee Brownston. Hyde—a general framework for stochastic and hybrid modelbased diagnosis. In *Proc. 18th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX’07), Nashville, USA*, pages 162–169. Citeseer, 2007. 83
- [218] Michael W Hofbaur and Brian C Williams. Mode estimation of probabilistic hybrid systems. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 253–266. Springer, 2002. 83
- [219] Richard Dearden and Dan Clancy. *Particle filters for real-time fault detection in planetary rovers*. Defense Technical Information Center, 2002. 83
- [220] Sriram Narasimhan, Richard Dearden, and Emmanuel Benazera. Combining particle filters and consistency-based approaches for monitoring and diagnosis of stochastic hybrid systems. In *15th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX04), Carcassonne, France*. Citeseer, 2004. 83
- [221] Emmanuel Benazera, Louise Trave-Massuyes, and Philippe Dague. *State tracking of uncertain hybrid concurrent systems*. Defense Technical Information Center, 2002. 83
- [222] GK Fourlas, KJ Kyriakopoulos, and NJ Krikelis. Fault diagnosis of hybrid systems. In *Intelligent Control, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pages 832–837. IEEE, 2005. 83
- [223] Maria Domenica Di Benedetto, Stefano Di Gennaro, and Alessandro D’Innocenzo. Diagnosability verification for hybrid automata. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 684–687. Springer, 2007. 83
- [224] D van Schrick. Remarks on terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis. In *Preprints of the 3rd IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS’97*, pages 959–964, 1997. 84

- [225] Mohamed Ilyas Rahal, Abdelmajid Meghebbar, and Mounira Benalel. Application de la méthode fdi basée sur le modèle bond graph pour la détection et l'isolation des fautes. In *Deuxième Conférence Internationale sur la Maintenance , la Gestion la Logistique et l'Electrotechnique , CIMGLE'12, ENSET Oran, Algérie, 2012*. 84
- [226] B Ould Bouamama, G Dauphin-Tanguy, M Staroswiecki, and D Amo-Bravo. Bond graph analysis of structural fdi properties in mechatronic systems. In *In proceeding of the 1st Conference on Mechatronic Systems*, pages 1057–1062, 2000. 84
- [227] Frédéric Busson. *Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés*. PhD thesis, Lille 1, 2002. 84
- [228] Rim Mrani Alaoui. *Conception d'un module de diagnostic à base de suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques : application en ligne à un générateur de vapeur*. PhD thesis, Lille 1, 2004. 84
- [229] Youcef Touati, Rochdi Merzouki, and B Ould-Bouamama. Fault detection and isolation in presence of input and output uncertainties using bond graph approach. In *Proceedings of the 5th International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA 2011). DIPTM University of Genoa*, pages 221–227, 2011. 84, 104
- [230] Youcef Touati, Belkacem Ould Bouamama, and Rochdi Merzouki. Robust residuals generation and evaluation using bond graph and linear filtering. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on*, pages 2318–2323. IEEE, 2011. 84, 104
- [231] Youcef Touati, Rochdi Merzouki, and Belkacem Ould Bouamama. Bond graph model based for fault estimation and isolation. In *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, volume 8, pages 138–143, 2012. 84
- [232] Mogens Blanke and Jochen Schröder. *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer, 2006. 85
- [233] Vincent Cocquempot. *Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2004. 85
- [234] Andrew L Dulmage and Nathan S Mendelsohn. Coverings of bipartite graphs. *Canadian Journal of Mathematics*, 10(4) :516–534, 1958. 86
- [235] B Ould Bouamama, G Biswas, Rui Loureiro, and Rochdi Merzouki. Graphical methods for diagnosis of dynamic systems : Review. *Annual Reviews in Control*, 38(2) :199–219, 2014. 87
- [236] Kamal Medjaher. *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels*. PhD thesis, Lille 1, 2005. 87
- [237] B Ould-Bouamama, Rafika El Harabi, Mohamed Naceur Abdelkrim, and MK Ben Gayed. Bond graphs for the diagnosis of chemical processes. *Computers & chemical engineering*, 36 :301–324, 2012. 89
- [238] Samir Benmoussa. *Approche Bond Graph pour la détectabilité et l'isolabilité algébriques de défauts composants*. PhD thesis, Lille 1, 2013. 89
- [239] Pieter J Mosterman. Diagnosis of physical systems with hybrid models using parametrized causality. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 447–458. Springer-Verlag, 2001. 90
- [240] W Borutzky, G Dauphin-Tanguy, and JU Thoma. Advances in bond graph modelling : theory, software, applications. *Mathematics and computers in simulation*, 39(5) :465–475, 1995. 91

