



Numéro d'ordre : 41246

Thèse de doctorat de l'Université LILLE 1

École Polytechnique Universitaire de LILLE

École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur 072

LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE GÉNIE INFORMATIQUE ET SIGNAL

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

présentée par

Nizar CHATTI

intitulée

Contribution à la supervision des systèmes dynamiques à base des Bond Graphs Signés

Soutenue le 4 Décembre 2013

devant le jury composé de

Présidente :

Geneviève DAUPHIN-TANGUY Prof. à l'École Centrale de LILLE

Rapporteurs :

Daniel HISSEL Prof. à l'université de Franche-Comté

Frédéric HAMELIN Prof. à l'université de Lorraine

Examineur :

Kamal MEDJAHER MdC. à l'ENSM de Besançon

Invité :

Rochdi MERZOUKI Prof. à Polytech'Lille

Directeurs de thèse :

Belkacem OULD-BOUAMAMA Prof. à Polytech'Lille

Anne-Lise GEHIN MdC. à Polytech'Lille

Université LILLE 1 Sciences et Technologies
École Polytechnique Universitaire de LILLE
École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur
Laboratoire d'Automatique Génie Informatique et Signal
Équipe Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée de Systèmes
Cité Scientifique
Boulevard Paul LANGEVIN
59655 VILLENEUVE D'ASCQ
FRANCE.

A mes parents, ma soeur et mon frère ...



Remerciements

A l'issue de ces trois années, je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées et qui ont contribué à l'aboutissement de ce projet personnel et professionnel qu'est la thèse.

Je remercie Monsieur Belkacem Ould Bouamama, Professeur et directeur de l'équipe MOCIS et Monsieur Vincent Cocquempot, Professeur et directeur de l'équipe STF, pour m'avoir accueilli dans leurs équipes.

Je tiens également à remercier Belkacem Ould Bouamama, Professeur et directeur de recherche à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, Anne Lise Gehin, Maître de Conférences à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille et Rochdi Merzouki, Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille et manager du projet européen InTraDE pour m'avoir accepté en thèse et pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un projet européen de grande envergure et sur une thématique très originale. Je suis admiratif de leurs immenses connaissances scientifiques et de leurs capacités à établir des ponts entre des domaines très variés. Je les remercie du fond du coeur car ma recherche a grandement bénéficié de leur pédagogie, de leur soutien et de toutes les discussions instructives et fructueuses que nous avons eues durant toute la durée de ce travail de recherche.

Ils ont toujours eu des réponses à mes questions, ce qui m'a permis d'explorer de la manière la plus complète possible ma problématique de recherche, d'oser proposer de nouvelles idées et d'éviter toute forme de paresse intellectuelle. C'est ainsi que j'ai appris le métier de chercheur et je leur serai toujours reconnaissant. Je les remercie également de m'avoir toujours encouragé à diffuser ma recherche dans de nombreux séminaires, réunions techniques, journaux de rang A et différentes conférences internationales reconnues, et à dialoguer avec les autres chercheurs afin de me faire connaître au sein de la commu-

nauté automatique. Je les remercie enfin et surtout de m'avoir transmis leur passion pour la recherche qui m'a permis de m'épanouir scientifiquement et humainement ces dernières années.

Je remercie Monsieur Daniel Hissel, Professeur à l'université de Belfort Montbéliard et Monsieur Frédéric Hamelin, Professeur à l'université Henry Poincaré à Nancy¹ d'avoir accepté d'être les rapporteurs actifs de ce manuscrit de thèse.

Tous mes remerciements vont aux personnes pré-citées, ainsi qu'à Madame Geneviève Dauphin-Tanguy, Professeur à l'École Centrale de Lille et à Monsieur Kamal Medjaher, Maître de conférences à l'ENSMM de Besançon pour avoir accepté de participer au jury de ma soutenance de thèse.

Je remercie également tous les membres du jury pour leurs commentaires constructifs et pour toutes les discussions fructueuses que nous avons eues et pour avoir apporté un regard neuf sur mes travaux.

Je remercie aussi Marcelle, Christine, Olivier et Michel pour leur aide très précieuse.

Mes remerciements vont également à mes collègues et amis des deux équipes MOCIS et STF. Je tiens à remercier également tous les membres du projet européen pour leur soutien et leur coopération très constructive que ce soit à Nancy, à Liverpool, à Dublin ou à Oostend. Je remercie donc Blaise pour son aide très précieuse, Ji Young, Thanh, Kay, Jano...

Je remercie également mes collègues Mohit, Pushendra, Tarun, Othman, Gerardo, Thor, Xian, Mohamed, Wissam, Youssef, Mayank, Vincent, Nicolas, Coralie, Wissam, Youssef, Achille, Nourddine, Ziad...



Acronymes

AB Anormal, abréviation du terme anglais ABnormal

ACP Analyse en Composantes Principales

AMDEC Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité

BG Bond Graph

BGS Bond Graph Signé

COMPS Composants, abréviation du terme anglais COMPOnentS

DX Communauté de l'intelligence artificielle

EKF Filtre de Kalman étendu connu sous l'expression anglaise Extended kalman Filter

FDI Détection et isolation de défauts connus sous l'expression anglaise Fault Detection and Isolation

HAZOP HAZard and OPerability study

InTraDE Intelligent Transportation for Dynamique Environment

LAGIS Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal

LFT Transformations linéaires fractionnelles connues en anglais sous l'expression Linear Fractional Transformations

MdF Mode de Fonctionnement

MGC Modèles Génériques de composants

MOCIS Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée des Systèmes

MSD Matrice de signature de défauts connue sous l'expression anglaise Fault Signature matrix ou FSM

OBS Observations, abréviation du terme anglais OBServations

PàC Pile à Combustible

RRA Relation de Redondances Analytiques

SD Description du système, abréviation du terme anglais System Description

SDG Graphe orienté signé connu sous l'expression anglaise Signed Directed Graph

STF Systèmes Tolérants aux Fautes

TCG Graphe causal temporel connu sous l'expression anglaise Temporal Causal Graph

UIF Filtre à entrées inconnues connu sous l'expression anglaise Unknown Inputs Filter

UIO Observateur à entrées inconnues connu sous l'expression anglaise Unknown Inputs Observer

UKF Unscented Kalman Filter



TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	17
1.1	Contexte général	17
1.2	Problématique et positionnement scientifique	19
1.2.1	Objectif de la thèse	19
1.2.2	Contexte du projet européen InTraDE	19
1.2.3	Problématique	22
1.3	Contributions	24
1.4	Valorisation du travail de recherche	25
1.5	Organisation de la thèse	27
2	Approches qualitatives et quantitatives pour le diagnostic des Σ continus	29
2.1	Introduction	29
2.2	Approches quantitatives	33
2.2.1	Approches basées sur la génération des résidus	33
2.2.2	Observateurs	39
2.2.3	Méthodes d'analyse de données	41
2.3	Approches qualitatives	43
2.3.1	Approches DX	43
2.3.2	Approches relationnelles	45
2.3.3	Approches graphiques	53
2.4	Synthèse	56
2.5	Conclusion	58
3	Formalisme mathématique du Bond Graph Signé (BGS)	59
3.1	Problématique	59
3.2	Formalisme mathématique des BGS	62

3.2.1	Définition et propriétés du BGS	63
3.2.2	Construction du BGS	68
3.3	Modèle Générique de Composant (MGC)	76
3.3.1	Modèle externe d'un service	76
3.3.2	Notion de mode de fonctionnement (MdF)	77
3.3.3	Définition formelle d'un MGC	77
3.3.4	Agrégation des MGC	78
3.3.5	Modèle interne d'un service	80
3.4	Conclusion	81
4	Diagnostic de fautes simples et multiples moyennant les raisonnements quantitatif et qualitatif	83
4.1	Introduction	84
4.2	Diagnostic quantitatif	85
4.2.1	Surveillabilité structurelle à base du BG	85
4.2.2	Génération des RRAs à partir du BG	87
4.2.3	Exemple d'illustration	89
4.3	Diagnostic qualitatif	90
4.3.1	Détermination de fautes candidates à partir du BGS	92
4.3.2	Exemple d'illustration	95
4.4	Mise en oeuvre de l'approche proposée	98
4.4.1	Conception du module de diagnostic hors ligne	98
4.4.2	Exploitation en ligne	98
4.5	Conclusion	100
5	Applications	103
5.1	Introduction	104
5.2	Description de la pile à combustible	104
5.3	Principe de fonctionnement	105
5.4	Enjeux du diagnostic de la pile à combustible	106
5.5	Bond graph à mots de la pile à combustible	108
5.6	Modèle Bond Graph de la PàC	109
5.7	BGS pour le diagnostic qualitatif de la PàC	115
5.8	Conclusion	118
5.9	Introduction	119
5.10	Description du RobuTainer	121
5.11	Modélisation du RobuTainer	123
5.12	Diagnostic de défauts simples et multiples	125
5.12.1	Raisonnement quantitatif basé sur les BG	125
5.12.2	Diagnostic qualitatif à base de BGS	128
5.13	Implémentation des algorithmes de diagnostic	129

5.13.1 Outils utilisés	129
5.13.2 Scénario de défauts	132
5.14 Modélisation fonctionnelle hors-ligne du RobuTainer	133
5.14.1 Objectifs du RobuTainer et leurs organisations	134
5.14.2 Décomposition matérielle du RobuTainer	135
5.15 Supervision en ligne du RobuTainer	136
5.15.1 Scénario de défauts	139
5.16 Conclusion	141
6 Conclusion et perspectives	143
6.1 Conclusion	143
6.2 Perspectives	145
A Simulation 3D - temps réel via ScanerStudio	149
A.1 Qu'est ce que ScanerStudio ?	149
A.2 Différents modes d'utilisation de ScanerStudio pour la simulation temps réel	151
A.2.1 Mode terrain	151
A.2.2 Mode véhicule (Vehicle Mode)	151
A.2.3 Mode Scenario (Mode scénario)	153
A.2.4 Mode simulation	153
A.2.5 Mode analysis (Mode d'analyse de données)	154
B Algorithme de génération du BGS à partir du BG	157
B.1 Algorithme de génération du BGS à partir du BG	157



TABLE DES FIGURES

1.1	Décomposition du projet InTraDE	21
1.2	Diagnostic à base de modèles	24
2.1	Différentes étapes du diagnostic	31
2.2	Classification des méthodes de diagnostic pour les systèmes continus	32
2.3	Approche Bond Graph	34
2.4	(a) Graphe biparti. (b) Graphe orienté correspondant	37
2.5	Schéma d'un observateur linéaire pour la génération de résidus	40
2.6	Exemple d'un réseau bayésien	43
2.7	les principales étapes de la méthode AMDEC	47
2.8	Principe d'une analyse HAZOP	49
2.9	Principe de construction d'un arbre de défaillance	52
2.10	Exemple d'un graphe orienté signé	54
2.11	(a) Système électrique, (b) Modèle Bond Graph associé et (c) Modèle TCG correspondant	56
2.12	Positionnement par rapport aux approches existantes	57
3.1	Modélisation par BGS :(a) éléments d'observation (détecteurs) (b) éléments sources (c) éléments de transformation d'énergie (d) éléments passifs	65
3.2	Modélisation par BGS :(a) élément central de type $x_{Ce} \in J_0$ (b) élément central de type $x_{Ce} \in J_1$	66
3.3	Propagation de la faute à partir de l'observation	69
3.4	Système électrique (a) le modèle bond graph correspondant en causalité intégrale(b)	70
3.5	Etapes de construction du BGS	72

3.6	Parcours d'atteignabilité des éléments dynamiques à partir des détecteurs	72
3.7	Système hydraulique	73
3.8	(a) Bond Graph du système hydraulique, (b) BGS correspondant.	74
3.9	Elimination de la variable inconnue f_3 en parcourant le BGS .	75
3.10	Gestion des modes de fonctionnement du système hydraulique	78
3.11	Décomposition pyramidale d'un système.	79
3.12	Arbre ET/OU.	80
4.1	Bond Graph en causalité dérivée de l'exemple électrique	89
4.2	(a) Elimination des variables inconnues de la <i>jonction</i> – 1 à partir du BGS(b) Elimination des variables inconnues de la <i>jonction</i> – 0 à partir du BGS.	91
4.3	Conflits possibles basés sur la consistance et générés à partir du modèle BGS du système électrique	93
4.4	Propagation de fautes à partir du BGS	97
4.5	Etape de conception hors ligne	99
4.6	Exploitation en-ligne	101
5.1	Description de la PàC	105
5.2	Bond Graph à mots de la pile à combustible	108
5.3	Performances de la PàC PEM étudiée (6Kw, 45 Volts)	110
5.4	Modèle Bond Graph de la pile à combustible	111
5.5	Courbe de polarisation de la PàC (6 Kw, 45 Volts)	112
5.6	Bond Graph Signé de la PàC PEM	116
5.7	Résultats de simulation suite à l'introduction d'un défaut sur la PàC	116
5.8	Résultats de l'évaluation des résidus suite à l'introduction d'un défaut	117
5.9	Image réelle du premier prototype RobuTainer	120
5.10	Image réelle du transport d'un conteneur par le RobuTainer .	122
5.11	Modèle BG de la moitié du véhicule	124
5.12	Modèle BG en causalité dérivée	126
5.13	BGS du RobuTainer déduit à partir du BG correspondant . . .	130
5.14	Propagation de défauts sur le BGS et conflits possibles déduits	131
5.15	Mesures obtenues suite à l'introduction de défauts	133
5.16	(a) Automate décrivant le passage d'un MdF à un autre (b) décomposition matérielle du RobuTainer	135
5.17	Aperçu de la décomposition du RobuTainer moyennant le logiciel VUE	137

5.18	Arbre ET/OU associé à l'objectif O2	138
5.19	Interface graphique développée pour la simulation de défauts moyennant des données réelles	139
5.20	Supervision moyennant le démonstrateur ScannerStudio	140
5.21	Cockpit connecté à ScannerStudio	140
A.1	Mode terrain : création de l'environnement virtuel du port d'Oostend	152
A.2	Mode véhicule : spécifications du RobuTainer	152
A.3	Mode scénario : création d'un scénario de test	153
A.4	Mode simulation : simulation du scénario créé	154
A.5	Mode d'analyse de données	155
A.6	Modules externes connectés à ScannerStudio	155

CHAPITRE 1

Introduction

Sommaire

1.1	Contexte général	17
1.2	Problématique et positionnement scientifique . .	19
1.2.1	Objectif de la thèse	19
1.2.2	Contexte du projet européen InTraDE	19
1.2.3	Problématique	22
1.3	Contributions	24
1.4	Valorisation du travail de recherche	25
1.5	Organisation de la thèse	27

1.1 Contexte général

Le travail de thèse a été effectué au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS - UMR CNRS 8219). Il est réalisé dans le cadre d'une collaboration entre les deux équipes *MOCIS* (Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée des Systèmes) et *STF* (Systèmes Tolérants aux Fautes).

Cette collaboration vise à faire émerger des dynamiques et de nouveaux projets de recherche innovants entre les deux équipes sur certains axes de recherche traitant de problématiques communes (le diagnostic et la supervision de systèmes multi physiques) mais utilisant des outils différents. En effet, la thématique principale de l'équipe *MOCIS* s'articule autour de la conception intégrée de modules de commande et de supervision pour les systèmes

énergétiques. Pour y parvenir, l'équipe a opté depuis sa création pour l'outil Bond Graph (BG) [PAYNTER, 1961] dans le but de faire de la modélisation multiphysique (électrique, mécanique, thermodynamique...) de systèmes dynamiques et les résultats se sont étendus par la suite pour inclure l'analyse structurelle, l'observabilité, la commandabilité et la conception de systèmes de diagnostic et de surveillance [MERZOUKI, 2013] ainsi que l'informatisation des algorithmes développés sur des logiciels dédiés [OULD-BOUAMAMA, 2006]. Ces algorithmes se basent principalement sur :

- l'analyse des propriétés et des conditions de surveillabilité directement sur le BG afin de déterminer l'aptitude du système à détecter et à isoler les défauts pouvant survenir [SUEUR, 2012] [MEDJAHER, 2006].
- La détermination de stratégies de placement de capteurs et d'actionneurs en fonction de cette analyse [KHEMLICHE, 2006] [DJEZIRI, 2009].
- La génération de Relations de Redondances Analytiques (RRA) robustes à base de BG-LFT (Linear Fractional Transformation) [DJEZIRI, 2007].
- La génération de (RRAs) déduites directement du BG [MEDJAHER, 2005].

Les thématiques de recherche de l'équipe sont centrées autour de la méthodologie BG. Le choix de cette méthodologie s'explique par ses capacités à modéliser avec une approche unifiée et énergétique les systèmes mettant en oeuvre plusieurs domaines de la physique, par ses aspects graphiques, et par ses propriétés causales et structurelles pour l'analyse et le pilotage dynamique de systèmes complexes.

Concernant l'équipe *STF*, sa thématique principale consiste à développer des outils et méthodes permettant de rendre des systèmes tolérants aux fautes [SHEN, 2013] [KAMAL12, 2012], afin de garantir une disponibilité, une qualité de service et une sécurité optimale. Cette thématique s'articule autour de trois axes fondamentaux : la conception de systèmes sûrs de fonctionnement, la reconfiguration en présence de défauts et la surveillance et diagnostic (cadre de notre travail).

La tolérance aux fautes et plus précisément l'analyse de la reconfigurabilité ne peuvent pas être considérées comme des tâches isolées. Elles dépendent du diagnostic, étape cruciale et indispensable permettant de détecter, d'isoler et parfois d'identifier les défauts. De plus, pour qu'un système puisse être reconfiguré, il est nécessaire que le diagnostic permette d'évaluer la disponibilité des fonctions que le système doit réaliser par des indicateurs de fautes adéquats.

Ceci représente la pierre angulaire de cette thèse et nous amène à aborder deux types d'approches de diagnostic à savoir les approches qualitatives qui

s'appuient sur des expertises, sur des données historiques ou sur le raisonnement d'inférences et les approches quantitatives qui permettent d'analyser le comportement d'un système dynamique sur la base d'un raisonnement analytique mais qui ne sont pas très adaptées à la supervision par un opérateur humain. Venkatasubramanian et al. [VENKATASUBRAMANIAN, 2003] [VENKATASUBRAMANIAN, 2003] ont passé en revue les différentes approches de diagnostic en établissant une étude comparative de quelques unes d'entre elles.

1.2 Problématique et positionnement scientifique

1.2.1 Objectif de la thèse

Le présent travail a pour objectif principal de proposer un nouveau formalisme générique (nommé Bond Graphs Signés (BGS)) permettant de pallier les problématiques liées à la représentation du comportement et du fonctionnement d'un système dynamique par l'intégration (et non la juxtaposition) des approches qualitatives et quantitatives afin d'améliorer les performances de détectabilité et d'isolabilité des défauts simples et multiples. Ce dernier doit être centré autour d'un modèle fonctionnel hiérarchique. Le modèle proposé ainsi que les algorithmes développés reposent principalement sur la méthodologie BG pour la génération d'indicateurs de fautes et sur un raisonnement qualitatif basé sur la propagation des défauts moyennant une approche graphique. Cette approche a pour but de définir le ou les éléments pouvant être à l'origine d'un fonctionnement anormal puis d'évaluer la disponibilité de chaque fonction à réaliser par le système. L'approche développée dans cette thèse a été validée et testée sur différents systèmes physiques notamment une pile à combustible à membrane d'échange de protons et un véhicule électrique autonome conçu et réalisé dans le cadre du projet européen InTraDE [InTraDE].

1.2.2 Contexte du projet européen InTraDE

Le transport maritime par conteneurs est le mode de transport le plus utilisé pour le commerce international et il ne cesse de s'accroître. Ceci est dû à la mondialisation et au développement des pays émergents qui s'appuient sur ce mode de transport peu onéreux pour asseoir leur développement et être en mesure d'importer et d'exporter n'importe où dans le monde. Néanmoins, le transport par conteneurs engendre des problèmes de congestion portuaire dus

principalement à l'organisation des mouvements de camions vers les conteneurs dont ils doivent prendre livraison ou vers les parcs où ils doivent les décharger sans oublier les problèmes de pollution.

C'est dans ce cadre là que s'inscrit le projet européen InTraDE. Il s'agit d'un projet transnational et innovant qui consiste à concevoir et développer un système de transport intelligent basé sur un prototype de véhicule électrique, intelligent et autonome. Ce projet vise, avec ce genre de véhicule, à accroître l'efficacité du système de transport dans les zones portuaires et confinées en relevant les futurs enjeux en matière de transport de conteneurs à savoir la réduction de la congestion (due au trafic routier des poids lourds) qui accapare du temps et de l'argent, diminue la productivité et la compétitivité, sans oublier les retombées négatives pour la qualité de l'air et de la vie. En outre, le projet vise à accroître l'efficacité du système de transport existant en l'élargissant à l'utilisation du nouveau prototype de véhicule électrique Robutainer (qui respecte donc les enjeux environnementaux) et en se basant sur le maintien des acquis en terme d'infrastructure car c'est le véhicule qui va s'adapter à celle-ci et non l'inverse. L'objectif principal du projet InTraDE est donc de créer un réseau de transport intégré dans les zones portuaires et confinées qui facilite l'accès et favorise ainsi l'activité économique tout en respectant l'environnement.

Ce projet s'articule ainsi autour de plusieurs axes fédérateurs en fonction des objectifs définis dans le paragraphe précédent. Le premier axe concerne la conception du véhicule autonome. Il regroupe la définition de l'architecture fonctionnelle assurant la fiabilité, la sûreté de fonctionnement, le diagnostic et la maintenabilité du système jusqu'au choix des composants les plus adaptés. Le deuxième axe concerne la réalisation, les tests de validation et le codage. Ce dernier comprend le développement et l'implémentation des algorithmes développés moyennant un simulateur temps réel qui représente le système de supervision.

A l'issue du projet, deux livrables doivent être fournis :

- Un prototype de véhicule électrique autonome multi-actionné, porte conteneurs, pouvant être commandé manuellement ou automatiquement et étant capable de se déplacer dans toutes les directions grâce à une décentralisation de la traction et de la direction.
- Un simulateur 3D opérant en temps réel, représentant la dynamique du véhicule et pouvant interagir avec ce dernier. Ce simulateur permet une reconstruction fidèle du terrain et de l'environnement ainsi que la supervision du véhicule en temps réel.

Le projet InTraDE est subdivisé en différents workpackages et chaque workpackage est décomposé à son tour en actions. Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du workpackage WP3 "supervision de systèmes de transport intelligent" et plus particulièrement sous les actions "Modélisation et Identification" (WP3A5), et "Diagnostic et surveillance" (WP3A6) comme le montre la figure 1.1.

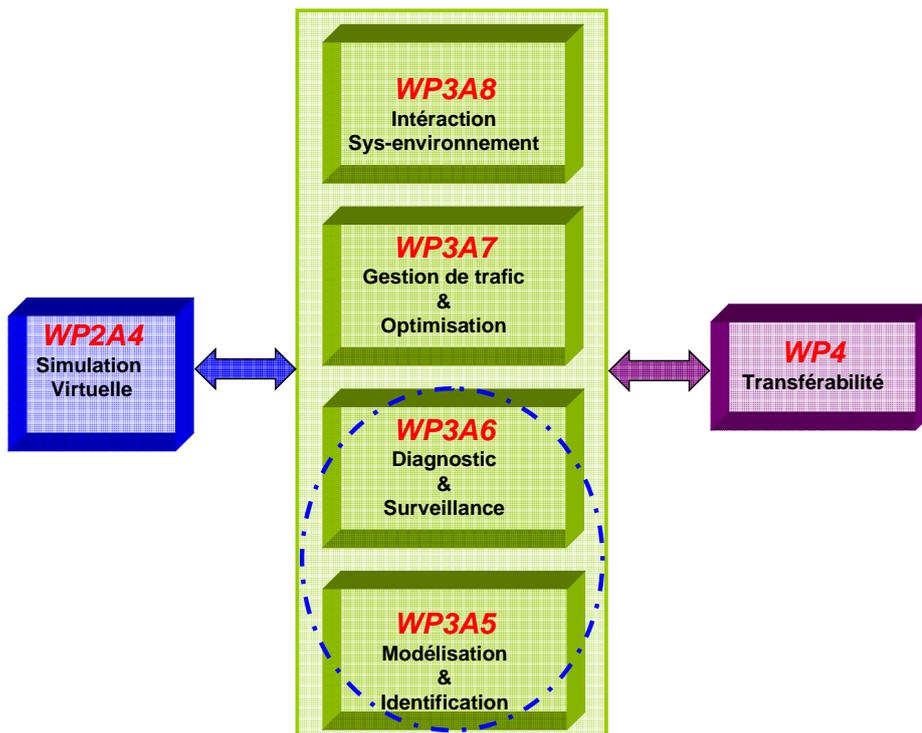


FIGURE 1.1 – Décomposition du projet InTraDE

Le projet InTraDE présente ainsi un cadre applicatif pour la méthodologie proposée dans ce travail de thèse et permettra de valider les algorithmes développés. En effet, l'objectif général de nos recherches est de développer et de concevoir des algorithmes de diagnostic et de supervision qui permettent à chaque instant d'évaluer la disponibilité des fonctions qu'un système doit rendre. Ceci passe par l'intégration d'approches fonctionnelles et comportementales. Nous avons développé, pour y parvenir, le Bond Graph Signé (BGS) pour le diagnostic de défauts simples et multiples. Ce dernier associe judicieusement les atouts (les points forts) des approches qualitatives et quantitatives.