- [241] Eric Jan Manders, Pieter J Mosterman, and Gautam Biswas. Signal to symbol transformation techniques for robust diagnosis in transcend. In *Tenth International Workshop on Principles of Diagnosis*, pages 155–165, 1999. 98
- [242] Matthew J Daigle, Xenofon D Koutsoukos, and Gautam Biswas. An event-based approach to integrated parametric and discrete fault diagnosis in hybrid systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 32(5) :487–510, 2010. 100
- [243] Meera Sampath, Raja Sengupta, Stephane Lafortune, Kasim Sinnamohideen, and Demosthenis C Teneketzis. Failure diagnosis using discrete-event models. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 4(2) :105–124, 1996. 100, 101, 102
- [244] Tarun Kumar Bera, Rochdi Merzouki, Belkacem Ould Bouamama, and Arun Kumar Samantaray. Design and validation of a reconfiguration strategy for a redundantly actuated intelligent autonomous vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 226(8) :1060–1076, 2012. 100
- [245] VL Krishnan, PM Pathak, SC Jain, and AK Samantaray. Reconfiguration of four-legged walking robot for actuator faults. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 226(1) :11–26, 2012. 100
- [246] Shai Arogeti, Danwei Wang, Chang Boon Low, Ming Luo, et al. Energy-based mode tracking of hybrid systems for fdi. *Systems, Man, and Cybernetics : Systems, IEEE Transactions on*, 43(1) :14–28, 2013. 101
- [247] Sheila McIlraith, Gautam Biswas, Dan Clancy, and Vineet Gupta. Hybrid systems diagnosis. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 282–295. Springer, 2000. 101
- [248] Sriram Narasimhan and Gautam Biswas. An approach to model-based diagnosis of hybrid systems. In *Hybrid Systems : Computation and Control*, pages 308–322. Springer, 2002. 101
- [249] R Levy and S Arogeti. Fault diagnosis of hybrid system and its applications to the power system of an automated guided vehicle. 101
- [250] W Borutzky. Analytical redundancy relations from bond graphs of hybrid system models. In *Proceedings of the 5th International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA 2011)*, pages 43–49, 2011. 102
- [251] JP Ducreux, G Dauphin-Tanguy, and C Rombaut. Bond graph modelling of commutation phenomena in power electronics circuit. *SIMULATION SERIES*, 25 :132–132, 1993. 102
- [252] Wolfgang Borutzky. Bond-graph-based fault diagnosis in switched power electronic systems. In *Proceedings of the 32nd IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC 2013)*. IASTED, pages 325–332, 2013. 102
- [253] Scilab Enterprises. Scilab : Free and open source software for numerical computation (version 5.5. 0), 2014. 103
- [254] Casimir Sié Kam and Geneviève Dauphin-Tanguy. Bond graph models of structured parameter uncertainties. *Journal of the Franklin Institute*, 342(4) :379–399, 2005. 104
- [255] Dean Karnopp. State variables and pseudo bond graphs for compressible thermofluid systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 101(3) :201–204, 1979. 104
- [256] Wolfgang Borutzky. Bond graph model-based fault detection using residual sinks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 223(3) :337–352, 2009. 104

- [257] Arun Kumar Samantaray and Sanjoy Kumar Ghoshal. Sensitivity bond graph approach to multiple fault isolation through parameter estimation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 221(4) :577–587, 2007. 104
- [258] Peter J Gawthrop. Sensitivity bond graphs. *Journal of the Franklin Institute*, 337(7) :907–922, 2000. 104
- [259] Jose M Cabanellas, Jesus Felez, and Carlos Vera. A formulation of the sensitivity analysis for dynamic systems optimization based on pseudo bond graphs. *SIMULATION SERIES*, 27 :135–135, 1994. 104
- [260] Wolfgang Borutzky and J Granda. Bond graph based frequency domain sensitivity analysis of multidisciplinary systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 216(1) :85–99, 2002. 104
- [261] Wolfgang Borutzky and J Granda. Determining sensitivities from an incremental true bond graph. *SIMULATION SERIES*, 33(1) :3–8, 2001. 104
- [262] Wolfgang Borutzky. *Bond Graph Modelling of Engineering Systems*. Springer, 2011. 104
- [263] A Emami-Naeini, MM Akhter, and MM Rock. Robust detection, isolation, and accommodation for sensor failures. 1986. 105
- [264] Abbas Emami-Naeini, Muhammad M Akhter, and Stephen M Rock. Effect of model uncertainty on failure detection : the threshold selector. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 33(12) :1106–1115, 1988. 105, 106
- [265] X Ding and PM Frank. Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation. 1991. 105, 106
- [266] RJ Patton and J Chen. A review of parity space approaches to fault diagnosis. In *IFAC Safeprocess Conference*, pages 65–81, 1991. 105
- [267] RJ Patton and J Chen. Robustness in model-based fault diagnosis. 1992. 105
- [268] Ron J Patton and J Chen. Advances in fault diagnosis using analytical redundancy. In *Plant Optimisation for Profit (Integrated Operations Management and Control), IEE Colloquium on (Digest No. 1993/019)*, pages 6–1. IET, 1993. 105
- [269] EG Gai, MB Adams, BK Walker, et al. Correction to determination of failure thresholds in hybrid navigation. *IEEE Trans. Aero. & Electron. Syst.*, pages 696–697, 1978. 105
- [270] Bruce K Walker and Eliezer Gait. Fault detection threshold determination technique using markov theory. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2(4) :313–319, 1979. 105
- [271] BK Walker. Fault detection threshold determination using markov theory. 1989. 105
- [272] PM Frank and X Ding. Frequency domain approach to minimizing detectable faults in {FDI} systems. *Appl. Math. & Comp. Sci.*, 3(3) :417–443, 1993. 105
- [273] X Ding, L Guo, and PM Frank. A frequency domain approach to fault detection of uncertain dynamic systems. In *Decision and Control, 1993., Proceedings of the 32nd IEEE Conference on*, pages 1722–1727. IEEE, 1993. 105
- [274] PM Frank. Advances in observer-based fault diagnosis. In *Proceedings of the international Conference on fault diagnosis TOOLDIAG'93, 1993*, pages 817–836, 1993. 105
- [275] R Seliger and PM Frank. Robust residual evaluation by threshold selection and a performance index for nonlinear observer-based fault diagnosis. 1993. 105
- [276] YE Faitakis, S Thapliyal, and JC Kantor. Computing bounds for a simple fault detection scheme. In *American Control Conference, 1994*, volume 3, pages 2638–2642. IEEE, 1994. 105

- [277] RN Clark. State estimation schemes for instrument fault detection. 2010. 105, 106
- [278] A Emami-Naeini, MM Akhter, and SM Rock. Robust detection, isolation, and accommodation for sensor failures.[in jet engine control systems. 1985. 106
- [279] AJ Isaksson. An on-line threshold selector for failure detection. 1993. 106
- [280] Ron J Patton. Robust model-base fault diagnosis : The state of the art. In *Fault detection, supervision, and safety for technical proceses : SAFEPROCESS'94 : IFAC symposium, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 13-16 June 1994*, volume 1, pages 1–27. 107
- [281] K Danai and VB Jammu. Robust residual generation for fault diagnosis thru pattern classification. In *Proceedings of the 13th World Congress of IFAC, San Francisco, US, Jun 30 - Jul 5, 1996*, pages 193–198. 107
- [282] Mohand Arab Djeziri, B Ould Bouamama, Geneviève Dauphin-Tanguy, and Rochdi Merzouki. Lft bond graph model-based robust fault detection and isolation. In *Bond Graph Modelling of Engineering Systems*, pages 105–133. Springer, 2011. 109, 120
- [283] Götz Alefeld and Günter Mayer. Interval analysis : theory and applications. *Journal of computational and applied mathematics*, 121(1) :421–464, 2000. 110
- [284] Belkacem Ould Bouamama. Diagnostic en ligne à base de modèle bond graph. *REE Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, pages 111–117, 2010. 122