1.2.3 Problématique

De nos jours, les systèmes technologiques (automobile, avion, robot, etc.) sont de plus en plus complexes de part leur nature multiphysique et leur environnement d'opérabilité variable. En outre, ils doivent répondre à des exigences de sûreté de fonctionnement et de sécurité croissantes. Ainsi, l'élaboration de techniques de diagnostic et de surveillance efficaces devient primordiale dès la phase de conception du système afin de connaître à chaque instant et le plus finement possible son état de fonctionnement et sa disponibilité opérationnelle.

Ces dernières années, les travaux de recherche sur le diagnostic ont mobilisé un grand nombre de chercheurs émanant de communautés scientifiques différentes mais aussi des industriels. Il faut dire que le diagnostic était peu répandu il y a une quinzaine d'années mais qu'aujourd'hui il a totalement conquis sa place. Traditionnellement, on distingue deux communautés dans le monde de la recherche sur le diagnostic : (1) la communauté de l'Automatique, connue sous le nom de la communauté FDI (Fault Detection and Isolation) qui se base sur des modèles mathématiques [PATTON, 2000] [BLANKE, 2006] et (2) la communauté de l'intelligence artificielle connue sous le nom de communauté DX qui propose des approches qualitatives [REITER, 1987] [HAMSCHEER, 1992].

Les méthodes et les solutions proposées par ces deux communautés sont différentes mais complémentaires. Durant la dernière décennie, différents chercheurs se sont mobilisés pour mettre en place des groupes de travail permettant de comparer et de partager d'une façon accessible et intuitive les techniques des deux communautés DX et FDI qui se basent respectivement sur les approches qualitatives et quantitatives [CORDIER, 2004] [BREGON, 2010] [BISWAS, 2004] [PUIG, 2005]. Cet effort a abouti à la création d'une nouvelle communauté appelée BRIDGE visant à intégrer les différentes approches (FDI et DX) et c'est dans ce cadre là que s'inscrivent nos travaux de thèse.

Une classification non exhaustive des approches de diagnostic des systèmes continus peut être faite selon deux axes et en l'occurrence les approches qualitatives (tel est le cas des approches émanant de la communauté DX, de certaines approches graphiques [SIMON, 2013] et des approches relationnelles) et les approches quantitatives (tel est le cas des approches émanant de la communauté FDI [MOUSSA-ALI, 2011] [DING, 2008]).

Les méthodes qualitatives sont très répandues dans l'industrie car elles reposent à la fois sur des données historiques et sur le savoir faire de l'expert

ayant une très bonne connaissance du système à surveiller. Les approches qualitatives sont généralement inductives (bien qu'elles ne le soient pas exclusivement comme on le verra dans le deuxième chapitre) et rapprochent le raisonnement de l'opérateur humain.

D'une part, les méthodes qualitatives semblent s'avérer plus appropriées aux attentes de l'industrie de part leur facilité d'implémentation d'autant plus qu'elles ne nécessitent pas un modèle analytique précis. En effet, ces méthodes conduisent généralement à un modèle fonctionnel car tout processus physique, quelque soit sa nature, est un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de façon à former une entité unique accomplissant une mission bien définie. Néanmoins, l'adéquation du modèle avec la réalité n'est pas toujours vérifiée et les phénomènes physiques régis par des équations mathématiques ne sont pas pris en considération. En effet, un diagnostic à base de modèles qualitatifs consiste (1) soit à expliquer les incohérences entre le modèle qualitatif du système en fonctionnement normal et son comportement réellement observé et là on parle d'approches basées sur la consistance [PULIDO, 2004], (2) soit à expliquer les observations en faisant abstraction des incohérences et là on parle d'approches par abduction [LOBO, 1997] [POOL, 1990], (3) soit à associer des causes à des symptômes et là on parle d'approches relationnelles [ATAMER, 2004] [BIAN, 2011]. Malgré l'intérêt que suscite ces approches, elles souffrent d'un manque de robustesse et de généralité et nécessitent une connaissance a priori des défauts et de leurs effets, ce qui devient très contraignant dans le cas des procédés complexes.

D'autre part, les limites des approches qualitatives ont induit un intérêt accru pour les approches quantitatives aussi bien de la communauté scientifique que des industriels. Les approches quantitatives de diagnostic sont des approches qui font généralement appel à des algorithmes de génération d'indicateurs de fautes [PALMA02, 2002]. En effet, ces approches se basent sur la modélisation du système en utilisant des équations différentielles décrivant son comportement en fonctionnement normal ou en partant d'une modélisation graphique prenant en considération les échanges énergétiques entre les éléments constituant un système (tel est le cas de l'approche BG) [OULD-BOUAMAMA, 2012] [MEDJAHAR, 2006] [MERZOUKI, 2013] [BROENINK, 1997] [SAMANTARAY, 2006]. Ensuite les étapes de diagnostic se déroulent comme suit :

- Génération des RRAs qui sont des équations dans lesquelles toutes les variables sont connues. Ces RRAs sont générées en utilisant la théorie de l'élimination des variables inconnues. L'exploitation de ces relations fournit un ensemble d'indicateurs appelés communément résidus. Dif-

férentes approches de génération de RRAs existent, parmi lesquelles on peut citer l'espace de parité, les graphes bipartis et les BG. Ces derniers possèdent des propriétés comportementales, graphiques et causales permettant de générer automatiquement les RRAs.

- Evaluation numérique des résidus. Ceux-ci sont nuls en fonctionnement normal et différents de zéro en cas de défauts. Cette phase est suivie d'une étape de prise de décision pour la détection et éventuellement l'isolation de défauts. La méthodologie peut être représentée par la figure 1.2 (On note l'analogie avec les méthodes qualitatives basées sur la consistance).

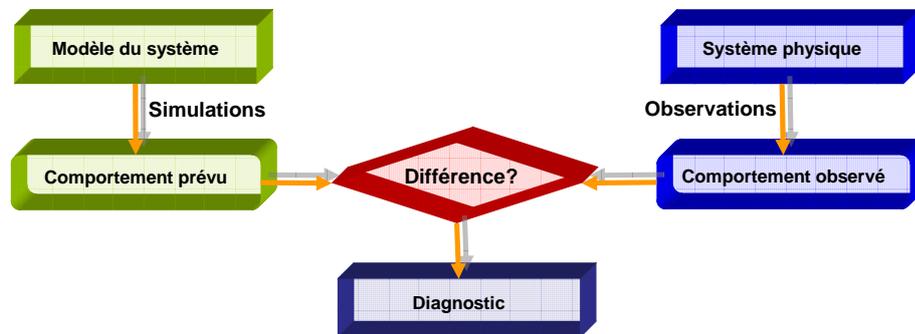


FIGURE 1.2 – Diagnostic à base de modèles

Malgré leurs avantages et notamment la prise en compte du modèle dynamique comportemental des systèmes à surveiller, la robustesse vis-à-vis des incertitudes paramétriques et de mesures, etc., les méthodes quantitatives présentent également des limites car elles sont difficilement implémentables et dépendent principalement de la précision du modèle.

La solution se trouve donc probablement à mi-chemin, dans l'union des approches qualitatives et quantitatives. A ce propos, de nombreux travaux ont été menés pour remédier aux limites des deux approches en utilisant leurs avantages respectifs. Néanmoins, il s'agissait souvent d'une juxtaposition de deux méthodes appartenant respectivement aux approches quantitatives et qualitatives [BISWAS, 2009] [CORDIER, 2004]. Nous proposons quand à nous, une méthode unifiée émanant de la méthodologie BG et exploitant à la fois ses aspects quantitatifs, qualitatifs et fonctionnels.

1.3 Contributions

Les contributions principales peuvent être résumées comme suit :

- Développement d'un nouveau formalisme graphique de modélisation des systèmes dynamiques basé sur la théorie BG. Ce formalisme, que nous avons appelé le BGS, est très aisément interprétable grâce à un certain nombre de propriétés et de définitions que nous avons établies. L'élaboration d'un tel formalisme permet de faire appel aux propriétés structurelles et causales du BG et d'élargir leur champ d'étude pour inclure le raisonnement qualitatif.
- Intégration de Modèles Génériques de Composants (MGC) fonctionnels et de modèles BGS pour la gestion, par un automate fini, des modes de fonctionnement et des conditions de reconfiguration d'un système autonome. Chaque mode de fonctionnement (état de l'automate) correspondant à un ensemble de services est défini par un BGS. La disponibilité des services (associés aux éléments du BGS) et les conditions de passage d'un mode à un autre sont complètement définies par une seule représentation et sont évaluées par les algorithmes de détection et d'isolation de défauts basés aussi bien sur le raisonnement qualitatif que quantitatif.
- Diagnostic des défauts simples et multiples en utilisant une approche par abduction basée sur l'étude de la propagation de défauts sur le BGS à partir des observations. Les résultats obtenus à partir de ce raisonnement qualitatif sont comparés à ceux obtenus par l'évaluation des RRAs déduites des propriétés causales et structurelles du BG. Cette comparaison est basée sur un algorithme que nous avons développé et permet d'obtenir des résultats cohérents car le modèle BGS est généré à partir du BG.

1.4 Valorisation du travail de recherche

Les résultats obtenus ont fait l'objet des publications suivantes :

Revue de rang A

- N. Chatti, A.-L. Gehin, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki. Functional and behavioural models for the supervision of an intelligent and autonomous system. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pages 431-445, issue2, vol.10, 2012.
- N. Chatti, B. Ould-Bouamama, A.-L. Gehin, R. Merzouki. Signed Bond Graph for multiple faults diagnosis. *IFAC Engineer Applications of Artificial Intelligence*. (Acceptée le 14/11/2013).

Chapitre d'ouvrage

- N. Chatti, A.-L. Gehin and B. Ould-Bouamama. Chapter 8 : Robust fault decision : Contribution to Omni directional Mobile Robot. *Mechatronic and Innovative Applications*, pages 147-167 (21), DOI : 978-1-60805-441-1 eISBN : 978-1-60805-441-1 ISBN :978-1-60805-440-4.

Conférences nationales/internationales avec actes et comités de lecture

- N. Chatti, A.-L. Gehin, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki and Y. Touati. Bond Graph Model Based and Fuzzy Logic For Robust FDI of Mechatronic Systems. *International Conference Safe Process IFAC*, pages 126-131 August 29-31, 2012, Mexico City, Mexico.
- N. Chatti, A.-L. Gehin, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki. Online Supervision of Intelligent Vehicle using functional and behavioural models. *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pages 827-832, June 5-9, 2011, Baden-Baden, Germany.
- N. Chatti, B. Ould-Bouamama, A.-L. Gehin and R. Merzouki. Merging Bond Graph and Signed Directed Graph to improve FDI procedure. *The 12th biannual European Control Conference ECC 2013*, July 17-19, 2013, Zurich, Switzerland.
- N. Chatti, B. Ould-Bouamama, A.-L. Gehin and R. Merzouki. Signed Bond Graph for health monitoring of PEM fuel cell. *The 5th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells*, April 14-18, 2013, Karlsruhe, Germany.
- N. Chatti, W. Khalil, A.-L. Gehin, B. Ould-Bouamama and R. Merzouki. Intelligent Supervision Of Autonomous Heavy Vehicles : Application To Maritime Area. *The 13th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation*, pages 33-37, September 12-15, 2011, Rome, Italy.
- N. Chatti, A.-L. Gehin, B. Ould-Bouamama and R. Merzouki. Contribution à la prise de décision robuste pour la détection de défauts : Application à un robot omnidirectionnel. *13ème Colloque AIP PRIMECA*. 27-30 Mars, 2012, Mont-Dore, France. [Conférence Nationale]
- N. Chatti, A.-L. Gehin, B. Ould-Bouamama and R. Merzouki. Modèles de comportement et fonctionnel pour la supervision d'un système autonome. *4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS*. Juin 9-10, 2011. Marseille, France. [Conférence Nationale]

1.5 Organisation de la thèse

Après ce chapitre introductif, quatre autres chapitres constituent ce manuscrit de la façon suivante :

Dans **le deuxième chapitre**, nous présentons un état de l'art sur le diagnostic des systèmes continus en nous concentrant principalement sur les méthodes qualitatives et quantitatives les plus utilisées dans la littérature afin de nous situer par rapport aux approches existantes et de cerner par la suite l'apport de la méthodologie développée dans ce travail de recherche.

Le troisième chapitre, concerne la modélisation des systèmes dynamiques basée sur un nouveau formalisme, le BGS. Nous présentons un certain nombre de propriétés et définitions permettant de comprendre ce formalisme et de construire un BGS à partir du modèle BG d'un système multiphysique. La méthodologie et l'algorithme (illustrés par des exemples) de construction d'un BGS sont développés. Ce chapitre traitera aussi de l'intégration de Modèles Génériques de Composants (MGC) fonctionnels (qui ont pour objectif de décrire et de structurer les fonctions d'un système) et de modèles BGS pour la gestion des modes de fonctionnement et des conditions de reconfiguration d'un système autonome par un automate fini.

Le quatrième chapitre concerne la méthodologie de diagnostic développée à base du BGS. Dans cette partie est exposé l'algorithme de génération de RRAs à partir du BGS ainsi que le raisonnement par abduction basée sur l'étude de la propagation de défauts sur le BGS à partir des observations. Les résultats obtenus à partir de ce raisonnement qualitatif sont comparés avec ceux obtenus par l'évaluation des RRAs déduites des propriétés causales et structurelles du BG.

Le cinquième chapitre, présente deux applications différentes, la première est une Pile à Combustible (PàC) à membrane d'échange de protons. Le but de cette application est de détecter et d'isoler les défauts liés à la gestion de l'eau dans la pile et en l'occurrence les défauts d'engorgement de la cathode et d'assèchement de la membrane. La deuxième application est un véhicule électrique autonome qui a été conçu et développé dans le cadre du

projet InTraDE et qui se base sur une architecture de redondances au niveau des actionneurs et des capteurs. Nous traiterons le cas de défauts simples et multiples.

CHAPITRE 2

Approches qualitatives et quantitatives pour le diagnostic des Σ continus

Sommaire

2.1	Introduction	29
2.2	Approches quantitatives	33
2.2.1	Approches basées sur la génération des résidus	33
2.2.2	Observateurs	39
2.2.3	Méthodes d'analyse de données	41
2.3	Approches qualitatives	43
2.3.1	Approches DX	43
2.3.2	Approches relationnelles	45
2.3.3	Approches graphiques	53
2.4	Synthèse	56
2.5	Conclusion	58

2.1 Introduction

Les systèmes technologiques sont de plus en plus complexes à cause de la demande accrue en termes de fiabilité, de disponibilité et d'autonomie. Cette complexité répond à des enjeux majeurs de sécurité et de sûreté de fonctionnement afin de garantir le bon fonctionnement de ces systèmes. Néanmoins,

la réalisation de tels objectifs nécessite le développement de méthodes et d'outils pour le diagnostic, la surveillance et la prise de décisions. Ces méthodes visent à fournir une représentation qui soit la plus fidèle possible au comportement du système dans le but de définir à chaque instant et le plus finement possible son état de fonctionnement. En effet, cette représentation doit être à même de déterminer aussi bien le mode de fonctionnement normal du système que le mode de fonctionnement dégradé ou défaillant.

Le mode de fonctionnement normal peut être défini comme étant le mode dans lequel les performances du système correspondent à celles définies par le cahier des charges. Quant au mode de fonctionnement dégradé, il correspond à un mode dans lequel un ou plusieurs défauts sont présents avec pour conséquence une diminution de la qualité de service sans pour autant engendrer l'arrêt du système. Finalement, le mode de fonctionnement défaillant correspond à l'occurrence d'une défaillance provoquant l'arrêt du système et l'impossibilité de réaliser la ou les missions pour lesquelles il a été conçu. Ainsi, la détermination du mode de fonctionnement réel, à partir des défauts constatés est d'une importance capitale pour que l'utilisateur sache à chaque instant, ce qu'il peut attendre du système, en termes de services rendus.

La recherche et l'identification de défauts nous mène à aborder le domaine du diagnostic. Ce dernier s'intègre dans le cadre général de la surveillance et de la supervision. Il englobe les différentes étapes de détection, d'isolation (ou localisation), d'identification et d'explication du défaut comme le montre la figure 2.1. Les deux premières phases se font généralement en-ligne et se caractérisent par (1) la constatation d'un comportement anormal du système par rapport à son comportement attendu (normal) et par (2) la détermination du composant (des composants) ou du sous-système fonctionnel pouvant être à l'origine du défaut. En ce qui concerne les deux dernières phases du diagnostic, elles se font généralement hors-ligne et consistent (3) à déterminer les causes qui ont engendrées le défaut constaté et (4) la justification des conclusions du diagnostic. Généralement, on restreint la définition du diagnostic à ses deux premières étapes mais dans l'étude que nous avons menée, nous nous sommes intéressés également aux approches pouvant être employées pour traiter les deux dernières étapes et en l'occurrence l'identification et l'explication.

Comme nous l'avons expliqué dans le précédent chapitre, lorsqu'on parle de méthodes de diagnostic, on distingue les approches qualitatives des ap-

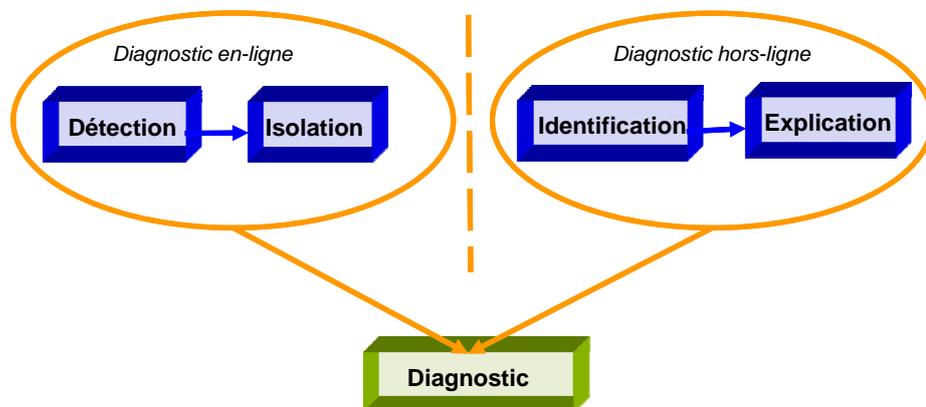


FIGURE 2.1 – Différentes étapes du diagnostic

proches quantitatives comme le montre la figure 2.2. Parmi les approches quantitatives intégrées les plus étudiées on trouve l'approche par Analyse en Composantes Principales (ACP) et l'approche par réseaux bayésiens qui sont basées sur l'analyse de données dans le but d'en extraire des connaissances utiles au diagnostic et à la prise de décision [LIN, 2010]. On trouve également les approches basées sur la génération des RRAs en utilisant notamment le principe de la causalité pour l'élimination des variables inconnues. Parmi ces approches, on peut citer les Bond Graphs, les graphes bipartis et l'espace de parité (basé sur un modèle analytique contrairement aux deux premières approches qui sont basées sur un modèle graphique). On trouve également des approches basées sur l'observateur et qui permettent d'estimer les variables d'état d'un système et de générer des résidus permettant de caractériser un certain nombre de défauts pouvant surgir.

D'autres approches qualitatives émanent de la communauté DX et reposent sur un modèle qualitatif du fonctionnement normal du système c'est-à-dire en absence de défauts ou sur une connaissance approfondie du système à étudier. On distingue alors entre (1) des approches relationnelles qui permettent d'associer des causes à des symptômes, (2) des approches appelées approches basées sur la consistance [ZHANG, 2011] [ZHAO, 2009] et qui visent à expliquer les incohérences (après les avoir détectées) entre le modèle qualitatif simulé du système et son comportement observé et (3) des approches basées sur l'abduction [VANDERHAEGEN, 2011] [SHANAHAN, 1989] où l'on cherche à expliquer les observations et non plus nécessairement les incohérences. Ces deux dernières approches se basent généralement sur la modé-

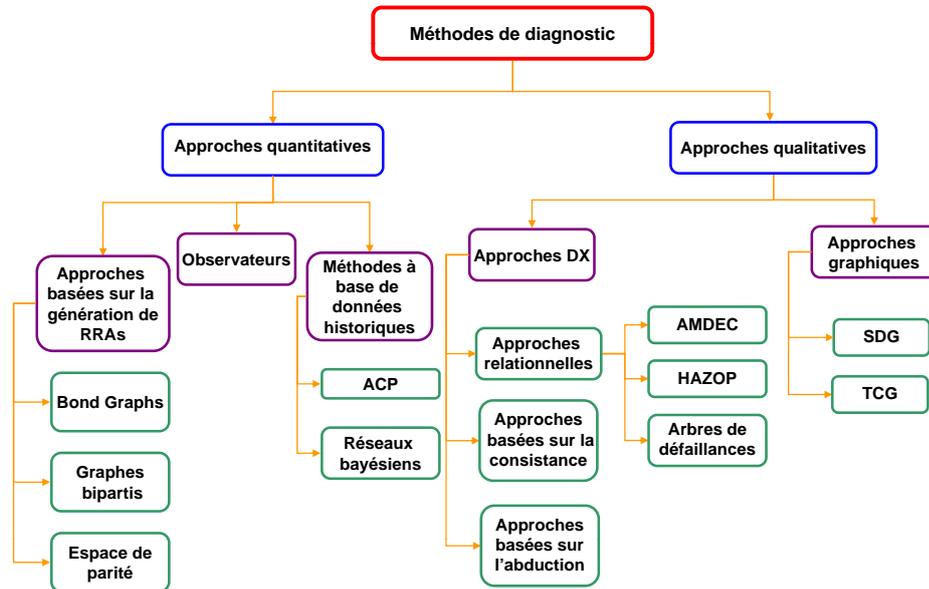


FIGURE 2.2 – Classification des méthodes de diagnostic pour les systèmes continus

lisation du comportement d'un système par un triplet $(SD, COMPS, OBS)$ où les trois ensembles SD , $COMPS$ et OBS représentent respectivement la description du système, l'ensemble fini des composants le constituant et l'ensemble des observations. Ces trois ensembles sont généralement formulés moyennant la logique des prédicats du premier ordre. On trouve également (3) les approches qualitatives basées sur l'analyse de données et ayant du succès dans les applications industrielles tel est le cas des approches relationnelles [SHAO, 2012] qui reposent principalement sur les outils de l'analyse de risques qu'il convient de gérer et de maîtriser afin d'assurer la fiabilité et la sûreté de fonctionnement de tout système dynamique en facilitant la prise de décisions. Ces approches permettent d'établir un lien de cause à effet entre un symptôme observé et la défaillance qui est survenue, ses causes et ses conséquences. Ainsi, ces approches relationnelles sont utilisées en vue de réaliser la troisième et quatrième étape du diagnostic tel qu'on l'a défini précédemment. Ils permettent également de définir les actions à entreprendre pour permettre au système d'atteindre ses objectifs et pour être à même d'élaborer le plan d'une maintenance préventive [TSAI, 2004].

On trouve également des approches qualitatives basées sur une représentation graphique visant à fournir des résultats de faible ordre de complexité

et très aisément interprétables. Parmi les approches graphiques les plus utilisées on trouve le graphe temporel causal [ABDELWAHED, 2005]. Cette approche a notamment été appliquée à la modélisation et au diagnostic des systèmes hybrides [DAIGLE, 2008] et peut être vue comme une extension des graphes orientés signés connus en anglais sous l’acronyme SDG (Signed directed Graph) [IRI, 1979].

Dans un premier temps, nous allons examiner et étudier les différentes approches quantitatives et qualitatives de façon synthétique dans le but de mettre en exergue leurs intérêts et leurs limites afin de mieux cerner la problématique et l’utilité du modèle et de la stratégie de diagnostic proposés. Les approches qualitatives et plus précisément les approches relationnelles sont très répandues dans l’industrie mais c’est par les approches quantitatives que nous allons démarrer ce chapitre.

2.2 Approches quantitatives

2.2.1 Approches basées sur la génération des résidus

Bond Graph

L’approche des BG a été introduite en 1961 par H. Paynter [PAYNTER, 1961] à partir d’une idée originale qui consistait à développer une représentation graphique générique se basant sur l’analogie entre variables de différents domaines physiques [OULD-BOUAMAMA, 2012] [OULD-BOUAMAMA, 2008]. L’échange de puissance entre deux éléments physiques est représenté par une demi-flèche appelée bond portant les variables de puissance et en l’occurrence l’effort et le flux dont le produit représente la puissance transportée par le bond comme le montre la figure 2.3 (a).

La modélisation par BG repose également sur la notion de causalité. Celle-ci permet de définir les relations de causes à effets entre les différents éléments échangeant de la puissance, de structurer les équations et de détecter d’éventuelles erreurs de modélisation. La causalité est représentée sur le bond graph par un trait causal placé perpendiculairement au bond. Ce trait causal est placé à côté (respectivement loin) de l’élément qui impose le flux (respectivement l’effort) comme illustré sur la figure 2.3 (b) et (c).

Ainsi, un BG peut être défini comme un graphe $G = (S, A)$ tel que : $S = \{s_i/s_i \in \{0, 1, TF, GY, S_e, S_f, MS_e, MS_f, R, I, C, D_e, D_f\}\}$ est l'ensemble des sommets du graphe et $A = A_S \cup A_D$ est l'ensemble des arcs (appelés aussi Bonds) tel que : $A_S \subseteq S \times N \times S = \{a_i/a_i = (\langle s_x, s_y \rangle, Num)\}$ tel que $s_x, s_y \in S$ et $(s_x \in \{0, 1, TF, GY\} \wedge s_y \in \{0, 1, TF, GY\} \wedge (s_x \neq s_y))$ et Num est un nombre entier positif arbitraire qui correspond au numéro attribué au Bond. $A_D \subseteq S \times N \times S = \{a_i/a_i = (\langle s_x, s_y \rangle, Num)\}$ tel que $s_x, s_y \in S$ et $(s_x \in \{0, 1, TF, GY\} \wedge s_y \notin \{0, 1, TF, GY\})$.

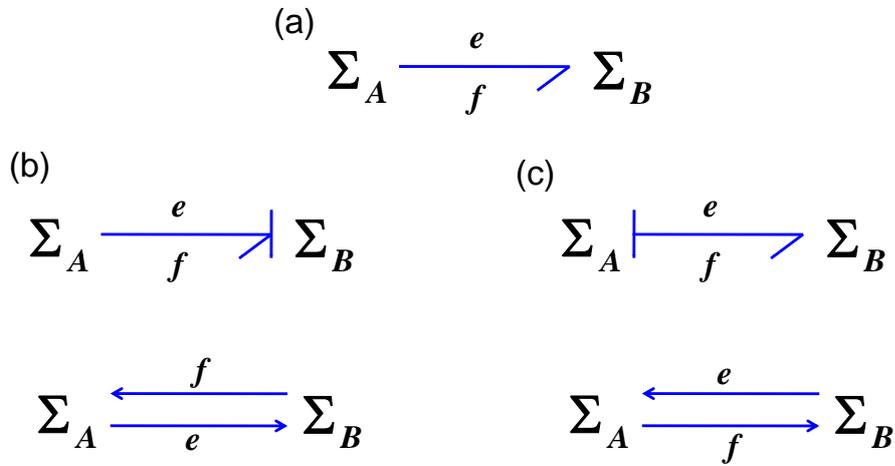


FIGURE 2.3 – Approche Bond Graph

Les relations de causes à effets sont décrites par des boucles et des chemins causaux, représentant les intra-échanges et les extra-échanges de puissances du système modélisé. Les règles de propagation de la causalité sont comme suit [BORUTZKY, 2006] :

- Affecter les causalités imposées par les éléments actifs (sources d'effort et de flux S_e et S_f) qui fournissent de la puissance.
- Mettre les éléments I et C en causalité intégrale. Ces éléments passifs transforment la puissance qui leur est fournie en énergie stockée. L'étape suivante peut amener des conflits de causalité qui peuvent être résolus en acceptant de changer une causalité intégrale en une causalité dérivée ou de reprendre la modélisation en ajoutant des éléments qui auraient été négligés.
- Propager les causalités aux jonctions $0, 1$, transformateurs TF et gyrateurs GY . Ces éléments décrivent le lien entre les différents éléments en définissant les relations de partage et de conservation d'efforts et de flux.

- Affecter les causalités (de façon indifférente) aux éléments R . Ces éléments passifs transforment la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée sous forme de chaleur.

L'approche BG a été initialement utilisée pour la modélisation à partir non pas des équations mathématiques mais directement de l'architecture et des phénomènes physiques intervenant sur le système physique à étudier. Par la suite, plusieurs travaux se sont intéressés à cette approche pour des fins de diagnostic et de supervision. Il a été établi que l'approche BG permet la génération de RRAs en parcourant les chemins causaux relatifs aux différentes jonctions formant le BG pour l'élimination des variables inconnues en les substituant par les variables connues qui correspondent aux sources et aux capteurs [OULD-BOUAMAMA, 2006].

Dans la représentation BG, une RRA a la forme suivante :

$$f(Se, Sf, MSe, MSf, \theta) = r \approx 0$$

où θ représente l'ensemble des paramètres du système et r est un résidu.

Graphes bipartis

Un graphe biparti est un graphe $G = (Co, Z, A)$ représentant le modèle structurel d'un système physique moyennant deux ensembles distincts de sommets : les contraintes (équations mathématiques) Co et les variables Z , et un ensemble d'arcs A reliant les contraintes et les variables. Un arc existe entre la contrainte $Co_i \in Co$ et le sommet $z_i \in Z$ si et seulement si la variable z_i apparaît dans la contrainte Co_i . L'ensemble des variables Z peut être décomposé en $Z = X \cup K$ où X représente l'ensemble des variables inconnues et K l'ensemble des variables connues (observées) [BLANKE, 2006] [COMMAULT, 2008].

Le graphe biparti (figure 2.4 (a)) repose sur la notion de couplage qui peut être définie comme étant l'ensemble des arcs qui n'ont aucun sommet en commun. Un couplage complet M entre les ensembles Co et X dans le graphe biparti $G = (Co \cup X, A')$, où A' est un sous ensemble de A , est un couplage où au moins l'un des deux ensembles Co ou X est saturé (tous ses éléments sont couplés). Ce couplage permet la déduction d'un graphe orienté

G' assurant la résolution du problème d'élimination des variables inconnues. En effet, un arc $a(i, j)$ est orienté de Co_i vers x_j si et seulement si $a(i, j) \in M$ et il est orienté de x_j vers Co_i si et seulement si $a(i, j) \notin M$ comme le montre la figure 2.4 (b).

Ainsi le graphe biparti peut être utilisé pour la génération de RRAs. Il a été établi qu'une RRA existe si et seulement si le nombre de contraintes $card(Co)$ est strictement supérieur au nombre de variables inconnues $card(X)$. Dans ce cas là, le système est dit sur-déterminé et les RRAs correspondent aux contraintes n'appartenant pas au couplage complet M c'est-à-dire les contraintes qui ne sont pas utilisées pour le calcul (élimination) des variables inconnues. Ces relations correspondent aux sommets puits (aucun arc ne sort de ces sommets) sur le graphe G' . Dans l'exemple de la figure 2.4 (b), la seule RRA est déterminée à partir de Co_5 .

Le graphe biparti permet donc d'étudier et de visualiser les relations entre deux ensembles distincts de sommets représentant respectivement les contraintes et les variables. De plus, il a été établi que l'approche Bond Graph permet aisément de construire le graphe biparti vu que l'ensemble des contraintes Co correspond aux relations de structure (dédites de jonctions), de comportement (dédites des éléments Bond Graph) et de mesures (issues des détecteurs), que l'ensemble des variables inconnues X correspond aux paires de variables de puissance (e, f) du BG et que l'ensemble des variables connues K correspond aux sources (effort et flux) et aux détecteurs [BLANKE, 2006].

Espace de parité

L'espace de parité est une technique de diagnostic à base de modèle analytique et qui est basée sur les outils de l'algèbre linéaire notamment les projections matricielles pour la génération de relations de redondances analytiques qu'on pourrait définir comme étant des équations dans lesquelles toutes les variables sont connues. La génération de telles relations permet d'engendrer des résidus [STAROSWIECKI, 1991][MOHAMED-BASRI, 2012]. Ainsi, l'espace de parité repose sur la vérification d'une relation statique ou dynamique qui relie les mesures sur une certaine fenêtre temporelle. Les relations de redondances analytiques sont donc obtenues en éliminant les variables d'état non observables du modèle sur l'espace de parité.

Dans le but de décrire la méthode de diagnostic à base d'espace de parité

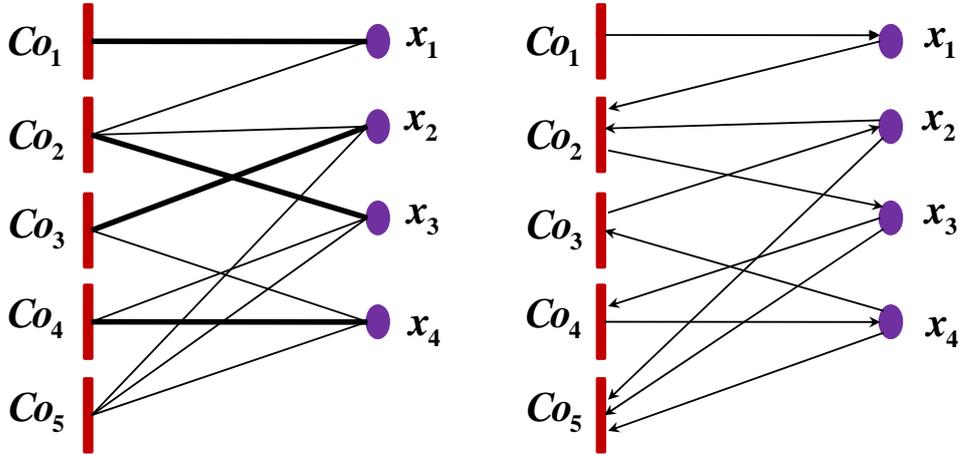


FIGURE 2.4 – (a) Graphe biparti. (b) Graphe orienté correspondant

statique, on prend l'exemple d'un système décrit par l'équation suivante où l'on a négligé le vecteur des bruits de mesures :

$$y(k) = Cx(k) + f(k) \quad (2.1)$$

avec $y(k)$ le vecteur de sortie du modèle, $x(k)$ l'état du système à l'instant k , $f(k)$ le vecteur qui désigne les défauts capteurs et C la matrice de sortie. On forme alors le résidu $r(k)$ (appelé aussi vecteur de parité) par combinaison linéaire des mesures de sorties :

$$r(k) = Wy(k) \quad (2.2)$$

La matrice de projection W est choisie de telle sorte que le résidu $r(k)$ soit nul en l'absence de défauts indépendamment de l'état $x(k)$ inconnu. Pour assurer cette indépendance, une condition nécessaire et suffisante sur la matrice W est requise. Cette condition est la suivante :

$$WC = 0 \quad (2.3)$$

En effet, en présence de défauts, le résidu $r(k)$ est non nul si W est de plein rang colonne. Il présente ainsi un indicateur de défauts qui traduit l'ensemble

des redondances qui lient les mesures $y(k)$. En outre, la matrice W se trouve à l'aide des conditions supplémentaires de Potter et Suman :

$$W^T W = I_p - C(C^T C)^{-1} C^T \quad (2.4)$$

$$W W^T = I_{p-m} \quad (2.5)$$

La matrice W est de dimension $(p - m) \times p$, $\text{rang}(C) = m$. Les vecteurs colonnes de la matrice W définissent une base orthogonale de l'espace appelée *espace de parité*.

En outre, des relations de redondances temporelles peuvent être obtenues en utilisant l'espace de parité dynamique moyennant les valeurs de mesures obtenues au cours du temps. Pour illustrer cette approche, on considère un système ayant la représentation temporelle discrète suivante :

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.6a)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (2.6b)$$

avec $u(k)$ le vecteur de commande, $x(k)$ le vecteur d'état du système à l'instant k , $y(k)$ le vecteur de sortie du modèle. Les matrices A , B , C et D sont des matrices à coefficients réels et ayant des dimensions appropriées. La représentation d'état précédente peut être réécrite comme suit si l'on considère un horizon d'observation de taille $(M + 1)$ à l'instant k :

$$Qx(k - M) = Y(k) - HU(k) \quad (2.7)$$

avec

$$Y(k) = \begin{pmatrix} y(k - M) \\ y(k - M + 1) \\ \vdots \\ y(k) \end{pmatrix}, U(k) = \begin{pmatrix} u(k - M) \\ u(k - M + 1) \\ \vdots \\ u(k) \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Les matrices H et Q sont définies comme suit :

$$H = \begin{pmatrix} D & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & 0 & \ddots & \vdots \\ CAB & CB & D & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{M-1}B & \cdots & CAB & CB & D \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^M \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Comme pour l'approche de l'espace de parité statique, le but est d'éliminer le vecteur des grandeurs inconnues et en l'occurrence $x(k-M)$. Pour y parvenir, on projette l'équation au moyen d'une matrice W et on obtient la relation d'ordre $M+1$ suivante :

$$W(Y(k) - HU(k)) = 0 \quad (2.10)$$

Dans la même logique de l'espace de parité statique, la matrice W doit satisfaire la condition suivante :

$$WQ = 0 \quad (2.11)$$

On obtient alors le résidu par le vecteur de parité suivant :

$$r(k-M) = W(Y(k) - HU(k)) \quad (2.12)$$

Une condition suffisante de l'existence du vecteur W est que Q ne soit pas de plein rang ligne.

Comme on peut le voir, l'approche de diagnostic basée sur l'espace de parité permet la génération de résidus pour la détection de défauts capteurs. Néanmoins, les propriétés des résidus générés dépendent de la taille de la fenêtre d'observation considérée. Ce paramètre est très difficile à déterminer ainsi que les matrices W et Q . En plus, cette approche ne permet pas de prendre en considération les différents défauts pouvant affecter un système physique tels que les défauts actionneurs par exemple.

2.2.2 Observateurs

Un observateur d'état est un filtre utilisant les entrées et les mesures d'un système dans le but de déterminer une estimation des variables d'état de ce dernier [LUENBERGER, 1966]. Les observateurs sont ainsi des systèmes dynamiques visant à construire l'état x d'un modèle (représenté sous forme de représentation d'état) en utilisant les grandeurs accessibles du système, telles que ses entrées mesurées u et ses sorties y . L'observateur d'état a été introduit par Luenberger pour les systèmes linéaires déterministes [LUENBERGER, 1966]. Par la suite Kalman a proposé un observateur pour la classe des systèmes linéaires stochastiques.

Un observateur d'état peut être utilisé comme un indicateur de fautes sous la forme d'un résidu représentant l'écart éventuellement pondéré entre les sorties mesurées et les sorties estimées. Les observateurs d'état ont été largement utilisés par la communauté FDI pour résoudre plusieurs problèmes

de détection et d'isolation des défauts de capteurs et d'actionneurs. Ainsi, plusieurs travaux ont été développés traitant à la fois des systèmes linéaires et non linéaires [ZHANG, 2008] [CASSEZ, 2008].

L'approche de diagnostic de défauts basée sur la génération de résidus (moyennant l'utilisation d'un observateur) peut être décomposée en 3 étapes distinctes :

- Génération des résidus :

Cette étape est la base de la stratégie de diagnostic de défauts. Elle consiste à estimer les sorties du système physique en utilisant un observateur de Lyunberger pour le cas des systèmes déterministes ou un filtre de Kalman pour les systèmes stochastiques, ainsi l'écart de l'erreur estimée représente le résidu. En effet, cette procédure de détection de défauts repose sur le principe de découplage des perturbations par lequel le résidu est calculé en supposant que les effets des défauts peuvent être découplés pour différentes entrées du système. Les principales méthodes utilisées dans ce sens sont respectivement l'observateur à entrées inconnues (UIO) et le filtre à entrées inconnues (UIF) qui est basé sur l'Unscented Kalman Filter (UKF). A ce propos, il est à noter que l'extension aux systèmes non linéaires est généralement réalisée par linéarisation du modèle autour de l'erreur courante estimée dans le filtre de Kalman étendu (EKF). Et contrairement à ce dernier, l'UKF ne linéarise pas le modèle mais il prédit le comportement du système en évaluant le modèle non linéaire sur un ensemble de points répartis sur une distribution gaussienne.

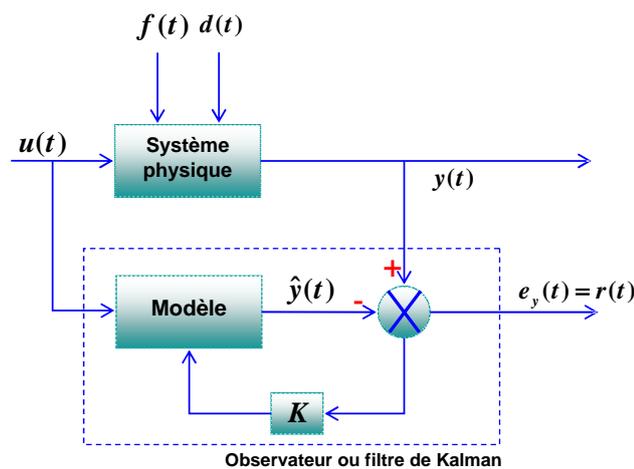


FIGURE 2.5 – Schéma d'un observateur linéaire pour la génération de résidus

L'idée principale de la procédure de génération de résidus à base d'observateurs linéaires est illustrée par la Figure 2.5. En effet, l'observateur est composé du système physique en parallèle avec le modèle de ce dernier et avec un retour de l'erreur de sortie estimée $e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. Sur la Figure 2.5, u et y représentent respectivement le vecteur des entrées et celui des sorties, f est le vecteur des défauts à détecter et d est le vecteur des entrées inconnues pour lesquelles le système de détection de défauts doit être insensible. y représente le vecteur des sorties estimées, r le vecteur des résidus et K le gain de l'observateur. De plus, les résidus doivent être définis tels que : $r(t) = 0$ (ou $r(t) \approx 0$), si $f(t) = 0$ (fonctionnement normal)

$r(t) \neq 0$, si $f(t) \neq 0$ (en présence d'un défaut)

- Evaluation des résidus :

Les résidus sont évalués en terme de la probabilité d'occurrence d'un défaut. Ainsi une procédure d'aide à la prise de décision est appliquée et vise à déterminer dans la mesure du possible, le défaut qui est survenu tout en évitant les fausses alarmes et les défauts non détectés. Plusieurs méthodes d'aide à la prise de décision existent dans la littérature et elles aboutissent presque toutes à une variable de décision binaire Sr utilisant un seuil fixe ou adaptatif τ dans une fonction d'évaluation F telle que :

Si $F(r(t)) \leq \tau(t)$ alors $Sr = 0$ (fonctionnement normal)

Si $F(r(t)) > \tau(t)$ alors $Sr = 1$ (en présence d'un défaut)

- Analyse du défaut :

Cette étape vise à déterminer l'amplitude du défaut et l'évolution dans le temps du comportement de ce dernier. Cette étape est cruciale pour l'élaboration d'une stratégie de reconfiguration du système étudié mais elle reste facultative dans bon nombre de travaux existants dans la littérature et traitant du diagnostic.

2.2.3 Méthodes d'analyse de données

Méthodes statistiques (ACP)

L'ACP est une technique statistique multi-variables qui a été largement utilisée comme outil d'exploration et d'analyse de données ainsi que pour la conception de modèles notamment pour le diagnostic et la supervision des processus industriels. Cette approche se base essentiellement sur une décomposition en valeurs et vecteurs propres de la matrice de covariance des données ou encore sur une décomposition en valeurs singulières de la matrice de données [ISERMANN, 2011].

En effet, l'ACP recherche une projection linéaire des observations sur des axes orthogonaux dans le but de trouver un ensemble de composantes de dimension inférieure à celle de l'ensemble original de données et qui puisse ainsi décrire correctement les tendances principales en ne prenant en compte que les variables du processus. Néanmoins, comme c'est une opération de projection linéaire, seules les dépendances linéaires ou quasi-linéaires entre les variables peuvent être révélées. Donc, dans le cas où les données à traiter présentent des comportements non linéaires, l'ACP est incapable de trouver la représentation compacte décrivant ces données. Pour remédier à ce problème, différentes approches qui émanent de l'ACP et qui sont connues communément sous le nom d'analyse en composantes principales non linéaires ACPNL ont été développées récemment dans la littérature [HARKAT, 2007].

Méthodes probabilistes (réseaux bayésiens)

Un réseau bayésien est un formalisme probabiliste qui peut être représenté comme un triplet (G, E, D) tels que :

- G est un graphe dirigé et acyclique $G(V, A)$ où V représente l'ensemble des noeuds du graphe et A l'ensemble des arcs qui décrivent les liens de dépendances directes entre les variables.
- E est un espace probabilisé fini (O, Z, P) où O est un espace non vide, Z est un ensemble de sous espaces de O et P est une probabilité dans Z avec $P(O) = 1$.
- D est l'ensemble des variables aléatoires associées aux noeuds du graphe G et défini dans E comme suit :

$$P(V_1, V_2, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n P(V_i | C(V_i)) \quad (2.13)$$

où $C(V_i)$ est l'ensemble des noeuds parents de V_i dans le graphe G . Ainsi on dispose d'une table de probabilités conditionnelles. Un exemple de réseau bayésien simple est donné par la figure 2.6. Les réseaux bayésiens sont utilisés dans divers domaines et notamment le domaine du diagnostic et de la prise de décision. Ils sont exploités dans le but de représenter graphiquement les connaissances expertes et les liens de causalités entre variables d'un système physique en tenant compte des incertitudes [BEN-GAL, 2007]. Ensuite, la structure graphique du

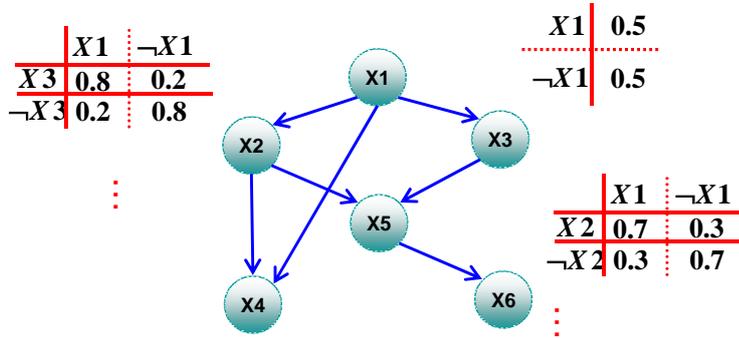


FIGURE 2.6 – Exemple d’un réseau bayésien

modèle est exploitée pour calculer, moyennant des algorithmes d’in-
 férences, les probabilités a posteriori de l’état des composants du
 système suite à une ou plusieurs observations qui correspondent à un
 fonctionnement anormal. On fait la distinction entre réseaux bayé-
 siens statiques et dynamiques en fonction de la prise en compte de
 l’évolution des variables dans le temps. Medjaher et al. proposent
 d’exploiter les réseaux bayésiens statiques pour calculer les probabi-
 lités a posteriori de ou des causes les plus probables d’une anomalie
 observée et d’intégrer les réseaux bayésiens dynamiques pour tenir
 compte de la dynamique du système et permettre de prédire son com-
 portement futur en fonction de son état actuel et d’autres variables
 ou contraintes exogènes. Néanmoins, les réseaux bayésiens présentent
 des limites concernant le calcul de toutes les probabilités condition-
 nelles qui peut s’avérer très difficile voire impossible pour les réseaux
 assez grands représentant des systèmes complexes.

2.3 Approches qualitatives

2.3.1 Approches DX

Le diagnostic par approches DX a été établi par Reiter en 1987
 [REITER, 1987] puis il a été développé et généralisé par De Kleer
 et Williams. Les approches DX se basent sur la théorie de la logique
 du premier ordre définie par Davis en 1984 où les informations re-
 quises pour la modélisation sont (1) la description du système SD
 exprimée par un ensemble de formules de la logique des prédicats du
 premier ordre avec des égalités décrivant non seulement le compor-

tement normal de chaque composant mais définissant également les connexions entre les différentes variables et (2) les composants du système *COMPS* qui représentent un ensemble fini de constantes.