الملخص:

هذه الأطروحة تتعلق بتصميم نظام لكشف و تحديد الأخطاء القوية و المتينة بالنسبة للشكوك الحدودي للانظمة الهجينة استنادا من النموذج رسم الروابط الهجين BGH تحت الشكل التحول الخطي الكسري LFT .

بناء على المنشورات العلمية الموجودة، الانظمة الهجينة مصاغة لكل نمط من أنماط التشغيل التي يتم إنشاؤها لمؤشرات الأخطاء الحتمية.

يمكن تلخيص الفوائد العلمية لهذا البحث على النحو التالي: (1) استخدام نموذج BGH غير المؤكد بناء على المفارق المتحكم و تمثل جميع أنماط التشغيل، (2) استغلال الخصائص الهيكلية و السببية BGHLFT لأجل إيجاد العلاقات التحليلية التكرارية الشاملة و العتبات الكشف القوية بالنسبة للشكوك الحدودي و صالحة لجميع أنماط تشغيل النظام الهجين، و أخيرا (3) استخدام أداة واحدة : النموذج BGH للتشخيص ليس فقط للنمذجة و لكن أيضا للمراقبة على الخط .

تم اختبار الطريقة المقترحة على دارة كهربائية متحولة و نظام هيدروليكي كمنات البحث : رسم الروابط الهجين، الشكوك الحدودي، كشف، متين

Résumé

Le travail de thèse concerne la conception intégrée d'un système de détection et localisation de fautes robuste aux incertitudes paramétriques pour les systèmes hybrides à base de modèle bond graph hybride (BGH) sous la forme LFT (Transformations linéaires fractionnelles).

Sur la base de la littérature consultée, les systèmes hybrides sont principalement modélisés pour chaque mode de fonctionnement pour lequel sont générés des indicateurs de fautes déterministes.

L'intérêt scientifique de la présente recherche peut être résumé comme suit : (1) l'utilisation d'un seul modèle BGH incertain basé sur les jonctions contrôlées et représentant l'ensemble des modes de fonctionnement, (2) exploitation des propriétés structurelles et causales du BGH LFT pour la génération systématique de Relations de Redondance Analytiques Globales (RRAG) et des seuils de détection robustes aux incertitudes paramétriques et, valides pour tous les modes de fonctionnement, et enfin (3) l'utilisation d'un seul outil : le modèle BGH de Diagnostic (BGHD), pour non seulement la modélisation mais aussi la surveillance en ligne.

La démarche développée a été illustrée par un exemple pédagogique représentant un circuit électrique à commutation et par une application à un système hydraulique.

Mots clés : bond graph hybride, incertitudes paramétriques, détection, robuste.

Abstract

The present PH.D thesis deals with integrated design of robust Fault Detection and Isolation system (FDI) based on Hybrid Bond Graph (HBG) in Linear Fractional Transformation (LFT) form.

Based on consulted literature about hybrid systems, each operating mode is mainly modelled by specific model for which are generated determinist fault indicators.

The innovative interest of developed research can be summarized as follows : (1) use only one HBG uncertain model based on controlled junctions and representing all operating modes, (2) structural and causal properties of the LFT HBG are exploited for systematic generation of Global Analytical Redundancy Relations (GARRs), and detection thresholds, robust to parameter uncertainties, and (3) finally use of only one tool : the Diagnosis Hybrid Bond Graph (DHBG) for not only modelling but also for online surveillance.

The developed approach is illustrated by electrical circuit pedagogical example and application to hydraulic system.

Keywords : hybrid bond graph, parameter uncertainties, detection, robust.