L'idée principale du diagnostic par les approches DX consiste à déterminer les composants $c_i \in \text{COMPS}$ dont le dysfonctionnement expliquerait les différences entre (1) le comportement du système défini par l'ensemble (SD, COMPS) et (2) un ensemble d'observations *OBS* disponibles sur le système et qui représentent les valeurs connues de certaines variables. Pour y parvenir, un prédicat unitaire *AB*, qui correspond à un fonctionnement anormal, a été introduit et ainsi pour un composant $c_i \in \text{COMPS}$, $\neg AB(c_i)$ signifie que ce composant fonctionne correctement. Ainsi, le fait que les observations *OBS* soient en conflit avec le fonctionnement normal du système (correspondant au cas où chaque composant fonctionne correctement) s'exprimera comme suit [PULIDO, 2004] :

$SD \cup \{\neg AB(c_1), \neg AB(c_2), \dots, \neg AB(c_n)\} \cup \text{OBS}$ est incohérent, n
étant le nombre d'éléments de *COMPS*.

Ainsi le diagnostic peut être défini comme étant une conjoncture dans laquelle un ensemble minimal de composants défectueux explique une situation observée. Ceci correspond à la définition suivante :

Soient C et C' deux sous ensembles distincts de *COMPS* tel que $C \cap C' = \emptyset$. En définissant l'ensemble $D(C, C')$ comme suit :

$$D(C, C') = (AB(c)|c \in C) \wedge (\neg AB(c)|c \in C')$$

Il vient que la proposition $D(\Delta, \text{COMPS} - \Delta)$ est un diagnostic de $(SD, \text{COMPS}, \text{OBS})$ si et seulement si la proposition suivante est satisfiable :

$$SD \cup \text{OBS} \cup D(\Delta, \text{COMPS} - \Delta)$$

tel que $\Delta \in \text{COMPS}$ soit un ensemble de composants suspects.

De plus, $D(\Delta, \text{COMPS} - \Delta)$ est un diagnostic minimal si et seulement si $\forall \Delta' \subseteq \Delta$, $D(\Delta', \text{COMPS} - \Delta')$ n'est pas un diagnostic.

L'idée fondamentale du diagnostic par approche DX se base sur la génération d'un ensemble de conflits dans le cas où les expressions définies ci dessus ne sont pas satisfiables c'est-à-dire qu'il y a une incohérence entre le comportement simulé d'un système à l'aide du

modèle de son fonctionnement normal avec son comportement réellement observé. La présence d'incohérences est le point de départ de la recherche des diagnostics. Selon la nature du modèle utilisé, cette recherche peut se faire par des approches basées sur la consistance ou par des approches basées sur l'abduction. Dans les approches basées sur la consistance, on cherche à expliquer les incohérences après les avoir détectées. Néanmoins, dans les approches par abduction, on cherche à expliquer les observations *OBS* et non plus nécessairement les incohérences c'est-à-dire que l'on cherche à déterminer un ensemble de composants défaillants en supposant, implicitement, que les autres composants fonctionnent correctement [TRAVE-MASSUYES2006, 2006].

Les approches DX ont été largement appliquées sur des systèmes statiques puis elles ont été étendues pour les systèmes dynamiques. Ces approches sont relativement simples, elles se basent sur la modélisation du comportement normal du système à surveiller et permettent, comme on l'a vu, de traiter le cas de défauts simples et multiples en se basant sur la génération d'un ensemble de conflits [CORDIER, 2004].

2.3.2 Approches relationnelles

AMDEC

L'AMDEC est l'acronyme d'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité, connue en anglais sous l'acronyme FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) [ARABIAN-HOSEYNABADI, 2010] [OZARIN, 2013]. Il s'agit d'une méthodologie qui a pour objet de focaliser sur les défaillances les plus critiques du système avant qu'elles ne surviennent afin d'éliminer ou de minimiser les risques associés. Cette caractéristique de l'AMDEC permet ainsi de déterminer les causes et conséquences des différents modes de défaillances et peut ainsi être utilisée hors-ligne pour les étapes d'identification et d'explication du diagnostic.

La méthode passe toujours par une analyse qualitative qui commence par la sélection d'un composant, un sous-système ou un produit, par l'identification de sa fonction et par la détermination de ses différents modes de défaillance. Après, pour chaque mode de défaillance, les effets immédiats et finaux sont identifiés ainsi que les causes de défaillance. Par la suite, une analyse quantitative est effectuée, elle

sert à évaluer la fréquence d'apparition de la défaillance, la gravité de celle-ci et la probabilité qu'elle passe inaperçue.

La criticité de chaque défaillance est déterminée à partir des échelles de fréquence d'occurrence (F), de gravité (G) et de détectabilité (D). En effet, une cotation est déterminée par le groupe de travail lors de l'initialisation de l'étude en définissant une certaine échelle (le tableau 2.1 présente un exemple simple de cotation pour une étude AMDEC). La criticité (C) est calculée par :

$$C = F \times G \times D$$

L'indice de criticité est utilisé pour effectuer un classement des défaillances constatées permettant ainsi de définir les actions correctives à entreprendre en priorité (indice de criticité élevé) et les défaillances qui peuvent être considérées comme acceptables. (La figure 2.7 explique les principales étapes de la méthode AMDEC).

Cote	Echelle de fréquence d'occurrence (F)	Echelle de Gravité (G)	Echelle de Non-Détection (D)
1	Événement très rare	Événement sans influence	Événement détecté à coup sûr
2	Événement possible	Événement critique	Événement détectable
3	Événement fréquent	Événement catastrophique	Événement difficilement détectable
4	Événement très fréquent	Événement mortel	Événement indétectable

TABLE 2.1 – Exemple simple de cotation pour une étude AMDEC

A partir de cette présentation succincte de l'approche AMDEC, on peut constater que son élaboration devient très compliquée et coûteuse en temps et en moyens mis en oeuvre dès lors qu'il s'agit d'un système ou d'un procédé complexe faisant intervenir plusieurs composants et sous-systèmes.

Limites et avantages :

Les AMDEC semblent donc, lorsqu'elles sont paramétrées de manière adaptée pouvoir permettre :

- Un traitement systématique des risques.
- Une analyse des causes pouvant engendrer des défauts constatés.
- Une analyse des conséquences de ces défauts. Cette analyse peut être utilisée pour la justification des conclusions du diagnostic.

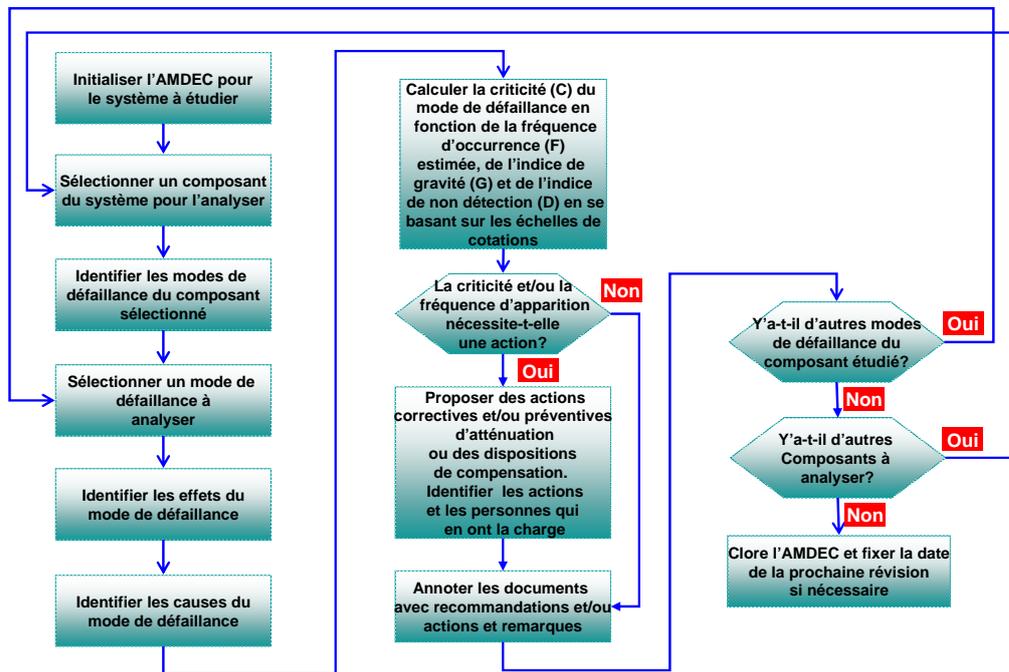


FIGURE 2.7 – les principales étapes de la méthode AMDEC

Plusieurs récents travaux ont tenté de remédier aux problèmes de non exhaustivité de cette approche et de la cotation basée sur des descriptions linguistiques et utilisée pour le calcul de la criticité sachant que celle-ci sert pour le classement des risques auxquels le système étudié pourrait succomber [XIAO, 2011] [RHEE, 2003].

Analyse HAZOP

L'analyse HAZOP (HAZard and OPerability study) est une méthode qui a été développée dans les années 1970 au Royaume-Uni et en l'occurrence au sein de la société Imperial Chemical Industries (ICI). Cette méthode est donc issue de l'industrie chimique, mais elle a été étendue par la suite à différents secteurs d'activité afin de compléter l'AMDEC qui se focalise généralement sur l'étude des dégradations des composants tandis que l'HAZOP se concentre sur les anomalies au niveau des flux [TRAMMELL, 2001] [DUNJO, 2010].

L'analyse HAZOP est avant tout une méthode qualitative d'analyse de risques potentiels auxquels le procédé ou système considéré est soumis. Cette méthode est particulièrement utile pour la caractéri-

sation des dangers et dysfonctionnements par l'étude systématique des déviations des paramètres gouvernant le procédé à analyser. En effet, elle se focalise sur les flux échangés entre les composants et se base sur deux types de points d'études à savoir les composants ou sections du procédé et les étapes du mode opératoire.

Ainsi, pour chaque section, l'ensemble des variables qui la caractérisent est déterminé et une liste de mots clefs est appliquée à chaque variable dans le but de construire toutes les déviations possibles (température plus élevée que la normale, pression plus élevée que la normale ... sont des exemples de mots clés) et d'examiner celles entraînant des risques en analysant les causes et les effets de ces déviations sur le système ainsi que leurs propagations. Donc de part sa nature, cette méthode requiert l'examen de schémas PID (Piping and Instrumentation Diagram) mais aussi la mobilisation d'une équipe pluridisciplinaire d'experts ayant une connaissance approfondie du processus décrit sur les plans détaillés. Cette équipe d'experts examine les déviations suite à la variation (par rapport à des points de consigne) des paramètres sensibles du système et définit les actions recommandées pour éliminer en priorité la cause et les conséquences d'un risque potentiel. L'analyse des déviations fait l'objet d'un enregistrement sous forme de tableaux et qui sera la base indispensable pour la mise en place ultérieure des actions recommandées par l'équipe d'experts. La figure 2.8 explique le principe d'une analyse HAZOP.

Limites de la technique HAZOP

L'HAZOP est un outil particulièrement efficace pour les systèmes faisant intervenir des circulations de fluide. Cette méthode présente tout comme l'AMDEC un caractère systématique et méthodique. Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système, elle évite de considérer, contrairement à l'AMDEC, tous les modes de défaillances possibles pour chacun des composants du système. En revanche, l'HAZOP permet difficilement d'analyser les événements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances.

Par ailleurs, il est parfois difficile d'affecter un mot clé à une portion bien délimitée du système à étudier. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une dérive.

En effet, les systèmes étudiés sont souvent composés de parties interconnectées si bien qu'une dérive survenant dans une ligne ou maille

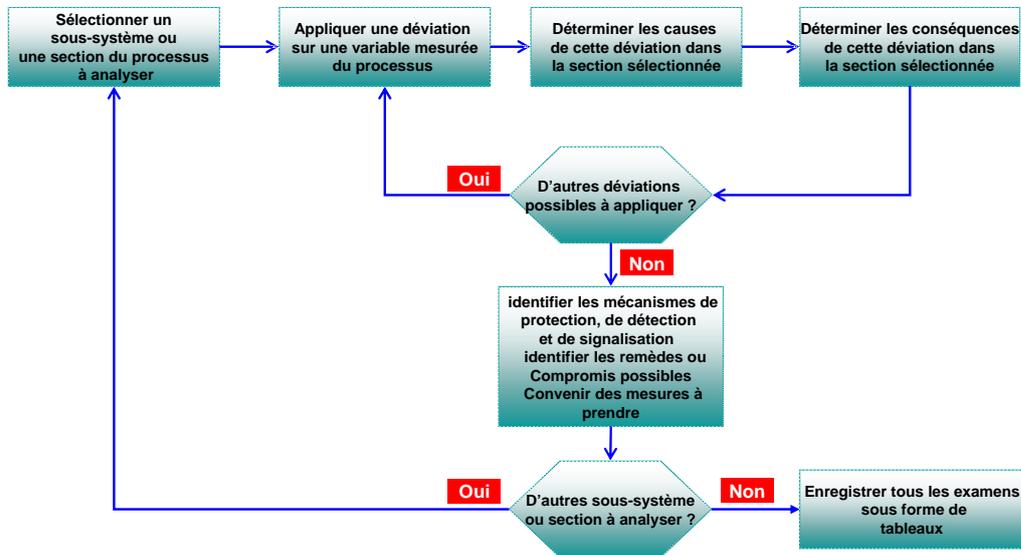


FIGURE 2.8 – Principe d'une analyse HAZOP

peut avoir des conséquences ou à l'inverse des causes dans une maille voisine et inversement. Bien entendu, il est possible a priori de reporter les implications d'une dérive d'une partie à une autre du système. Toutefois, cette tâche peut rapidement s'avérer complexe.

La méthode HAZOP repose sur la déviation des variables, mais ne prend pas en compte les défaillances, ni les enchaînements que peuvent entraîner les déviations de ces variables. Ainsi, cette approche peut être utilisée tout comme l'AMDEC pour les étapes d'identification et d'explication du diagnostic.

Récemment, des efforts ont été entrepris pour améliorer ce processus par l'usage des systèmes experts dans le cadre d'une approche semi-quantitative, mais aussi en utilisant les réseaux de Pétri [NEMETH, 2003] et les graphes orientés signés [WANG, 2009] [ZHANG, 2009] connus en anglais sous l'acronyme SDG [IRI, 1979] [TATENNO, 2006] [MAURYA, 2003] [YANG, 2012] [MAURYA, 2003].

Arbre de défaillances

L'arbre de défaillance est un outil qui vise à représenter graphiquement la logique de dysfonctionnement d'un système. Cet ou-

til permet de représenter d'une façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'événements qui peuvent amener à un événement redouté (défaillance) qui doit être défini de façon explicite et précise [LEE, 1985]. Cette recherche des combinaisons de causes pouvant provoquer une défaillance est représentée graphiquement à l'aide d'une structure arborescente dans laquelle les relations causes/effets sont schématisées par des portes logiques ET/OU et un certain nombre de symboles normalisés. En effet, le sommet de l'arbre représente la défaillance que l'on cherche à analyser et chaque niveau hiérarchique représente la combinaison ou les combinaisons susceptibles d'expliquer l'événement du niveau supérieur auquel elles sont rattachées. La figure 2.9 décrit la procédure de construction d'un arbre de défaillance. En plus de la méthode des arbres de défaillance, deux autres méthodes proches de celle-ci existent mais elles sont légèrement différentes, il s'agit de l'arbre d'événements et de l'arbre de causes. Donc pour lever toute ambiguïté, on va présenter les différences entre les trois méthodes. En effet, l'arbre d'événements cerne les conséquences d'un événement initiateur donné, l'arbre de défaillance cerne les scénarios conduisant à un événement redouté donné et finalement l'arbre des causes est proposé pour assembler les éléments d'explication d'un incident en se basant sur une analyse a posteriori.

La méthode de l'arbre de défaillance est une démarche basée sur une partie qualitative qui correspond à la construction de l'arbre et à l'identification des coupes minimales (une coupe minimale étant un ensemble d'événements de base ou conditions nécessaires et suffisantes pour produire l'événement-sommet, c'est-à-dire qu'il s'agit du chemin critique pouvant conduire à l'événement indésirable ou redouté) et une partie quantitative qui vise à évaluer les probabilités d'occurrence des différents événements menant à la défaillance à partir de la combinaison des vraisemblances que les événements élémentaires se produisent. En effet, le calcul de la probabilité d'occurrence de l'événement sommet (la défaillance à analyser) se fait à travers la propagation des probabilités d'occurrence des événements de base vers le sommet. Ainsi, les arbres de défaillance permettent de hiérarchiser les événements menant à l'événement redouté par une approche descendante ou inductive de l'arbre et là on parle d'une approche systématique descendante ou inductive et d'évaluer la fiabilité de l'événement redouté par une approche ascendante ou déductive.

La probabilité d'occurrence d'un événement C résultant de A OU

B (indépendants) est la somme des probabilités d'occurrence de A et B diminuée de leur produit ; ce qui peut se formuler ainsi :

$$p(C) = p(A) + p(B) - p(A) \times p(B)$$

La probabilité d'occurrence de l'événement D résultant de A ET B (indépendants) est le produit des probabilités d'occurrence de A et B ; ce qui peut se formuler ainsi :

$$p(D) = p(A) \times p(B)$$

Ces deux règles sont exploitées afin de déterminer les probabilités d'occurrence des événements intermédiaires en partant des événements de base jusqu'en arrivant à l'événement sommet.

Intérêts et limites de l'approche

L'approche de l'arbre de défaillances est une approche qui permet de visualiser l'ensemble des combinaisons d'événements intermédiaires et de base conduisant à un événement redouté (une défaillance). Elle permet donc d'avoir une vision globale et logique du fonctionnement d'un système et de part sa structure arborescente, elle permet le calcul des probabilités de la défaillance étudiée en effectuant une propagation des probabilités d'occurrence des événements de base vers le sommet. Ceci permettrait de hiérarchiser les événements, de déterminer l'ordre des coupes minimales ainsi que leurs nombres en essayant d'y remédier, d'apprécier le nombre de scénarios conduisant à l'événement redouté et d'implémenter des stratégies qui pourraient améliorer les résultats obtenus dans les phases de détection et d'isolation de défauts. En effet, cette approche probabilistique peut être utilisée comme outil complémentaire au module de diagnostic surtout dans le cas où les défauts ne sont pas complètement isolables.

Néanmoins, la réalisation d'un tel objectif nécessite l'affectation des probabilités des événements de base qui se fait par des essais, des retours d'expérience, des jugements d'expert, des audits,... ce qui n'est pas évident. De plus, on peut être confronté à un phénomène d'explosion combinatoire, simplement dû au fait que le nombre d'événements à considérer est une fonction exponentielle du nombre de composants du système à étudier. Il est nécessaire de mettre l'accent sur le fait que la méthode des arbres de défaillance souffre de l'absence de l'aspect temporel des scénarios d'événements conduisant à la défaillance. La méthode est binaire c'est-à-dire que l'événement peut se produire ou ne pas se produire. Elle obéit également à certaines hypothèses et

restrictions :

- Un événement de base ne doit pas être décomposable en éléments plus simples.
- Tout événement de base doit être indépendant des autres événements de base.
- Tout événement de base doit avoir une fréquence évaluable.

Des travaux récents ont été développés visant à remédier aux limites des arbres de défaillance. L'approche développée dans [DUAN, 2012] vise à combiner l'approche de l'arbre de défaillances et les réseaux bayésiens. En effet, dans l'approche proposée les coupes minimales sont déduites à partir de l'arbre de défaillance via une analyse qualitative et par la suite les réseaux bayésiens dynamiques sont exploités, en tant qu'outil de diagnostic et d'aide à la prise de décision, pour calculer les probabilités a posteriori de ou des causes d'une anomalie observée (observation ou évidence) dans le but de prédire son comportement futur en fonction de son état actuel et d'autres variables ou contraintes exogènes. En plus, l'approche de l'arbre de défaillance a été combinée avec les systèmes experts et notamment les réseaux de neurones pour le diagnostic de défauts en essayant de remédier à l'aspect binaire de la production ou pas des événements de base [WANG, 2012].

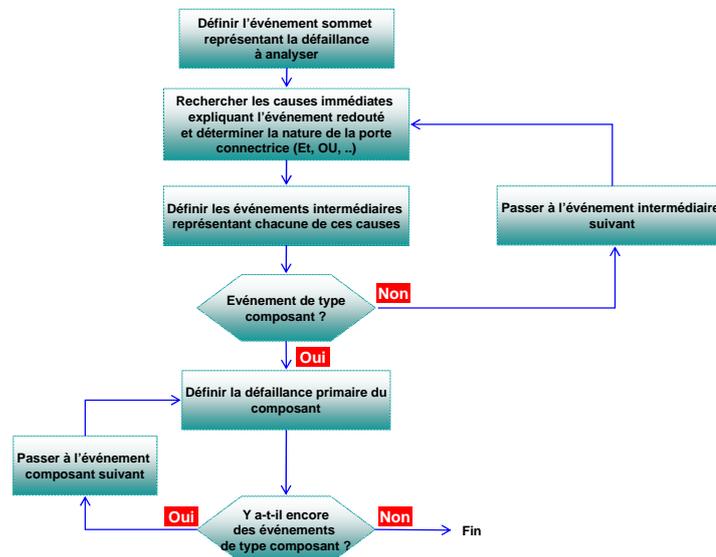


FIGURE 2.9 – Principe de construction d'un arbre de défaillance

2.3.3 Approches graphiques

Les graphes orientés signés

Le graphe orienté signé connu en anglais sous l'acronyme SDG (Signed Directed Graph) est une approche graphique à base de modèles qualitatifs. Le SDG repose sur un graphe causal dont les sommets sont des variables et dont les arcs traduisent le signe des influences entre ces variables, ce qui le rend favorable pour le diagnostic dont le but est de déterminer les causes de situations anormales observées.

Cette approche a été largement utilisée dans l'industrie chimique et a prouvé son efficacité pour le diagnostic des défauts simples et multiples [TATENO, 2006]. Iri. et al. [IRI, 1979] ont proposé de représenter la structure du système à surveiller par un graphe orienté signé et d'appliquer la théorie des graphes pour identifier les causes possibles des défauts et des perturbations plausibles. Bien que cette approche soit bien adaptée pour les systèmes dynamiques, le développement des modèles SDG n'est pas trivial. En effet, les principales méthodes utilisées pour la modélisation d'un système dynamique par un SDG sont basées soit (1) sur la connaissance précise du système à travers les schémas tuyauterie et instrumentation (en anglais Piping and instrumentation diagram ou Process and instrumentation diagram) abrégé P&ID ou (2) sur des modèles analytiques décrivant le comportement du système.

Un $SDG(N, A)$ est un graphe orienté et signé où $N = N_X \cup N_U$ est l'ensemble des sommets et A l'ensemble des arcs orientés signés où N_X est l'ensemble des variables du système (variables d'état, variables de sorties ...) et N_U est l'ensemble des variables externes tel est le cas des perturbations pouvant être estimées. Chaque sommet du SDG est affecté à l'un des signes '+', '-' ou '0' qui représentent respectivement une valeur normale, trop haute ou trop basse par rapport à la valeur de la variable de référence. Chaque arc peut avoir l'un des deux signes suivants '+' et '-'. Le signe '+' est attribué lorsque les variables se rapportant à l'arc évoluent dans le même sens alors que le signe '-' est attribué lorsque les variables se rapportant à l'arc évoluent dans des sens opposés.

On parle d'un arc consistant lorsque la valeur qualitative de ce dernier est égale au produit des valeurs qualitatives des deux sommets

reliés par cet arc. Un ensemble d'arcs consistants forment un chemin consistant.

Prenons l'exemple de la figure 2.10, l'arc orienté de B vers C est un arc négatif, ce qui signifie que les sommets B et C évoluent dans des sens opposés ($\frac{\partial C}{\partial B} < 0$) contrairement à l'arc orienté de C à D qui est positif ($\frac{\partial D}{\partial C} > 0$). En fonctionnement normal, tous les sommets ont le signe '0'. Lorsqu'un défaut survient, le sommet correspondant à l'observation change de signe (ce sommet est appelé sommet valide) et le parcours des arcs du SDG démarre dans le but d'obtenir les valeurs qualitatives des sommets antécédents en suivant un parcours descendant des chemins consistants. A chaque fois que la valeur prédite d'un sommet est mesurée, celle-ci est comparée à la valeur observée. Cette démarche s'achève lorsque tous les sommets antécédents au sommet, dont la valeur est mesurée, sont parcourus. Par exemple, si le sommet A devient '+' alors l'un des chemins consistants possibles est $[A(+), B(+), C(-), D(-), E(+)]$. Ainsi, l'origine du défaut est déterminée en fonction des éléments parcourus.

Le SDG repose donc sur un processus déductif mettant en oeuvre des modèles qualitatifs émanant d'un ensemble d'équations analytiques. Il est utilisé pour prévoir, simuler et expliquer le comportement d'un système complexe à partir du comportement des variables qui le caractérisent. Néanmoins, les équations décrivant avec précision le comportement d'un système complexe ne sont pas toujours disponibles et la validation du modèle SDG construit n'est pas facile à réaliser et nécessite l'utilisation de plusieurs données expérimentales.

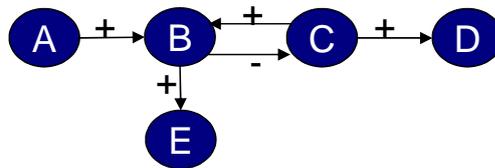


FIGURE 2.10 – Exemple d'un graphe orienté signé

Le graphe causal temporel

Le graphe causal temporel connu en anglais sous l'acronyme TCG (Temporal Causal Graph) a été développé par Mostermann & al.

[MOSTERMAN, 1999] et peut être défini comme l'abstraction qualitative et symbolique du comportement d'un système continu.

Un graphe causal temporel est un graphe orienté, labelé (chaque arc possède un label) $G(S, A, L, l_e)$, où S est l'ensemble des sommets représentant l'ensemble des variables du système, $A \subseteq S \times L \times S$ est l'ensemble des arcs représentant les relations temporelles et causales entre les différentes variables du système, $L \subseteq \{=, +1, -1\} \cup \{\theta : \theta \in \Theta\} \cup \{1/\theta : \theta \in \Theta\} \cup \{\theta dt : \theta \in \Theta\} \cup \{1/\theta dt : \theta \in \Theta\}$ est l'ensemble des labels associés aux arcs (Θ représente l'ensemble des paramètres du système) et $l_e : E \rightarrow L$ est une fonction permettant d'associer un label à chaque arc.

En effet, les arcs qui connectent les différentes variables du système (sommets du graphe), peuvent avoir le label = qui indique une égalité entre les deux variables connectées, le label +1 qui indique une relation de proportionnalité, le label -1 qui indique une relation de proportionnalité inverse, θ ou $1/\theta$ qui indiquent une relation paramétrique et θdt ou $1/\theta dt$ qui indiquent une intégration.

En effet, les TCGs sont construits à partir des équations analytiques du système. Néanmoins, plusieurs travaux ont été développés dans la littérature afin de simplifier la construction du modèle du TCG en le déduisant directement du BG. Ces travaux se basent principalement sur la méthode SCAP (Sequential Causality Assignment Procedure) afin d'associer les causalités requises permettant ainsi de déduire le TCG à partir du BG comme le montre l'exemple de la figure 2.11. L'utilisation des TCGs a été étendue pour l'utilisation des systèmes hybrides [DAIGLE, 2008]. Pour le diagnostic à base de TCG, l'approche basée sur l'abduction est employée moyennant un algorithme qui implémente le chaînage arrière avec une stratégie " en profondeur d'abord " faisant toutes les inférences possibles déduites à partir du graphe. Cette stratégie est donc basée sur un algorithme récursif qui consiste à déterminer les variables qui sont à l'origine d'un défaut constaté à partir d'une variable mesurée [BISWAS, 2003] [MANDERS, 2000].

L'exemple de la figure 2.11 représente un système électrique et son TCG correspondant. Les arcs du bond Graph appelés bonds sont transformés en variables énergétiques portant le numéro du bond correspondant. Par exemple, le bond 3 du BG se transforme en deux variables énergétiques e_3 et f_3 sur le TCG.

Malgré l'intérêt que suscite le TCG, ce dernier présente quelques li-

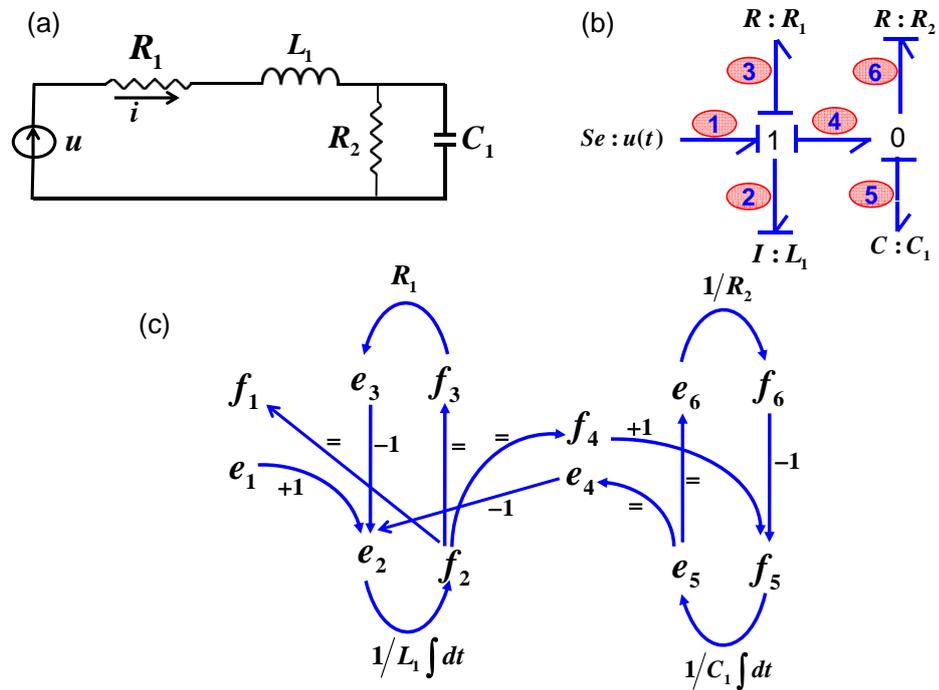


FIGURE 2.11 – (a) Système électrique, (b) Modèle Bond Graph associé et (c) Modèle TCG correspondant

mites car il peut être considéré tout simplement comme un graphe de fluence prenant en considération des contraintes temporelles. De plus, le graphe temporel causal souffre d'un manque d'informations sur la nature de l'énergie conservée (stockage d'énergie, apport énergétique, dissipation d'énergie,...). Cette problématique sera résolue avec le modèle que nous avons proposé et défini et qu'on explicitera tout au long des prochains chapitres.

2.4 Synthèse

Ce chapitre présente à la fois des approches de diagnostic en-ligne et hors-ligne. Le diagnostic hors-ligne s'appuie sur un ensemble de comportements du système connus à l'avance sans aucun critère sur le temps de réponse du système. Ce diagnostic se base généralement sur les approches qualitatives qui sont indispensables notamment pour les étapes d'identification et d'explication du module de diagnostic. Néanmoins, elles souffrent d'un manque de prise en considération des

phénomènes physiques pouvant conduire à des défauts. D'où l'intérêt du diagnostic en-ligne qui s'appuie généralement sur les observations constatées pendant que le système fonctionne. Ce diagnostic traite généralement les étapes de détection et d'isolation du défaut et se base sur les approches quantitatives. Ces approches reposent généralement sur la comparaison du comportement observé avec le comportement prévu qui est décrit par un modèle. Néanmoins, il est difficile de construire un modèle suffisamment précis pour décrire tous les liens entre variables ainsi que l'ensemble des phénomènes physiques régissant le fonctionnement d'un système. De plus, ces approches présentent d'autres limites dans le sens où elles émettent l'hypothèse de l'occurrence d'une faute simple à la fois (non combinées) et se basent généralement sur un test binaire des différentes valeurs résiduelles. C'est pour cela que nous avons proposé dans ce travail de recherche de se servir des avantages des approches qualitatives et quantitatives en utilisant notamment l'approche bond graph et en développant un nouveau formalisme générique que nous avons appelé Bond Graph Signé.

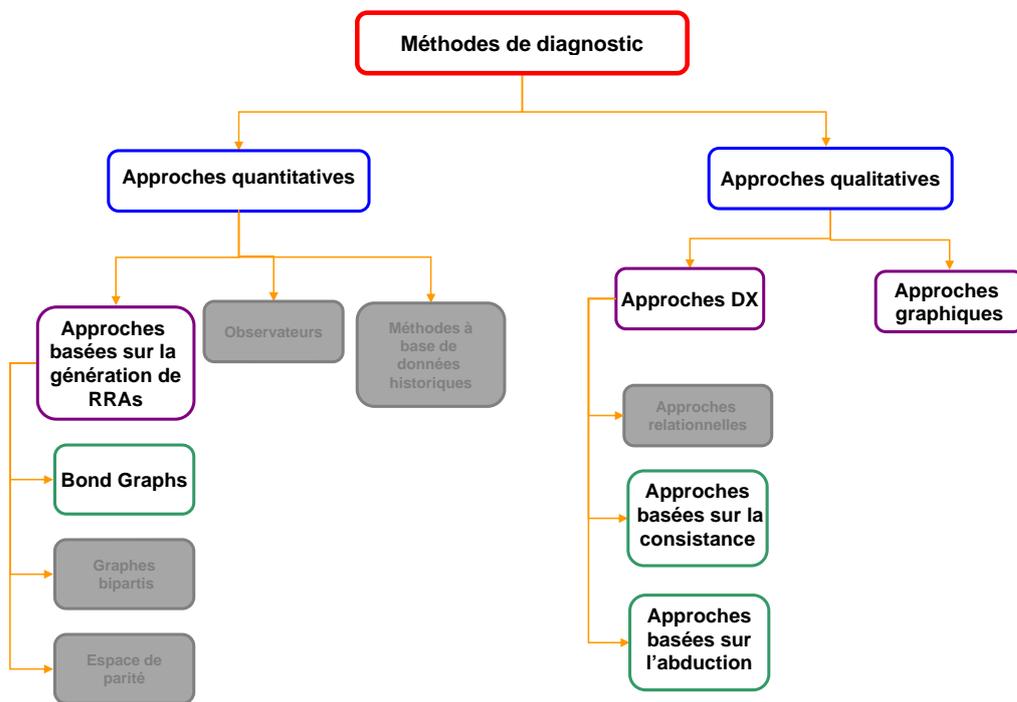


FIGURE 2.12 – Positionnement par rapport aux approches existantes

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons situé notre travail de recherche par rapport à la problématique liée au diagnostic des systèmes continus comme le montre la figure 2.12. Pour cela nous avons décrit les principales méthodes qualitatives et quantitatives tout en mettant en avant leurs avantages et leurs inconvénients. Cette étude vise à cerner la problématique liée au diagnostic de défauts en ayant recours séparément aux méthodes expliquées dans ce chapitre. Nous pouvons constater aussi la différence entre les différentes méthodes et ainsi la difficulté de développer un modèle unique regroupant les différentes caractéristiques de celles ci.

CHAPITRE 3

Formalisme mathématique du Bond Graph Signé (BGS)

Sommaire

3.1	Problématique	59
3.2	Formalisme mathématique des BGS	62
3.2.1	Définition et propriétés du BGS	63
3.2.2	Construction du BGS	68
3.3	Modèle Générique de Composant (MGC)	76
3.3.1	Modèle externe d'un service	76
3.3.2	Notion de mode de fonctionnement (MdF)	77
3.3.3	Définition formelle d'un MGC	77
3.3.4	Agrégation des MGC	78
3.3.5	Modèle interne d'un service	80
3.4	Conclusion	81

3.1 Problématique

On attend d'un système automatisé autonome la réalisation de divers objectifs (productivité, qualité de service, sûreté, disponibilité, respect de l'environnement ...) à différents moments sans l'intervention d'un opérateur humain. La réalisation de ces objectifs repose sur les services rendus par les composants internes du système (capteurs, actionneurs, unités de calcul ...). Suite à des défaillances matérielles,

il est possible qu'un ou plusieurs services ne soient plus fournis et que par conséquent la réalisation de certains objectifs ne soit plus possible. Pour être à même de définir l'état du système à chaque instant, il est nécessaire de développer et de mettre en place :

- des algorithmes de diagnostic en-ligne : ces algorithmes permettent la détection et éventuellement la localisation des défauts qui peuvent surgir et qui caractérisent un fonctionnement anormal du système à surveiller.
- Des algorithmes de diagnostic hors-ligne : ces algorithmes permettent de remonter à l'origine de la faute et ainsi de mettre à jour la liste des services rendus par chaque composant.
- Des algorithmes de gestion des modes de fonctionnement : ces algorithmes permettent, à partir de la liste des services disponibles, de déterminer les objectifs que le système peut réellement satisfaire ainsi que les ressources matérielles dont il dispose pour les faire.

Pour pouvoir répondre à ces trois objectifs (diagnostic en-ligne, diagnostic hors-ligne et gestion des modes de fonctionnement), il faut disposer de modèles adéquats permettant de :

- générer des indicateurs de défauts à partir de la modélisation comportementale du système à étudier.
- Remonter à l'origine des fautes en explicitant les relations de causes à effets. Ces relations sont déduites à partir de la modélisation structurelle représentant les liens entre composants.
- Décrire les relations entre les objectifs à assurer par le système et les services rendus par les composants en se basant sur des modèles fonctionnels.

Plutôt que d'utiliser trois modèles différents, nous proposons un formalisme global : le Bond Graph Signé (BGS) fonctionnel qui englobe ces trois aspects. L'objectif final est de réaliser un système de supervision représentant la gestion des modes de fonctionnement à chaque instant et les conditions de reconfiguration d'un système autonome par un automate fini qui spécifie les conditions de changement de modes en fonction de la disponibilité des services sous-jacents à chaque mode.

L'obtention d'un modèle mathématique, suffisamment précis pour décrire les liens entre variables ainsi que l'ensemble des phénomènes physiques, est une tâche très difficile qui présente plusieurs limites notamment lors de la phase de validation. Cette phase consiste à

évaluer le degré de concordance entre le modèle mathématique développé et les résultats expérimentaux correspondants.

Cette difficulté de mise en équations a suscité l'intérêt des chercheurs pour les approches graphiques. En effet, ces dernières permettent l'étude des propriétés d'observabilité, de commandabilité et de surveillabilité sans avoir recours à des calculs complexes et à la connaissance préalable des valeurs des paramètres. Ces approches présentent aussi le modèle comportemental sous une forme visuelle et montrent l'architecture et la topologie du système physique.

Dans ce sens, nous proposons un Modèle Générique de Composants (MGC) qui a pour objectif de décrire et de structurer les fonctions réalisées par tout système quelque soit sa nature (mécanique, électrique, thermodynamique...) et sa complexité. Par ailleurs, il est connu que le BG est bien adapté à la description des systèmes multiphysiques et permet de générer des indicateurs de défauts. On peut donc naturellement penser que le BG convient à la description comportementale des services associés à tout composant quelque soit le niveau de décomposition de ce dernier et qu'il enrichit de cette façon la modélisation fonctionnelle proposée par le MGC.

Néanmoins, les BG ne sont pas adaptés à la logique du 1^{er} ordre (calcul des prédicats) qui permet à partir de l'observation d'un ensemble d'effets de remonter à toutes les causes possibles. Ceci est l'essence même du diagnostic qui permettra, pour chaque composant, d'évaluer la disponibilité des services qui lui sont associés. Les BG proposent cependant des atouts intéressants qu'il convient de garder (représentation énergétique multiphysique, propriétés causales, génération d'indicateurs de défauts, ...).

Le nouveau formalisme que nous proposons, le BGS, exploite la puissance de l'aspect quantitatif du BG en ajoutant la connaissance nécessaire au raisonnement qualitatif. Intégré aux MGC, le BGS offre une représentation fonctionnelle, comportementale et structurale d'un système.

Ainsi, dans ce chapitre, nous proposons d'étudier les points suivants :
– la modélisation des systèmes dynamiques par l'approche du BGS.

Cette approche sera employée dans le prochain chapitre pour le diagnostic de fautes simples et multiples moyennant deux types de raisonnement et en l'occurrence le raisonnement qualitatif et le raisonnement quantitatif.

- Le Modèle Générique de Composants (MGC) qui enrichit le BGS en permettant (1) de définir l'état du système physique considéré en termes de fonctions et services rendus et (2) de spécifier les conditions de changement de modes en fonction de la disponibilité des services sous-jacents à chaque mode.

3.2 Formalisme mathématique des BGS

Même si le BGS peut directement être généré à partir du système physique étudié, nous préconisons de générer automatiquement le BGS à partir du BG, par un algorithme spécifique que nous avons développé [CHATTI, 2013].

Ceci offre l'avantage de travailler sur des sémantiques équivalentes, facilement compréhensibles et utilisables par toute personne habituée à la modélisation BG. Pour rappel :

Définition 1 :

un modèle Bond-graph est un graphe linéaire orienté $G(H, B, J)$ où $H \cup J$ sont les sommets et B est l'ensemble des arcs.

- $H = \{h\}$ est l'ensemble des éléments multi-port représentant les processus énergétiques fondamentaux. Il regroupe les éléments suivants :
 - SE et SF représentent respectivement une *source d'effort* et une *source de flux* associées à des sources d'énergie du point de vue fonctionnel.
 - I représente l'élément *inductif* associé à un phénomène dynamique de stockage d'énergie cinétique.
 - C représente l'élément *capacitif* associé à une fonction de stockage d'énergie.
 - R représente l'élément *résistif* associé à des éléments qui dissipent de l'énergie.
 - TF transformateur et GY gyrateur sont associés à des fonctions de transformation.
 - DE et DF représentent respectivement un *détecteur d'effort* et un *détecteur de flux*, qui sont associés à des fonctions de mesure.
- $B = \{b\}$ est l'ensemble des *liens* orientés représentant la transmis-

sion de puissance. Chacun d'entre eux est défini par $b_{ij} = \{n_i, n_j\}$ où $n_i \in H \cup J$ est le noeud d'origine et $n_j \in H \cup J$ est le noeud de destination. Deux variables sont associées à chaque lien b_i : l'*effort* instantané e_i et le *flux* instantané f_i . La puissance est ainsi obtenue par la relation : $p = e \times f$

- $J = \{j\}$ est l'ensemble des jonctions représentant la loi de conservation d'énergie. Chacune d'elles est représentée par un ensemble d'éléments $\{b_{in_1}, b_{in_2}, \dots, b_{in_n}, b_{out_1}, \dots, b_{out_m}\}$ où $\{b_{in_1}, b_{in_2}, \dots, b_{in_n}\}$ est l'ensemble des liens arrivant sur la jonction et $\{b_{out_1}, b_{out_2}, \dots, b_{out_m}\}$ est l'ensemble des liens partant de la jonction. On distingue deux types de jonctions :

- *jonction 0* : Au niveau de ce noeud $e_i = e_j$ et

$$\sum_{i=1}^n f_i = \sum_{j=1}^m f_j \quad \forall b_{in_i}, \quad \forall b_{out_j}, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots m,$$

- *jonction 1* : Au niveau de ce noeud $f_i = f_j$ et

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{j=1}^m e_j \quad \forall b_{in_i}, \quad \forall b_{out_j}, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots m.$$

3.2.1 Définition et propriétés du BGS

Le BGS peut être considéré comme une extension du modèle BG. Il repose sur la définition et les propriétés suivantes.

Définition 2

Un Bond Graph Signé $G(X, A)$ est un graphe signé, dirigé et labellé tel que :

- $X = \{x_i, I \in I_x\}$ est un ensemble fini non vide de noeuds correspondants aux éléments BG du système à modéliser. L'ensemble des noeuds est décomposé en plusieurs sous-ensembles tel que $X = X_S \cup X_{Co} \cup X_{Tr} \cup X_D \cup X_{Ce}$ où :
 - $X_S = \{x_s : x_s \in Se \cup Sf \cup MSe \cup MSf\}$, est l'ensemble des éléments actifs qui fournissent de la puissance.
 - $X_{Co} = \{x_{Co} : x_{Co} \in RUC \cup I\}$, est l'ensemble des éléments passifs. Ces éléments transforment la puissance qui leur est fournie en énergie stockée.
 - $X_{Tr} = \{x_{Tr} : x_{Tr} \in TF \cup GY\}$, est l'ensemble des éléments de conservation d'énergie. Ces éléments sont utilisés pour exprimer une transformation énergétique.

- $X_D = \{x_D : x_D \in De \cup Df\}$, est l'ensemble des capteurs (détecteurs).
- $X_{Ce} = \{x_{Ce} : x_{Ce} \in J_0 \cup J_1\}$, est l'ensemble des jonctions.
- $A = \{a_{ij}, i, j \in I_x\}$ est l'ensemble des arcs signés, dirigés et labellés. Chaque arc est défini par $a_{ij} = (x_i, l_{ij}, s_{ij}, x_j)$ tel que
 - $x_i \in X$ est le noeud origine,
 - $x_j \in X$ est le noeud destination,
 - $l_{ij} \in \{e, f, e_m, f_m\}$ est un label employé pour exprimer qualitativement la variable représentant l'échange énergétique entre le noeud origine et le noeud destination. Cette variable peut représentée une variable d'effort non mesurée (e), une variable de flux non mesurée (f), une variable d'effort mesurée (e_m) ou une variable de flux mesurée (f_m),
 - $s \in \{+, -, 0, \emptyset\}$ est un signe utilisé pour exprimer le sens de la variation de l'énergie entre le noeud origine et le noeud destination. Les signes qualitatifs $+$, $-$, 0 et \emptyset expriment respectivement un apport d'énergie, une dissipation d'énergie, une conservation d'énergie et une non implication dans les échanges énergétiques.

L'association de ces différents éléments du BGS est considérée comme une partie intégrante du système à modéliser et fait émerger un certain nombre de propriétés.

Propriété 1. $\forall x_S \in \{Se, MSe\}, \exists a \in A : a = (x_S, e, +, x_{Ce})$ où $x_{Ce} \in J_1$.

$\forall x_S \in \{Sf, MSf\}, \exists a \in A : a = (x_S, f, +, x_{Ce})$ où $x_{Ce} \in J_0$.

Les éléments sources représentent l'interaction du système avec son environnement. Comme exemples de sources, on peut citer les sources de tension (sources d'effort), les sources de courant (sources de flux), les forces extérieures ...

Selon le type de la variable imposée, les éléments sources sont donc représentés par Se ou Sf . Les sources modulées par un signal externe ou par une variable sont représentées par MSe ou MSf . Sur le BGS, on a représenté la nature de l'énergie échangée c'est-à-dire qu'un élément source ne peut, en fonctionnement normal, qu'apporter de la puissance au système d'où le signe '+' au niveau de l'arc connectant un élément source à un élément central. De plus, les éléments sources Se et MSe sont généralement connectés à un élément central $x_{Ce} \in J_1$, contrairement aux éléments sources Sf et MSf qui sont généralement connectés à un élément $x_{Ce} \in J_0$. Ceci est illustré

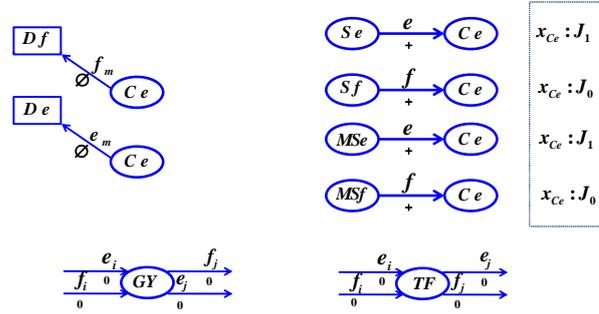


FIGURE 3.1 – Modélisation par BGS : (a) éléments d'observation (détecteurs) (b) éléments sources (c) éléments de transformation d'énergie (d) éléments passifs

par la figure 3.1(b).

Propriété 2. $\forall x_D \in De, \exists a \in A : a = (x_{Ce}, e_m, \emptyset, x_D)$.

$\forall x_D \in Df, \exists a \in A : a = (x_{Ce}, f_m, \emptyset, x_D)$.

Chaque détecteur (élément d'observation) est connecté obligatoirement à un élément central par un arc de telle sorte que le détecteur soit le noeud destination de cet arc. En effet, ce choix d'orientation provient du fait que le noeud observation (détecteur) représentera le noeud de propagation d'un défaut dans le but de déduire les éléments impliqués et pouvant expliquer ces observations. De plus, l'élément détecteur n'intervient pas dans les échanges énergétiques mais représente uniquement un élément porteur d'information sur l'effort ou le flux mesuré, d'où la valeur \emptyset pour le signe.

Propriété 3. $\forall x_{Tr} \in X_{Tr}$,

1. \exists un et un seul arc $a_i, a_i \in A : a_i = (x_{Ce}, e_i, 0, x_{Tr})$,
2. \exists un et un seul arc $a_j, a_j \in A : a_j = (x_{Tr}, e_j, 0, x_{Ce})$,
3. \exists un et un seul arc $a_i, a_i \in A : a_i = (x_{Ce}, f_i, 0, x_{Tr})$,
4. \exists un et un seul arc $a_j, a_j \in A : a_j = (x_{Tr}, f_j, 0, x_{Ce})$,

Les éléments TF et GY agissent comme des propagateurs d'énergie tout en respectant le principe de la conservation d'énergie. Ces éléments sont connectés à deux arcs en entrée et à deux arcs en sortie comme le montre la figure 3.1c. Par exemple, un réducteur dans un moteur à courant continu peut être représenté par un élément transformateur TF . Quand à l'élément GY , il peut représenter le lien entre la partie électrique et la partie mécanique d'un moteur.

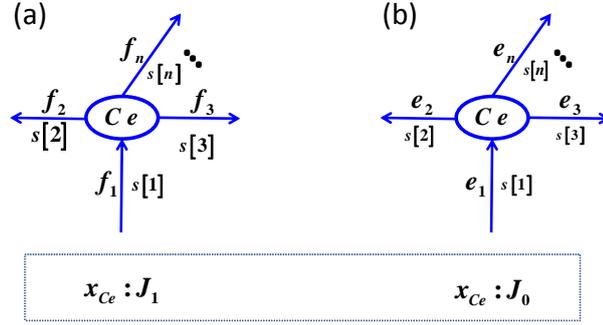


FIGURE 3.2 – Modélisation par BGS : (a) élément central de type $x_{Ce} \in J_0$ (b) élément central de type $x_{Ce} \in J_1$ avec $s[i]$ qui correspond au signe au niveau de l'arc i .

Propriété 4. $\forall x_{Co} \in X_{Co}, \exists$ un et un seul arc $a_i \in A$ et un et un seul arc $a_j \in A : a_i = (x_{Ce}, e_i, -, x_{Co}) \Leftrightarrow a_j = (x_{Co}, f_j, -, x_{Ce})$ ou $a_i = (x_{Ce}, f_i, -, x_{Co}) \Leftrightarrow a_j = (x_{Co}, e_j, -, x_{Ce})$.

Les éléments passifs sont toujours connectés à des éléments de jonction x_{Ce} . Lorsqu'un arc entrant impose l'effort, l'arc sortant fournit le flux et vice-versa comme le montre la figure 3.1d. Concernant l'élément I , il peut représenter une inertie mécanique, une inductance électrique, une masse ...

L'équation caractéristique de cet élément et qui relie l'effort à l'intégrale du flux est donnée par $\Phi_I(\int e(t), f(t)) = 0$.

Quant à l'élément C , il peut représenter un réservoir, une capacité électrique, un ressort ...

L'équation caractéristique de cet élément et qui relie le flux à l'intégrale de l'effort est donnée par $\Phi_C(e(t), \int f(t)dt) = 0$.

Concernant l'élément R , il peut représenter une résistance électrique, une valve hydraulique ...

L'équation caractéristique de cet élément peut prendre l'une des formes suivantes : $f(t) = \Phi_R^{-1}(e(t))$ ou $e(t) = \Phi_R(f(t))$.

La causalité préférentielle intégrale, pour les deux éléments C et I , se traduit par :

1. $\forall x_{Co} \in C, a_i = (x_{Co}, e_i, -, x_{Ce}) \Leftrightarrow a_j = (x_{Ce}, f_j, -, x_{Co})$
2. $\forall x_{Co} \in I, a_i = (x_{Co}, f_i, -, x_{Ce}) \Leftrightarrow a_j = (x_{Ce}, e_j, -, x_{Co})$

Propriété 5.

Considérons une variable d'effort $e(a)$ associée à un arc a , et une

- variable de flux $f(a)$ associée à un arc a ,
- $\forall x_{Ce} \in J_0$,
 1. \exists un et un seul arc $a_i \in A : a_i = (x, e_i, s, x_{Ce})$,
 2. $e(a_i) = e(a_j) \forall a_j \in A : a_j = (x_{Ce}, e_j, s, x)$
 - $\forall x_{Ce} \in J_1$,
 1. \exists un et un seul arc $a_i \in A : a_i = (x, f_i, s, x_{Ce})$,
 2. $f(a_i) = f(a_j) \forall a_j \in A : a_j = (x_{Ce}, f_j, s, x)$

L'effort (resp. le flux) au niveau d'une jonction est imposé par un seul arc entrant au niveau de la jonction $x_{Ce} \in J_0$ (resp. la jonction $x_{Ce} \in J_1$) comme le montre la figure 3.2. Les autres arcs sortants transportent l'effort (resp. le flux) aux autres éléments connectés à la jonction $x_{Ce} \in J_0$ (resp. la jonction $x_{Ce} \in J_1$). En effet, les variables d'effort (resp. de flux) associées aux arcs sortants sont égales à la variable d'effort (resp. de flux) associée à l'arc entrant. Ainsi, s'il y a plus qu'un arc entrant associé à un effort (resp. à un flux) au niveau d'une jonction $x_{Ce} \in J_0$ (resp. d'une jonction $x_{Ce} \in J_1$) alors il y a un conflit de causalité qui peut être du à une erreur de modélisation ou à la non considération d'un phénomène physique. Les équations déduites à partir des éléments x_{Ce} sont appelées les équations constitutives.

Propriété 6.

Un système est surveillable si et seulement si tous les éléments $X_{Co} = I \cup C$ sont atteignables à partir des détecteurs X_D en allant dans le sens opposé des flèches du BGS. Cette condition d'atteignabilité est importante pour la détermination des RRAs comme on le verra dans le chapitre suivant.

Propriété 7. Un élément central x_{Ce} est dit mesurable si et seulement si $\exists a \in A : a = (x_{Ce}, e_m, \emptyset, x_D)$.

Le noeud x_D est le seul noeud correspondant à une variable d'effort mesurée ou à une variable de flux mesurée. Ce noeud caractérise l'observation de départ utilisée pour définir, en parcourant le BGS, un ensemble de conflits incluant des fautes candidates et pouvant expliquer les observations. La valeur mesurée correspondant au noeud x_D prend une valeur qualitative. Cette valeur peut être '+', '-', '0' et exprime une valeur mesurée respectivement au dessus de la plage de variation de la valeur nominale, en dessous de celle-ci ou se trouvant dans la plage de variation nominale. Cette information est facilement

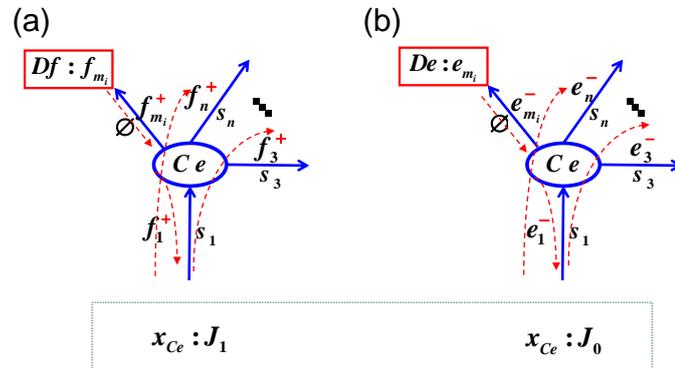


FIGURE 3.3 – Propagation de la faute à partir de l'observation

disponible dans les documents de conception ou d'expertises du système. Les valeurs nominales sont utilisées pour générer, moyennant le BGS, des explications partielles qualitatives associées aux mesures individuelles. En fonctionnement normal, la valeur qualitative associée au noeud d'observation est '0' et donc aucun signe n'est associé aux labels du BGS. Une fois la déviation de la valeur mesurée constatée, la propagation de la faute se fait en suivant les arcs du BGS et en attribuant à chaque arc une valeur qualitative associée au label correspondant à la variable d'énergie. Cette propagation démarre par l'arc qui impose le flux lorsque le noeud d'observation x_D est connecté à une jonction $x_{Ce} \in J_1$ et par l'arc qui impose l'effort lorsque le noeud d'observation x_D est connecté à une jonction $x_{Ce} \in J_0$ comme le montre la figure 3.3. Ensuite, la propagation se poursuit en fonction de la nature des éléments du graphe et en fonction d'une analyse qualitative causale jusqu'à aboutir à un conflit pouvant impliquer les éléments à l'origine du défaut tout en étudiant la cohérence avec les valeurs qualitatives associées à l'énergie échangée. C'est ainsi qu'une observation ou une cascade d'observations permettrait moyennant le BGS de définir un ensemble de fautes candidates et c'est ce qu'on verra dans le prochain chapitre. Ces fautes candidates seront retenues ou pas en fonction des résultats obtenus par l'évaluation des indicateurs de fautes générés à partir de l'analyse structurale faite sur le BG.

3.2.2 Construction du BGS

L'algorithme de construction du BGS à partir du BG est réalisé selon les étapes suivantes :

1. Construire le BG à partir du système physique considéré. La procédure est décrite dans [OULD-BOUAMAMA, 2006].
2. Garder tous les éléments BG et remplacer chaque bond par un ou deux arcs de telle façon que les propriétés 1 à 5 soient vérifiées.
3. Représenter les noeuds d'observation x_D par un rectangle et les noeuds restants par des cercles.

L'algorithme qui permet de générer le BGS à partir du BG est donné en annexe. Il reçoit en entrée le bond graph $BG(X, B)$ où $BG.X$ et $BG.B$ correspondent respectivement à l'ensemble des éléments BG et à l'ensemble des bonds du BG. L'algorithme retourne le bond graph signé $BGS(X, A)$ où $BGS.X$ et $BGS.A$ correspondent respectivement à l'ensemble des noeuds du BGS et à l'ensemble des arcs. Les ensembles de noeuds équivalents $BG.X$ et $BGS.X$ sont divisés comme suit $BGS.X = BG.X = X_S \cup X_{Co} \cup X_{Tr} \cup X_{Ce} \cup X_D$ avec $X_S = Se \cup Sf \cup MSe \cup MSf$, $X_{Co} = R \cup C \cup I$, $X_{Tr} = TF \cup GY$, $X_{Ce} = J_0 \cup J_1$.

Chaque élément $b \in BG.B$ est défini par $b = (x_i, x_j, c)$ où $b.x_i$ correspond à l'élément origine du bond, $b.x_j$ correspond à l'élément destination du bond, et $b.c = i$ si le trait causal est placé au niveau de x_i , $b.c = j$ si le trait causal est placé au niveau de x_j . Chaque élément $a \in BGS.A$ est défini par $a = (x_i, l_{ij}, s_{ij}, x_j)$ (voir définition 2). Ainsi, l'algorithme correspondant aux deux premières propriétés est donné ci dessous :

Algo. 1 : Construire le BGS à partir du BG

Entrée : $BG(X, B)$
 $BGS.X \leftarrow BG.X$, $BGS.A \leftarrow \{\}$
pour tout $BG.b$ tel que $b.x_i \in Se \cup MSe$ **faire**
 créer $a = (b.x_i, e, +, b.x_j)$
 $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$
fin pour
pour tout $BG.b$ tel que $b.x_i \in Sf \cup MSf$ **faire**

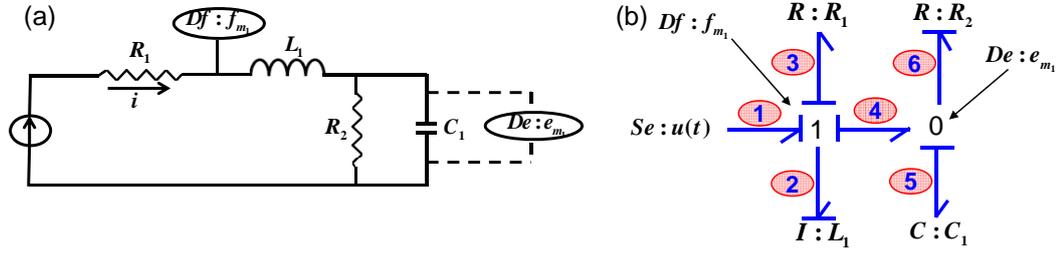


FIGURE 3.4 – Système électrique (a) le modèle bond graph correspondant en causalité intégrale(b)

```

    créer  $a = (b.x_i, f, +, b.x_j)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$ 
  fin pour
  pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_i \in De$  faire
    créer  $a = (b.x_j, e_m, \phi, b.x_i)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$ 
  fin pour
  pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_i \in Df$  faire
    créer  $a = (b.x_j, f_m, \phi, b.x_i)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$ 
  fin pour
  Retourner  $BGS(X, A)$ 

```

Exemple 1. Soit le schéma électrique de la figure (Fig.3.4a). Dans ce schéma, les tensions électriques (variables d'effort) aux bornes des éléments R, L et C sont différentes et le courant (variable de flux), à travers ces mêmes éléments, est le même. Le bond graph correspondant est donné par la figure 3.4b. La jonction-1 traduit la conservation du courant électrique et indique que la somme des tensions est nulle. La jonction-0 traduit la conservation de la tension électrique et indique que la somme des courants est nulle. Le BGS est directement déduit à partir du modèle BG en suivant les étapes présentées sur la figure 3.5.

Ces étapes sont comme suit :

1. tous les éléments BG sont transformés en noeuds du BGS et les bonds associés à ces éléments sont progressivement remplacés.

2. La propriété 1 est utilisée pour connecter le noeud Se au noeud Ce_1 .
3. La propriété 5 est utilisée, pour connecter le noeud L_1 au noeud Ce_1 et le noeud Ce_1 au noeud Ce_2 .
4. La propriété 4 est utilisée, pour connecter le noeud R_1 au noeud Ce_1 , le noeud Ce_1 au noeud Ce_2 et le noeud R_2 au noeud Ce_2 .

Le modèle basé sur la représentation d'état pour un système d'ordre n , nécessite n équations du premier ordre, $\dot{x} = f(x, u)$ où x représente un vecteur d'état d'ordre $n \times 1$ et u le vecteur des entrées. Le nombre des éléments dynamiques dans le BGS correspond à l'ordre du système. Ainsi, pour l'exemple de la figure 3.4a, l'ordre est égal à 2 (éléments I et C), les équations différentielles décrivant le comportement du système sont comme suit :

$$\dot{\phi}_I = u(t) - \frac{q_c}{C_1} - \frac{R_1}{L_1} \cdot \phi_I \quad (3.1)$$

$$\dot{q}_c = \frac{1}{L_1} \cdot \phi_I - \frac{1}{R_2 \cdot C_1} \cdot q_c \quad (3.2)$$

A partir du BGS, on déduit directement que :

$\Phi_I = \int e_2 dt$ et $q_c = \int f_5 dt$ représentent les variables d'état du système. Ces variables d'état correspondent aux variables d'énergie associées aux éléments I et C sur le modèle BGS. La variable d'entrée connue $u(t)$ correspond à la tension aux bornes de la source de tension et les éléments R_1 , L_1 , R_2 et C_1 correspondent aux composants du système. De plus, nous déduisons directement à partir du modèle BGS que le système est surveillable en appliquant la propriété 6 comme le montre la figure 3.6.

Exemple 2. Soit le système hydraulique de la figure 3.7. Ce système est composé d'un réservoir de section A alimenté par un débit d'entrée Q_{in} . On désigne par P_R et Q_{out} respectivement la pression au fond du réservoir et le débit de sortie. Ces deux paramètres sont respectivement mesurés moyennant les deux capteurs P_{R_m} et Q_{out_m} . L'eau présente dans le réservoir coule à l'extérieur lorsque la vanne est ouverte. Celle-ci est représentée par le coefficient de perte de charge R_v .

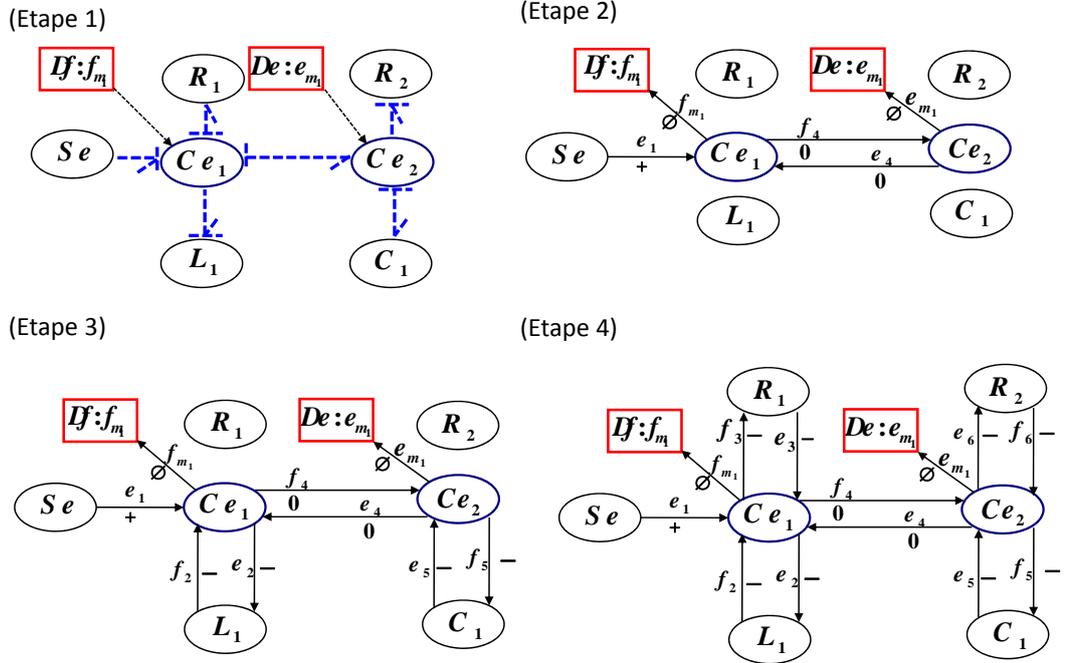


FIGURE 3.5 – Etapes de construction du BGS

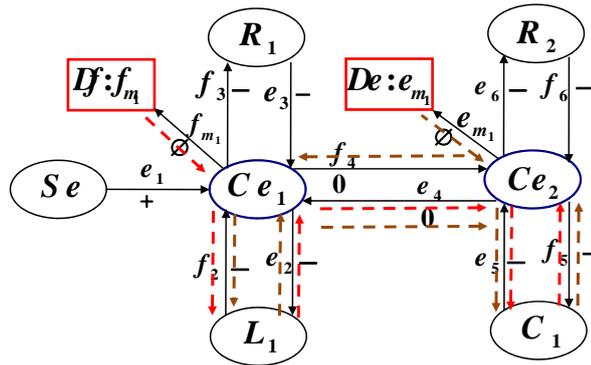


FIGURE 3.6 – Parcours d’atteignabilité des éléments dynamiques à partir des détecteurs

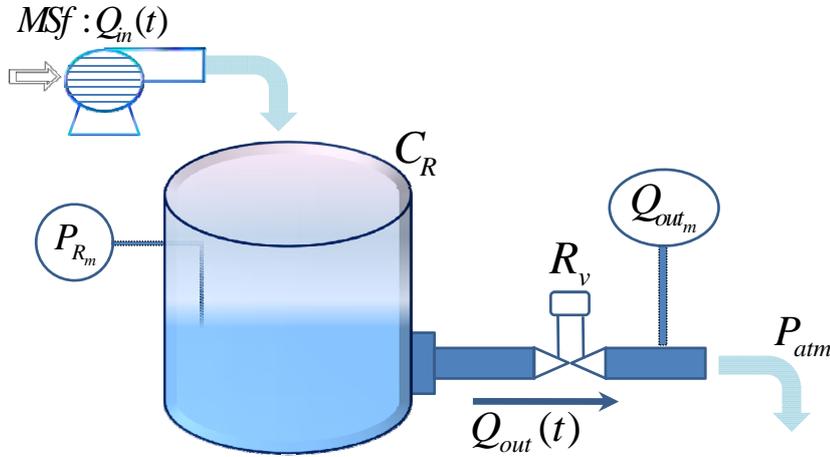


FIGURE 3.7 – Système hydraulique

Le modèle Bond Graph ainsi que le BGS correspondant sont donnés respectivement par les figures 3.8(a) et 3.8(b). Sur cet exemple d'illustration, le réservoir est représenté par l'élément $C : C_R$. La pompe est représentée par une source de flux $MSf : Q_{in}(t)$. La vanne est modélisée par un élément résistif R dont le coefficient correspond à celui de la perte de charge R_v . L'environnement externe est représenté par une source d'effort correspondant à la pression atmosphérique. Le système dispose de deux capteurs permettant de mesurer la pression dans le réservoir et le débit de sortie. Ces deux capteurs sont représentés resp. par le détecteur d'effort $De : P_{R_m}$ et par le détecteur de flux $Df : Q_{out_m}$. Le BGS est directement déduit du BG comme nous l'avons expliqué sur l'exemple précédent. L'ordre du système est égal à 1 (élément C) et la variable d'état correspond à la variable V tel que $\dot{V} = Q_{in} - Q_{out} = f_2$.

Les variables d'entrée du système sont données par les sources d'effort et de flux, ainsi :

$$u = [Q_{in}, P_{atm}] \quad (3.3)$$

Les sorties sont données par les valeurs mesurées par les détecteurs d'effort et de flux, ainsi :

$$y = [P_{R_m}, Q_{out_m}] \quad (3.4)$$

Pour la détermination de l'équation d'état, on déduit les relations constitutives des jonctions sur le BG de la figure 3.8(a) comme suit :

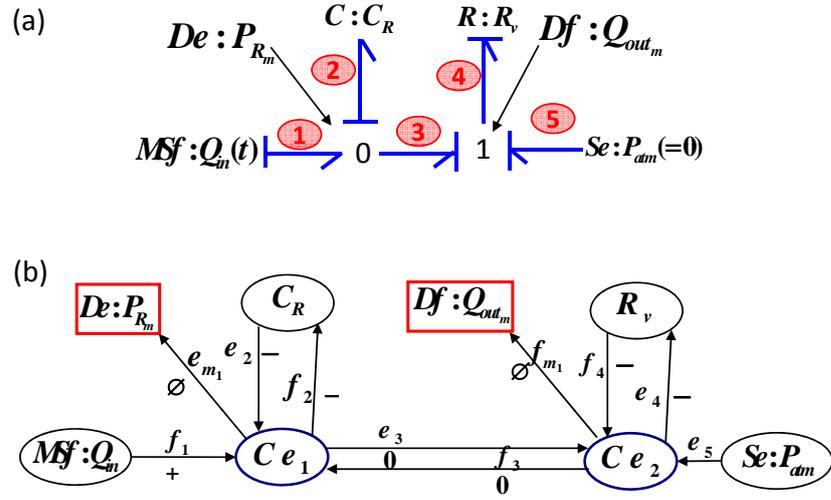


FIGURE 3.8 – (a) Bond Graph du système hydraulique, (b) BGS correspondant.

$$\begin{aligned} J_0 : f_2 = f_1 - f_3 &\Rightarrow \dot{V} = Q_{in} - f_3 \\ J_1 : e_4 = e_3 \quad (\text{car } e_5 = 0) \end{aligned} \quad (3.5)$$

D'autre part, les équations constitutives des éléments C et R sont comme suit :

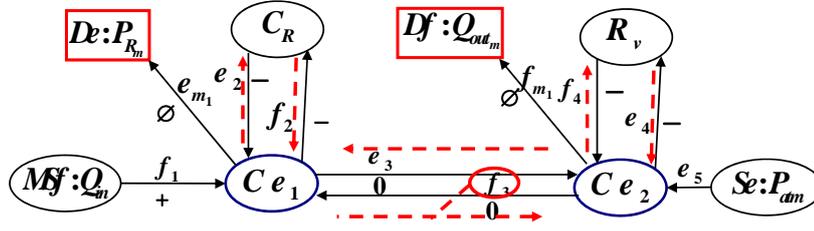
$$\begin{aligned} e_2 &= \frac{1}{C_R} \int f_2 dt \\ f_4 &= \phi_{R_v}(e_4) \end{aligned} \quad (3.6)$$

L'équation 3.5 contient une variable inconnue f_3 qui peut être éliminée en suivant le parcours du BGS décrit sur la figure 3.9. En effet, le parcours consiste à démarrer de la variable inconnue et parcourir le BGS dans le sens opposé des flèches jusqu'à revenir à la même variable et en substituant à chaque fois la variable par les équations relatives aux éléments parcourus, ainsi :

$$f_3 = f_4 = \phi_{R_v}(e_4) = \phi_{R_v}(e_3) = \phi_{R_v}(e_2) = \frac{1}{C_R} \phi_{R_v} \left(\int f_2 dt \right). \quad (3.7)$$

Et vu que $\dot{V} = Q_R = f_2$, nous avons :

$$f_3 = \frac{1}{C_R} \phi_{R_v}(V) \quad (3.8)$$

FIGURE 3.9 – Elimination de la variable inconnue f_3 en parcourant le BGS

Ainsi l'équation d'état est la suivante :

$$\dot{V} = Q_{in}(t) - \frac{1}{C_R} \phi_{R_v}(V) \quad (3.9)$$

A partir des équations (3.6) et (3.8), les équations de sorties sont données comme suit :

$$\begin{aligned} Q_{out_m} &= \frac{1}{C_R} \phi_{R_v}(V) \\ P_{R_m} &= \frac{1}{C_R} \cdot V \end{aligned} \quad (3.10)$$

Le modèle BGS est conçu dans le but d'être utilisé pour développer un algorithme de diagnostic de fautes simples et multiples moyennant un raisonnement à la fois qualitatif et quantitatif. Le résultat de ce diagnostic est fourni en termes de composants dont le défaut peut être détecté et isolé. Néanmoins, comme on l'a précisé auparavant, les éléments du BGS peuvent correspondre à des éléments physiques constituant le système étudié ou à des phénomènes physiques influant le comportement de ce dernier. Par exemple, un élément R peut représenter une résistance électrique, une vanne ou une force de frottement. Ainsi, il nous paraît judicieux de pouvoir associer les éléments du BGS à des fonctions caractéristiques du système et à des services dont la disponibilité permettra de définir à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel se trouve le système. Pour y parvenir, nous enrichissons le BGS par un modèle générique de composants qui ajoute la composante fonctionnelle au modèle de comportement qu'est le BGS.

3.3 Modèle Générique de Composant (MGC)

Le MGC décrit les composants du point de vue de l'utilisateur, qui émet des requêtes de services et qui peut les utiliser dans différents modes de fonctionnement. Les interconnexions sont prises en compte en définissant des composants de haut niveau comme l'agrégation de composants de bas niveau. Nous rappelons dans ce qui suit, quelques notions élémentaires puis donnons une définition plus formelle du MGC avant de montrer comment ce dernier permet de décrire n'importe quel composant quel que soit son niveau de décomposition hiérarchique [CHATTI, 2013].

3.3.1 Modèle externe d'un service

D'un point de vue externe, un composant du système fournit un ou plusieurs services. Un service est décrit par les variables qu'il consomme *cons*, les variables qu'il produit *prod* et une procédure *proc* qui transforme les variables consommées en variables produites. Cette procédure peut correspondre à une loi physique imposée par le composant. Les services sont fournis en permanence (sans condition) ou sur réception d'une requête *rqst*. Prenons l'exemple de la figure 3.7, le service de stockage rendu par le réservoir consomme en entrée les débits de la source qui l'alimente (Q_{in}) et de la sortie qu'il génère (Q_{out}), et produit une variation de volume (ΔV) selon la loi physique $\Delta V = (Q_{in} - Q_{out})$. Le service de régulation associé à un régulateur, consomme quant à lui des grandeurs capteurs et produit des signaux pour les actionneurs selon un algorithme spécifique. La réalisation d'un service repose ainsi sur des ressources matérielles et logicielles *res* (par exemple un réservoir sans fuite pour le service de stockage ou des signaux capteurs non bruités pour le service de régulation). De manière à ne pas interrompre la réalisation d'un service lorsque des ressources matérielles sont indisponibles ou que les entrées ne sont pas présentes ou présentes avec une qualité insuffisante (signal bruité), la notion de versions est introduite.

Un service est alors défini par une liste ordonnée de versions. Chaque version partage la même requête et produit les mêmes sorties. Les entrées qu'elle consomme, les ressources qu'elle utilise et la procédure sur laquelle elle repose, sont néanmoins différentes.

A un instant donné, le service est rendu selon la première version de la liste ordonnée dans laquelle toutes les ressources et entrées sont disponibles. L'existence de ces multiples versions permet d'augmenter la tolérance aux fautes du composant [GEHIN, 2008].

3.3.2 Notion de mode de fonctionnement (MdF)

Un service peut a priori être demandé à n'importe quel instant. Néanmoins, pour des raisons de sécurité, un composant ne doit pas pouvoir exécuter de services incompatibles (un service d'initialisation d'une consigne ne doit pas, par exemple, être exécuté en même temps qu'un service de régulation). C'est pourquoi, tout comme une application informatique est décomposée en menus cohérents, l'ensemble des services d'un composant est structuré en modes de fonctionnement, associés à des objectifs précis. Les modes maintenance, configuration, mesure automatique, etc. sont des exemples de modes de fonctionnement pour un capteur. A chaque instant, le composant est dans un MdF donné et les seuls services qu'il puisse exécuter sont ceux qui appartiennent à ce MdF. En ajoutant à la liste des MdF, les conditions de passage d'un mode vers un autre, on obtient le graphe de gestion des modes de fonctionnement.

Ces conditions de passage font apparaître des événements liés aux souhaits des utilisateurs (passage en mode automatique, en mode maintenance) et des événements subis, liés à la disponibilité des services. Un MdF peut devenir inaccessible suite à l'apparition de défaillances matérielles. Le graphe de gestion des modes de fonctionnement correspondant au système hydraulique de la figure 3.7 est donné par la figure 3.10. Il fait apparaître trois modes (Arrêt, Produire, Vidanger) regroupant chacun plusieurs services. Certaines transitions émanent de l'utilisateur (par exemple "début de production"), d'autres sont subies (par exemple "fuite").

3.3.3 Définition formelle d'un MGC

Définition 3 (Modèle Générique de Composants) Le modèle générique d'un composant est défini par :

- 1) Un automate déterministe $A(M, \tau, m^0)$ où :
 - $M = \{m_i, i \in I_m\}$ est un ensemble de *modes de fonctionnement*.

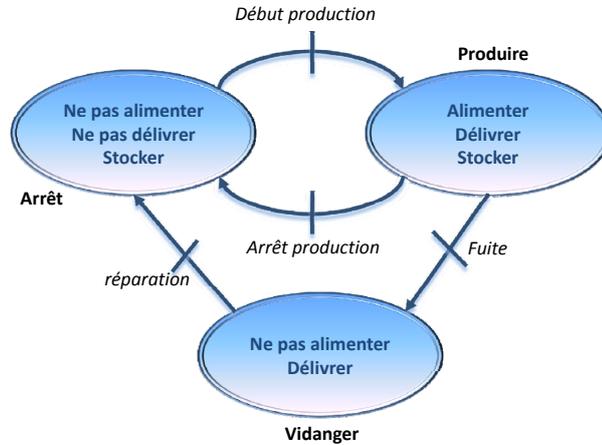


FIGURE 3.10 – Gestion des modes de fonctionnement du système hydraulique

Chacun d'eux correspond à un état de l'automate, I_m est l'ensemble des indices i ,

- $\tau = \{\tau_{ij}, i, j \in I_m\}$ est un ensemble de transitions. Chacune d'elles est définie par $\tau_{ij} = \{m_i, m_j, c_{ij}\}$ où m_i est le mode d'origine, m_j est le mode de destination et c_{ij} est la condition de transition,
- $m^0 \in M$ est le mode initial, c'est-à-dire le mode dans lequel se trouve le système au démarrage.

2) Un ensemble de services $S = \{s_l, l \in I_s\}$ (I_s est l'ensemble des indices l), chacun d'eux est un ensemble de versions pré-ordonnées. $s_l = \{s_l^j, j \in J(s_l)\}$ ($J(s_l)$ est l'ensemble des indices j), chaque version est un quintuplés $s_l^j = \langle cons_l^j, prod_l, proc_l^j, rqst_l, res_l^j \rangle$.

3) Les MdF et les services sont reliés de la façon suivante :

- chaque MdF est associé à un sous-ensemble de services $S_i, i \in I_m$, avec $\cup_{i \in I_m} S_i = S$
- Chaque MdF est associé à un ou plusieurs objectifs à réaliser.

3.3.4 Agrégation des MGC

Un système est formé d'un ensemble de composants interconnectés. En effet, les services fournis par certains composants consomment des variables qui sont produites par les services d'autres composants. Par exemple, la valeur produite par le service *mesure* d'un capteur de niveau est consommée par le service *régulation* d'un contrôleur, qui à son tour produit des variables qui sont consommées par le service *modulation de puissance* de l'actionneur.

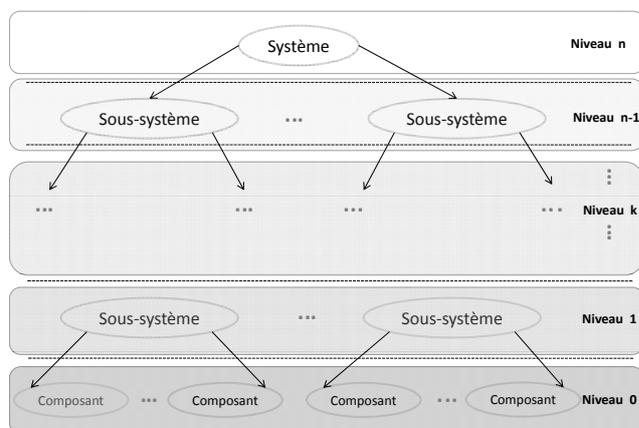


FIGURE 3.11 – Décomposition pyramidale d'un système.

Dans le MGC, les interconnexions sont prises en compte en définissant des composants de niveau supérieur comme l'agrégation de composants de niveaux inférieurs (voir Fig 3.11). Les capteurs, les actionneurs, etc. sont les composants de la couche la plus basse correspondant aux *services élémentaires*. Le plus haut niveau d'agrégation correspond au système global et à ses objectifs.

Soient $S(a)$ et $S(b)$ les services offerts par deux composants a et b et soit c le composant qui les regroupe. Soit $\gamma = (\alpha, \beta)$ un mode cohérent, alors toute combinaison de services $S_\alpha(a)$ (associée au mode α du composant a) et $S_\beta(b)$ (associée au mode β du composant b) peut être utilisée pour générer des services fournis par le composant c . Les combinaisons qui n'ont pas d'interprétation fonctionnelle par rapport à l'application sont rejetées. Par contre, les combinaisons qui ont les mêmes interprétations fonctionnelles correspondent à différentes versions d'un même service. Ceci permet de définir, toutes les manières de réaliser un même objectif. Ces dernières peuvent être représentées par un arbre ET/OU comme montré sur la Fig. 3.12. Cet arbre fait apparaître deux types de nœuds, les nœuds *service* et les nœuds *version*. Les successeurs d'un nœud *version* (resp. d'un nœud *service*) sont des nœuds *service* (resp. nœuds *versions*). Cela permet d'exprimer qu'une version (de niveau supérieur) utilise un ensemble de services (de niveau inférieur) et qu'un service peut être réalisé selon plusieurs versions. Les feuilles de l'arbre correspondent aux services élémentaires. Les défauts (resp. opérations de réparation) suppriment (resp. restaurent) des arcs dans le graphe.

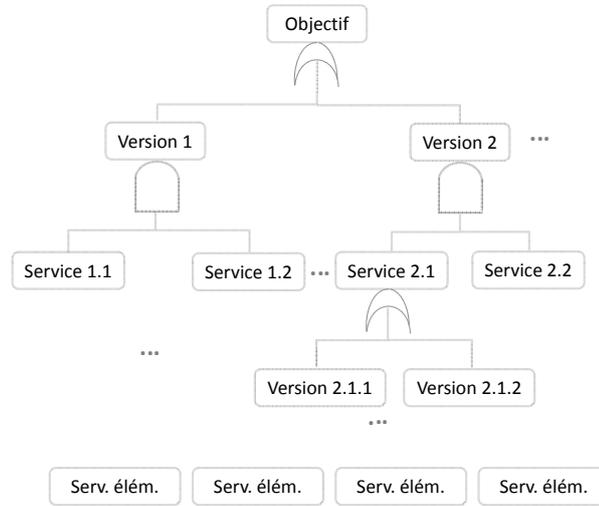


FIGURE 3.12 – Arbre ET/OU.

L'ensemble des arbres ET/OU est mis à jour à chaque apparition de défaut ou après chaque opération de réparation permettant ainsi aux opérateurs de connaître exactement ce qu'ils peuvent obtenir du système.

3.3.5 Modèle interne d'un service

L'approche BGS permet de décrire la procédure associée à chaque service. Elle ajoute la composante comportementale à l'approche fonctionnelle.

Les éléments bond graph $Se \cup Sf \cup \{I\} \cup \{C\} \cup \{R\} \cup \{TF\} \cup \{GY\} \cup \{De\} \cup \{Df\}$ correspondent à des services élémentaires du MGC et un service de niveau supérieur est ainsi représenté par un modèle Bond Graph Signé. Trois classes de services élémentaires peuvent être distinguées :

- Les services de mesure : ils sont fournis par les capteurs et correspondent aux détecteurs d'effort (De) et de flux (Df),
- Les services d'action : ils sont réalisés par les actionneurs et correspondent aux sources d'effort (Se) et de flux (Sf),
- Les services de stockage, transformation et transport : ils sont fournis par les éléments du processus (par exemple un réservoir, un amortisseur ...) et correspondent aux éléments C, TF, R et GY du Bond Graph Signé.

Du point de vue fonctionnel, une jonction x_{Ce} est associée à des fonctions de conservation d'énergie. Cette fonction n'est plus disponible si un indicateur de fautes candidat, généré à partir de cette jonction n'est plus cohérent avec l'état réel.

Le BGS apparaît ainsi comme un outil complémentaire du MGC puisqu'il explique comment un service de niveau haut est réalisé à partir d'un ensemble de services de niveaux bas. Il offre une représentation interne des procédures réalisées par les services en expliquant comment les variables consommées par un service sont transformées en variables produites. De même qu'il existe une hiérarchie entre services de différents niveaux, un BGS de niveau supérieur est construit à partir des BGS de niveaux inférieurs. On dispose ainsi d'une représentation complète, intégrant les aspects fonctionnel et comportemental, qui s'avérera comme nous le verrons dans le prochain chapitre, être un outil précieux pour le diagnostic et la supervision des systèmes complexes.

Prenons l'exemple de la figure 3.10, chaque MdF est défini par un ensemble de services (Arrêt, Produire, Vidanger) et chaque service est décrit par un BGS. En effet, sur la figure 3.8(b), le service "alimenter" est traduit par l'entrée $MSf : Q_{in}$. Le service "stocker" est décrit par le même BGS en fonctionnement normal c'est-à-dire en l'absence de défaut au niveau du réservoir C_R . Ainsi, le passage d'un MdF à un autre dépend de la possibilité de détecter et d'isoler un certain nombre de défauts qui engendrent l'indisponibilité des services définis dans le graphe de gestion des MdFs.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit un nouveau formalisme générique le Bond Graph Signé fonctionnel. Ce formalisme de modélisation englobe les aspects de description d'un système que sont les composantes fonctionnelle, comportementale et structurelle.

Les missions à réaliser par le système sont décrites en termes de services rendus par les composants et structurées en modes de fonctionnement. La réalisation d'un service est décrite de façon non ambiguë par un modèle comportemental donné sous la forme d'un BGS. Ce dernier est basé sur la nature de la puissance échangée, sur les variables d'effort et sur les variables de flux associées aux arcs. Concer-

nant les éléments constituant les noeuds du BGS, ils correspondent à des éléments primitifs du BG (par exemple, R, C, I...). Ces éléments peuvent être directement associés (1) aux paramètres de composants physiques constituant le système étudié ou (2) à des phénomènes physiques qui régissent le comportement de ce dernier.

On obtient alors une description " hors ligne " du système à surveiller. Par la suite, les modèles générés sont exploités "en ligne" pour détecter et isoler les défauts par l'intermédiaire d'un raisonnement (qualitatif et quantitatif) basé sur les bond graph signés. Les résultats obtenus permettent de mettre à jour le graphe de gestion des modes de fonctionnement (MdF) et la liste des services disponibles.

Cette description facilite le raisonnement des opérateurs humains. Elle offre une représentation claire des réelles possibilités de conduite d'un système. Le prochain chapitre est donc dédié aux approches de diagnostic basées sur les modèles que nous avons présentés dans ce chapitre et qui exploitent à la fois leurs aspects qualitatifs et quantitatifs.

CHAPITRE 4

Diagnostic de fautes simples et multiples moyennant les raisonnements quantitatif et qualitatif

Sommaire

4.1	Introduction	84
4.2	Diagnostic quantitatif	85
4.2.1	Surveillabilité structurelle à base du BG	85
4.2.2	Génération des RRAs à partir du BG	87
4.2.3	Exemple d'illustration	89
4.3	Diagnostic qualitatif	90
4.3.1	Détermination de fautes candidates à partir du BGS	92
4.3.2	Exemple d'illustration	95
4.4	Mise en oeuvre de l'approche proposée	98
4.4.1	Conception du module de diagnostic hors ligne	98
4.4.2	Exploitation en ligne	98
4.5	Conclusion	100

4.1 Introduction

Le diagnostic des systèmes dynamiques complexes vise à trouver un composant ou un ensemble de composants qui soient en mesure de déterminer la cause des écarts constatés entre le comportement normal (prévu) du système et celui observé.

L'une des solutions classiques qui vise à améliorer la capacité du système de diagnostic à détecter des défauts, consiste à ajouter des capteurs afin d'augmenter le nombre de redondances matérielles (deux capteurs qui mesurent la même grandeur physique doivent produire des mesures équivalentes) [KHEMLICHE, 2006]. Néanmoins, dans de nombreuses applications, l'ajout de capteurs peut être difficile et coûteux à réaliser ou même impossible car il arrive souvent que certaines variables ne soient pas accessibles à la mesure en ligne. Cette méthode (ajout de capteurs) présente ainsi plusieurs limites surtout lorsqu'on émet l'hypothèse que les capteurs, eux-mêmes, peuvent être défaillants ce qui augmente considérablement la complexité du diagnostic.

Pour pallier ces limites, des approches de diagnostic à base de modèles quantitatifs ont été développées. Elles reposent sur l'exploitation des redondances analytiques pouvant être extraites du modèle tout en diminuant le nombre de mesures nécessaires. Ces relations de redondances analytiques sont des contraintes exprimées en termes de variables connues et dérivées d'un sous-système observable et sur-déterminé (le nombre de variables inconnues est inférieur au nombre de relations qui les lient). Les approches de diagnostic quantitatives sont donc tributaires de la disponibilité de modèles qui doivent être à même de décrire les relations entre les différentes variables. Dans ce chapitre, nous présenterons les BG en tant qu'approche quantitative pour la génération d'indicateurs de défauts. Nous exploiterons ensuite les propriétés du BGS pour remonter à l'origine d'un ensemble de défauts constatés à partir des observations.

En effet, le raisonnement qualitatif proposé par les BGS est un raisonnement par abduction. Il permet à partir de l'observation d'un ensemble d'effets de rechercher toutes les causes possibles. Il est adapté

au diagnostic de fautes multiples dans le sens où une défaillance peut s'exprimer par plusieurs effets, ce qui n'est pas réalisable si l'on se base uniquement sur l'analyse des RRAs. Le raisonnement qualitatif à base du BGS peut néanmoins conduire à des conclusions (ensemble de fautes candidates) incertaines, soit parce que les prémisses sont incertaines, soit parce que les connaissances génériques sont faillibles, soit pour les deux raisons à la fois. C'est pour cette raison que la méthode de diagnostic que nous proposons s'attache à bâtir des diagnostics pertinents en recoupant les ensembles de fautes candidates déterminés par un raisonnement qualitatif avec les indicateurs de défauts produits de manière quantitative.

Une fois le diagnostic réalisé et l'ensemble des fautes candidates identifié, la liste des services disponibles et le graphe de gestion des modes de fonctionnement sont mis à jour.

4.2 Diagnostic quantitatif

Les méthodes de diagnostic quantitatif pour les systèmes continus reposent généralement sur la génération de relations de redondances analytiques obtenues à partir des équations du système et des grandeurs mesurées. Chaque relation est conçue pour impliquer un sous-ensemble de variables pouvant déterminer un ou plusieurs défauts possibles. Ces relations produisent également, de façon systématique, des résidus par des méthodes de génération de résidus.

Le modèle BG présente des propriétés structurelles et causales permettant de déterminer de manière efficace, même pour les grands systèmes, les relations de redondances analytiques.

4.2.1 Surveillabilité structurelle à base du BG

L'analyse structurelle repose sur la notion de couplage du graphe biparti. Comme on l'a vu dans le second chapitre, un graphe biparti représente la structure du modèle de comportement du système en combinant un ensemble de sommets et d'arcs. Les sommets sont divisés en deux ensembles à savoir les contraintes $Co = \{co_1, co_2, \dots, co_m\}$ et les variables $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$. Les arcs sont utilisés pour relier les variables aux contraintes correspondantes. Les variables qui ap-

paraissent dans les contraintes qui peuvent être quantitatives, qualitatives, floues ... sont réparties comme suit :

$$Z = X \cup K$$

où X est le sous-ensemble des variables inconnues et K est le sous-ensemble des variables connues. Ce dernier se compose des variables de commande (variables d'entrées) U et des variables mesurées Y (variables de sortie).

Dans les approches classiques, un ensemble d'équations obtenues à partir du modèle comportemental du système est utilisé pour déduire le graphe biparti [BLANKE, 2006]. Dans notre cas, le graphe biparti est directement déduit du modèle BG. Ce modèle englobe quatre types d'informations permettant de déduire directement l'ensemble des contraintes : l'information liée à la structure Co_s , au comportement Co_b , à la mesure Co_m et à la commande C_c du système :

$$Co = Co_s \cup Co_b \cup Co_m \cup Co_c$$

Les équations de structure Co_s représentent les lois de conservation d'énergie et sont déduites à partir des équations des jonctions, des transformateurs et des gyrateurs. Les contraintes Co_b décrivent les phénomènes physiques régissant le comportement des éléments bond graph (R , C et I). Les contraintes de mesures Co_m expriment la manière dont les capteurs transforment certaines variables d'état du système en signaux de sortie qui peuvent être utilisés pour des fins de diagnostic et de commande.

Les variables inconnues appartenant à X sont les variables d'énergie :

$$X = \{e_i, f_i\} \quad (i = 1, n),$$

où n est le nombre des éléments BG. Les variables connues appartenant à K sont représentées par les détecteurs d'effort (De) (resp. de flux (Df)), par les sources d'effort (Se) (resp. de flux (Sf)), par les sources modulées d'effort (MSe) (resp. de flux (MSf)) et les entrées (u).

$$K = \{Df\} \cup \{De\} \cup \{Sf\} \cup \{MSf\} \cup \{Se\} \cup \{MSe\} \cup \{u\}$$

Des contraintes supplémentaires peuvent être ajoutées lorsque le modèle est en causalité dérivée. Ces contraintes correspondent à des relations analytiques entre les variables du système. Chaque système

peut être divisé en un sous-système sur-déterminé (redondant et observable), un sous-système sous-déterminé (non redondant et non observables) et un sous-système juste-déterminé. Il est prouvé que le seul sous-système surveillable est le sous-système sur-déterminé [BLANKE, 2006].

4.2.2 Génération des RRAs à partir du BG

Dans la modélisation par BGs, la procédure de génération des RRAs se base sur les propriétés causales du BG et sur l'utilisation de la théorie d'élimination des variables inconnues. Cette théorie s'appuie sur la propagation graphique de la causalité d'un élément BG à un autre (en allant des variables inconnues vers celles connues) moyennant les contraintes structurelles des jonctions.

Les relations entre les variables du système peuvent être aisément déterminées graphiquement à l'aide des BG et elles peuvent être définies sous un format symbolique moyennant un logiciel de calcul adéquat [OULD-BOUAMAMA, 2006]. De plus, les techniques d'analyse de graphes permettent d'identifier, sur le BG, des sous-graphes observables dans lesquels tous les noeuds extrêmes sont soit des actionneurs (entrées), soit des détecteurs (sorties). Ces noeuds extrêmes sont reliés par une contrainte dont la structure est donnée par les arcs formant le sous-graphe correspondant. Cette contrainte, lorsqu'elle est disponible sous forme d'équation (i.e. symboliquement résoluble), conduit à une relation de redondance analytique évaluée sous forme de résidu. Chaque résidu peut être réécrit sous la forme $r - f(D_e, D_f, S_e, S_f, MS_e, MS_f, \theta_m) = 0$ où $\{D_e, D_f, S_e, S_f, MS_e, MS_f, \theta_m\}$ est un ensemble de variables connues. Par la suite, une matrice de signature de défauts peut être obtenue à partir des résidus représentant les lignes de la matrice et des défauts représentant les colonnes de la matrice. Cette matrice booléenne vise à évaluer les possibilités du système de diagnostic à détecter et à isoler les défauts. Les résidus générés doivent être évalués pour déterminer la présence des défauts. Cette évaluation est faite par l'utilisation de seuils fixes ou adaptatifs pour éviter les fausses alarmes. Un élément booléen a_{ij} de la matrice est égal à 1 si le défaut de la j^{me} colonne influence le i^{me} résidu, sinon, l'élément correspondant de la matrice prend la valeur 0.

L'évaluation en-ligne des résidus conduit à la formulation d'un vecteur de cohérence binaire (appelé signature de faute) $C = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n)$ dont les éléments c_i ($i = 1, \dots, n$) sont déterminés à partir

d'une procédure de décision φ permettant de générer les conditions de déclenchement des alarmes. Une simple procédure de décision peut être utilisée, par exemple, $C = \varphi(r_1, r_2 \dots, r_n)$ dans laquelle chaque résidu r_i est testé par rapport à un seuil ε fixé en fonction des incertitudes des paramètres, des bruits capteurs, etc [DJEZIRI, 2007] [TOUATI, 2012]. Cette procédure de décision consiste à donner au seuil ε une valeur qui soit égale au double de la déviation standard σ du résidu en fonctionnement normal : ($\varepsilon = \pm 2\sigma$). Dans le cas du diagnostic de fautes simples (non combinées), nous pouvons localiser les défauts en évaluant les différents résidus et en les comparant aux seuils définis en amont. Ainsi un défaut est isolable si et seulement si sa signature est unique c'est-à-dire qu'elle est différente des autres signatures.

Intéressons nous maintenant à l'algorithme proposé pour la génération des RRAs à partir du BG [DJEZIRI, 2007] ou encore plus simplement avec l'utilisation du BGS. Cet algorithme est basé sur les étapes suivantes :

- Construire le BGS en respectant les étapes décrites dans le chapitre précédent. Le nombre de RRAs pouvant être déduites à partir du graphe correspond au nombre de noeuds d'observation x_D car on suppose que chaque jonction est connectée au moins à un noeud d'observation.
- Utiliser les contraintes structurelles liées aux jonctions 0 et 1 et aux éléments TF et GY pour déterminer la structure des RRAs. Utiliser les contraintes comportementales associés aux éléments R , C et I pour exprimer les relations entre variables de flux et variables d'énergie.
- Eliminer les variables inconnues à partir du BGS en suivant les chemins menant de la variable inconnue vers une variable connue. Concernant le cas où plusieurs noeuds d'observations $x_D \in X_D$ sont connectés à un même noeud x_{Ce} , la RRA déduite est une relation de redondance matérielle correspondant à l'écart entre les mesures d'une même grandeur physique, fournie par deux capteurs différents. Ceci se traduit par les $(n - 1)$ RRAs suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} RRA_1 : f_{m_1} - f_{m_2} = 0 \\ RRA_2 : f_{m_1} - f_{m_3} = 0 \\ \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ RRA_n : f_{m_1} - f_{m_n} = 0 \end{array} \right.$$

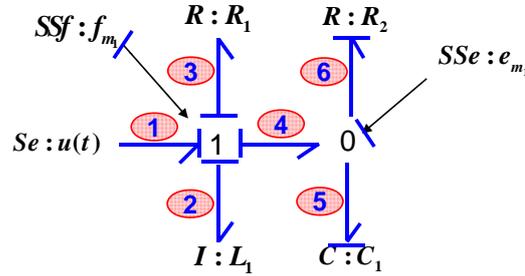


FIGURE 4.1 – Bond Graph en causalité dérivée de l'exemple électrique

avec n le nombre de noeuds d'observation x_D connectés à une même jonction.

4.2.3 Exemple d'illustration

Prenons l'exemple du système électrique de la figure 3.4(a). A partir du modèle BG de la figure 4.1, on déduit les contraintes structurelles suivantes :

$$\begin{cases} \text{jonction 1 :} & e_1 - e_2 - e_3 - e_4 = 0 \\ \text{jonction 0 :} & f_4 - f_5 - f_6 = 0 \end{cases}$$

Les contraintes comportementales associées aux éléments BG sont comme suit :

$$\begin{cases} R_1 : & e_3 = R_1 \times f_3 \\ L_1 : & e_2 = L_1 \frac{df_2}{dt} \\ R_2 : & f_6 = \frac{e_6}{R_2} \\ C_1 : & f_5 = C_1 \frac{de_5}{dt} \end{cases}$$

Les RRAs candidates issues de ce modèle sont déterminées à partir des équations de jonctions 0 et 1. En ce qui concerne la *jonction* – 1 les variables inconnues sont respectivement e_1 , e_2 , e_3 et e_4 . L'élimination de ces variables inconnues se fait directement sur le BGS comme le montre la figure 4.2(a). En ce qui concerne la *jonction* – 0, les variables inconnues sont respectivement f_4 , f_5 et f_6 . L'élimination de ces variables inconnues se fait directement sur le BGS comme le montre

la figure 4.2(b).

Ainsi deux RRAs sont déduites :

$$\begin{cases} RRA_1 : & u - L_1 \frac{df_{m_1}}{dt} - R_1 f_{m_1} - e_{m_1} = 0 \\ RRA_2 : & f_{m_1} - C_1 \frac{de_{m_1}}{dt} - \frac{e_{m_1}}{R_2} = 0 \end{cases}$$

Les résidus (indicateurs de fautes) correspondants sont comme suit :

$$\begin{cases} r_1 = u - L_1 \frac{df_{m_1}}{dt} - R_1 f_{m_1} - e_{m_1} \\ r_2 = f_{m_1} - C_1 \frac{de_{m_1}}{dt} - \frac{e_{m_1}}{R_2} \end{cases}$$

Le premier résidu r_1 est sensible aux défauts pouvant affecter les éléments u , R_1 , L_1 ainsi que les capteurs mesurant respectivement e_{m_1} et f_{m_1} . Quand au résidu r_2 , il est sensible aux défauts pouvant affecter les éléments C_1 , R_2 ainsi que les capteurs mesurant respectivement e_{m_1} et f_{m_1} .

4.3 Diagnostic qualitatif

Les techniques de modélisation qualitative pour des fins de diagnostic reposent souvent sur des modèles relativement simples pouvant décrire les comportements des systèmes à étudier. Cependant, ces techniques peuvent conduire à des prédictions incompatibles ou physiquement impossibles. C'est pour cette raison qu'on a développé le BGS dont les propriétés permettent de décrire les déviations qualitatives des variables énergétiques et la propagation de ces déviations sur ce graphe afin de générer un ensemble de fautes candidates en fonction des conflits détectés. De plus, comme nous l'avons montré dans le précédent chapitre, le BGS est déduit directement du BG ce qui permet d'utiliser les résultats du diagnostic quantitatif basés sur ce dernier pour affiner l'ensemble des fautes candidates et vérifier la consistance des résultats obtenus par l'approche qualitative basée sur le BGS. Cette étude de consistance est devenue possible du fait que les résultats, à la fois issus du diagnostic quantitatif que qualitatif, émanent d'un même modèle, le BG.

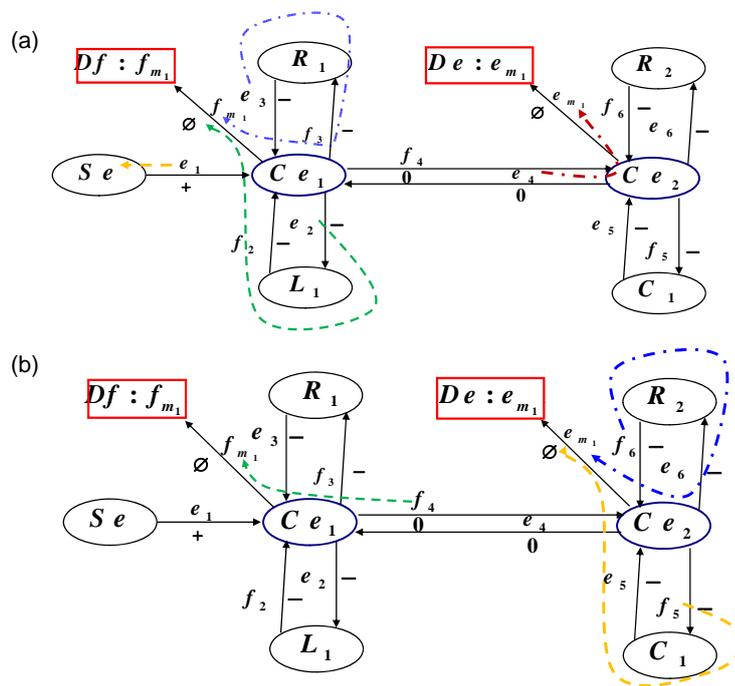


FIGURE 4.2 – (a) Elimination des variables inconnues de la *jonction* - 1 à partir du BGS (b) Elimination des variables inconnues de la *jonction* - 0 à partir du BGS.

4.3.1 Détermination de fautes candidates à partir du BGS

Considérons un sous-ensemble obs de l'ensemble des observations OBS du système à surveiller. Pour toute observation $obs \subset OBS$ du système à un instant donné, le modèle BGS permet de déterminer qualitativement à partir de la déviation de cette mesure (cette déviation étant déterminée en fonction des seuils établis pour le fonctionnement normal du système), les directions de déviations sur le graphe ainsi que les noeuds parcourus. L'utilisation du raisonnement qualitatif à base du BGS se fonde sur la propagation de l'observation obs à travers les arcs signés et labelés et en suivant des chemins consistants. Les noeuds appartenant à ces chemins représentent l'ensemble des éléments $\Delta \subset COMPS$ formant les conflits minimaux.

Définition 1 : Un conflit est un ensemble d'éléments $x_i \in X$ tel que si l'un deux a un comportement anormal, il crée une incohérence. Les conflits minimaux sont par conséquent les plus petites conjonctions d'éléments défailants expliquant toutes les fautes plausibles en fonction des observations disponibles.

Définition 2 : La propagation de la faute sur le BGS dépend d'une fonction $\Gamma : \{l_i\} \in \{+, 0, -\}$ qui associe à chaque label l_i une valeur qualitative dépendant de la valeur observée à partir de chaque noeud d'observation x_{D_i} . Ainsi, $\Gamma(l_i)$ est la valeur qualitative attribuée à chaque label l_i , $i \in \mathbb{N}^*$ i.e.

$$\Gamma(l_i) = 0 \text{ si } |l_i - l_{in}| < \varepsilon l_i$$

$$\Gamma(l_i) = + \text{ si } l_i - l_{in} \geq \varepsilon l_i$$

$$\Gamma(l_i) = - \text{ si } l_{in} - l_i \geq \varepsilon l_i$$

où εl_i est un seuil fixé et correspondant à la plage de fonctionnement normal et l_{in} est la valeur nominale.

La propagation de la faute par chaînage arrière démarre au niveau des noeuds $x_D \in X$. Tout d'abord, l'arc connectant le noeud d'observation à un élément central est traversé et une valeur qualitative est associée au label de cet arc en fonction de la nature de la déviation constatée. Cette valeur qualitative se propage, par la suite, au niveau de l'arc qui impose le flux (resp. l'effort) en fonction de la nature du noeud x_D . Pour $x_D \in De$ (resp. $x_D \in Df$), c'est l'arc qui impose l'effort (resp. le flux) qui est traversé en premier. Concernant les éléments pour lesquelles la variation de la variable d'énergie ne peut pas être prédite, les différentes possibilités d'évolution sont

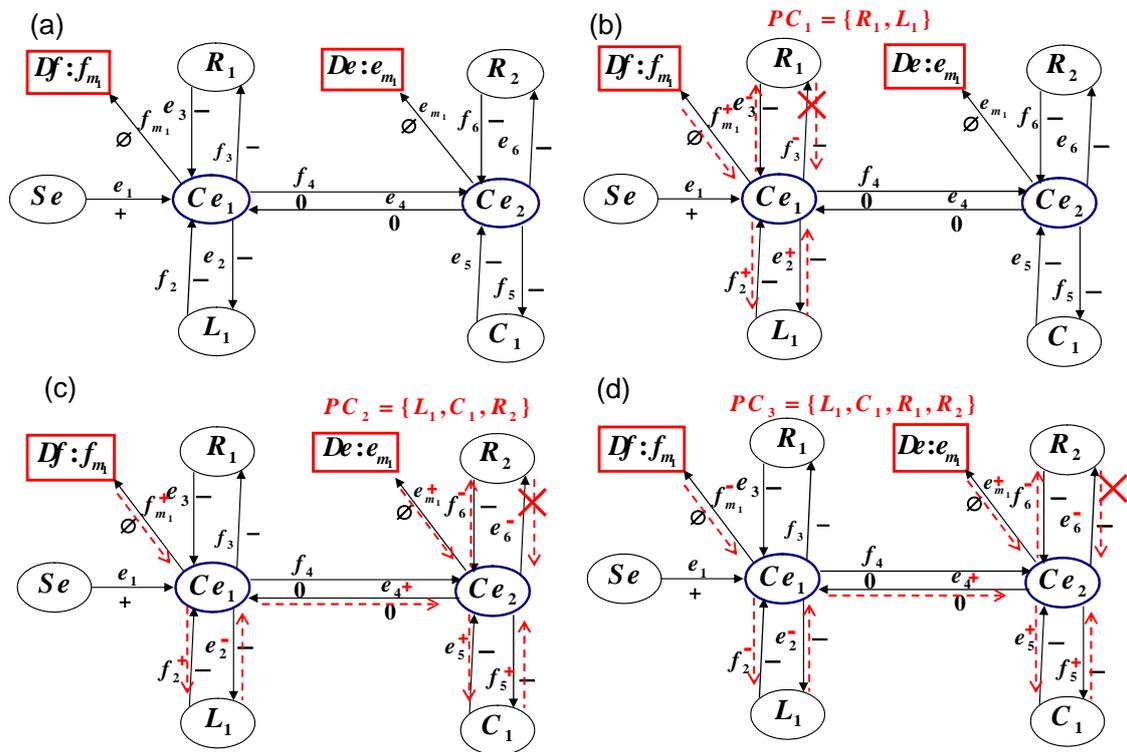


FIGURE 4.3 – Conflits possibles basés sur la consistance et générés à partir du modèle BGS du système électrique

prises en compte et ces éléments sont considérés en tant que fautes candidates. La propagation se poursuit jusqu'à ce qu'un conflit soit détecté. Dans ce cas là, l'ensemble des fautes candidates correspond à l'ensemble des noeuds parcourus. Lorsqu'une prédiction ne présente pas de conflits et que les différents arcs sont parcourus, la propagation redémarre avec le même principe à partir du prochain noeud x_D et le noeud/les noeuds précédents sont supprimés de la liste des noeuds à considérer. Cette procédure est illustrée par l'algorithme ci dessous :

Algo. 2 : Diagnostic qualitatif à base de BGS

Initialisation :

$Ch_{ft} \leftarrow \emptyset$ %chemin associé à une faute ft
 $PC_{ft} \leftarrow \emptyset$ % ensemble de conflits possibles associés à une faute ft
 $ft = 0$ % faute
 $dest = 0$

Début :

pour tout $obs_j \in OBS$ **faire**

Si $|obs_j - obs_{j_n}| \geq \epsilon_{obs_j}$ **alors**

$ft \leftarrow obs_j$; % marquer le défaut

pour $a(x_j, l_{ij}, s_{ij}, x_j) : x_j = obs_j$ **faire**

$l_{ij} \leftarrow \Gamma(l_{ij})$;

% associer au label de l'arc, le signe de la déviation

$Ch_{ft} \leftarrow Ch_{ft} + a$;

% ajouter l'arc au chemin associé à la faute ft

$dest \leftarrow x_i$;

% le noeud origine de l'arc devient le noeud destination de l'arc suivant (chaînage arrière)

Si $l_{ij} = f_m$ **alors**

% f_m correspond à un flux mesuré

pour $a(x_j, l_{ij}, s_{ij}, dest) : l_{ij} = f$ **faire**

$l_{ij} \leftarrow \Gamma(l_{ij})$

% propager le signe de la déviation en considérant en premier lieu l'arc qui impose le flux si l'observation détectée est une variation de flux

fin pour

Si non si $l_{ij} = e_m$ **alors**

% e_m correspond à un effort mesuré

```

    pour  $a(x_j, l_{ij}, s_{ij}, dest) : l_{ij} = e$  faire
         $l_{ij} \leftarrow \Gamma(l_{ij})$ 
    fin pour
fin si

 $Ch_{ft} \leftarrow Ch_{ft} + a$ 
 $dest \leftarrow x_i$ 
    Tant que  $dest \notin OBS$  faire
% chaînage arrière et propagation de la déviation jusqu'au moment où l'on
tombe sur un noeud observé
        pour  $a(x_j, l_{ij}, s_{ij}, dest)$  faire
             $l_{ij} \leftarrow \Gamma(l_{ij})$ 
        fin pour
         $Ch_{ft} \leftarrow Ch_{ft} + a$ 
         $dest \leftarrow x_i$ 
    fin tant que
    Si  $\Gamma(l_{ij}) \neq \Gamma(dest)$  alors
        pour tout  $a(x_j, l_{ij}, s_{ij}, x_j) : a \in Ch_{ft}$  faire
            Si  $x_j \in \{RUIUCUTFUGY\}$  alors
                 $PC_{ft} \leftarrow PC_{ft} + x_j$ 
            fin si
        fin pour
    fin si

    fin pour
    fin si
fin pour
retourner( $f, PC_{ft}$ )

```

4.3.2 Exemple d'illustration

Afin d'illustrer l'approche développée pour le diagnostic qualitatif à base du BGS, prenons l'exemple du système électrique de la figure 3.4(a) introduit dans le précédent chapitre. En fonctionnement normal, le BGS correspondant est donné par la figure 4.3(a).

Sur cette figure, les variables d'énergie ne sont pas signées. Dès que l'une des valeurs mesurées par les détecteurs $x_D \in X_D$ dépasse les seuils prédéfinis, la variable associée au label de l'arc connecté au noeud x_D correspondant prend une valeur qualitative décrivant la nature de la déviation. L'ensemble des conflits possibles PC (correspondant à l'ensemble des fautes candidates) est déduit à partir du

BGS en procédant à une propagation de la faute par chaînage arrière jusqu'à ce qu'un conflit apparaisse (voir la figure 4.4 correspondant à la propagation de la faute).

Des exemples de conflits possibles correspondant au système électrique étudié sont décrits respectivement sur les figures 4.3(b), 4.3(c) et 4.3(d). Afin d'expliquer la façon avec laquelle ils sont obtenus, supposons que $\Gamma(f_{m_1}) = ' +'$ correspond au noeud d'observation associé au détecteur $Df : f_{m_1}$. Les chemins de propagation de la faute sont donnés par la partie supérieure de la figure 4.4. Tout d'abord, la propagation démarre par l'arc imposant le flux (car $Ce_1 = J_1$). Cet arc correspond au seul arc entrant du noeud Ce_1 . Par conséquent, si la valeur du flux mesuré f_{m_1} est trop élevée, alors ceci est du à l'augmentation de la variable f_2 . Par la suite, la propagation continue au travers de l'élément L_1 dont nous ne connaissons pas le comportement exact. C'est pour cela, que nous considérons sur le schéma de propagation que la valeur de e_2 peut évoluer dans deux directions différentes : e_2^+ , e_2^- .

Concernant le premier cas, la valeur élevée de e_2 est expliquée par une valeur basse de e_3 ou e_4 . Cette déduction est faite en fonction de la direction des arcs sur le BGS en sachant que celle-ci correspond au sens de l'évolution des variables les unes par rapport aux autres. Dans le cas où la valeur de e_3 est basse, la variable flux f_3 doit être basse à son tour si l'élément R fonctionne correctement. Néanmoins, cette hypothèse sur f_3 est inconsistante avec l'observation $\Gamma(f_{m_1}) = ' +'$ vu qu'au niveau de la jonction ($Ce_1 = J_1$), nous avons $f_{m_1} = f_3$. Un conflit possible $PC_1 = (R_1, L_1)$ est alors déduit.

Concernant le deuxième cas (e_2^-), la valeur basse de e_2 est expliquée par une valeur élevée de e_3 ou e_4 . L'hypothèse e_3^+ ne présente aucune inconsistance puisqu'elle conduit à f_3^+ correspondant à la valeur observée $f_{m_1} = ' +'$. Dans ce cas là, la seule faute plausible peut concerner l'élément $\{L_1\}$. Par ailleurs, l'hypothèse e_4^+ est consistante avec l'observation $\Gamma(e_{m_1}) = ' +'$. Comme décrit dans l'algorithme précédent, la propagation s'arrête dès que nous atteignons un nouveau noeud d'observation. Dans ce cas là, l'ensemble de conflits possibles contiendra les fautes plausibles et dans le cas que nous traitons, celui ci ne contiendra que l'élément $\{L_1\}$. Par la suite, la déviation mesurée à partir du détecteur $De : e_{m_1}$ est considérée et la même procédure décrite auparavant est appliquée pour la propagation de la faute.

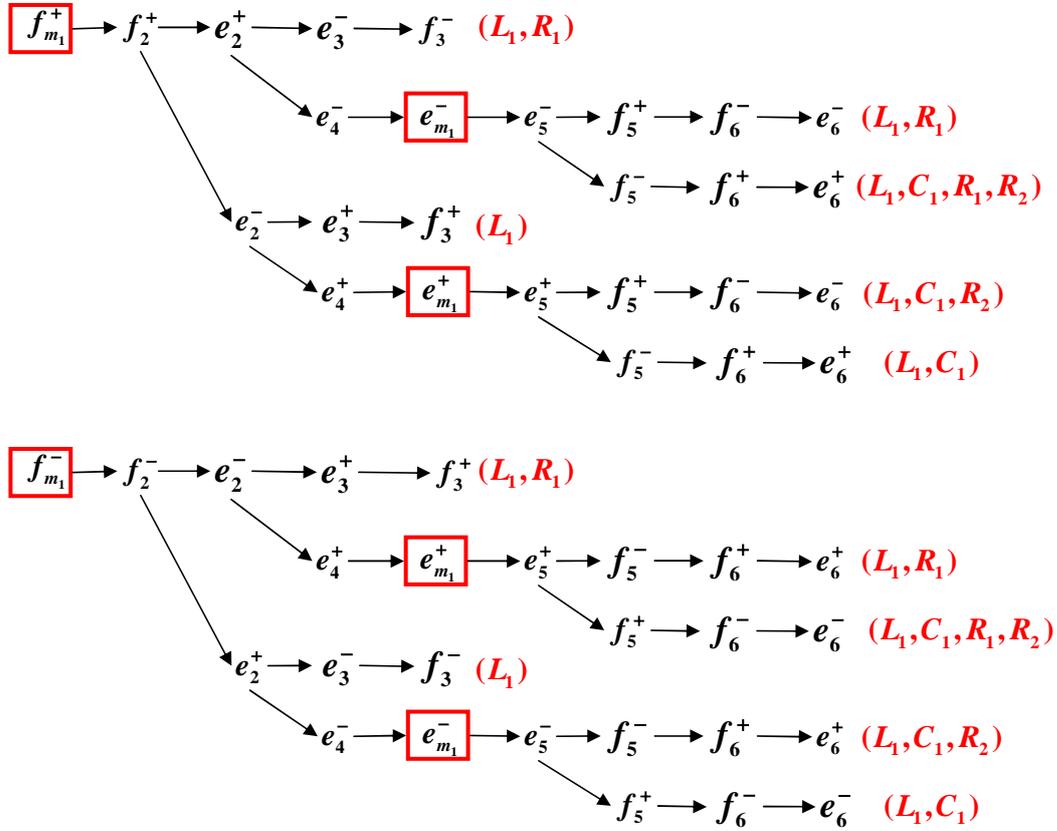


FIGURE 4.4 – Propagation de fautes à partir du BGS

C'est pour cela, que la propagation au niveau de l'élément C_1 admet deux hypothèses par rapport à l'évolution de la variable f_5 . Par exemple, une valeur élevée de f_5 peut être expliquée par une basse valeur de e_6 . Cette valeur qualitative est inconsistante avec l'observation $\Gamma(e_{m_1}) = '+'$. Ainsi le conflit possible $PC_2 = (L_1, C_1, R_2)$ est déduit.

4.4 Mise en oeuvre de l'approche proposée

4.4.1 Conception du module de diagnostic hors ligne

La conception du module de diagnostic repose sur les sept étapes illustrées sur la figure 4.5 et qui peuvent être résumées comme suit. Tout d'abord, le graphe de gestion des MdFs est élaboré en fonction des différents états fonctionnels que peut prendre le système en termes de services rendus. Dans un second temps, le modèle BG est construit en se basant sur l'architecture du système physique à modéliser. Cette architecture peut être donnée par les schémas P&ID du système. La troisième étape consiste à associer les services élémentaires à des éléments BG moyennant le MGC. Le modèle BGS est ensuite déduit à partir du BG en employant des sémantiques équivalentes (présentées dans le chapitre précédent), facilement compréhensibles et utilisables par toute personne habituée à la modélisation BG. A partir du BGS, l'ensemble des conflits possibles est généré par propagation de l'ensemble des observations sur ce dernier. Le modèle BG est également utilisé pour la génération des indicateurs de fautes sous forme de RRAs. Ces relations permettent de déduire des résidus utilisés pour la construction de la Matrice de Signature de Fautes. Cette matrice est utilisée pour la surveillance en ligne du système en déterminant (avec l'hypothèse de faute simple) le défaut pouvant être détecté et éventuellement isolé en fonction des résidus calculés. Un placement de capteurs peut alors être proposé pour satisfaire les spécifications définies sur le cahier de charges. Ceci peut être réalisé directement moyennant le logiciel FDIpad.

4.4.2 Exploitation en ligne

Une fois le module de diagnostic correctement conçu, il peut être exploité en ligne pour détecter et isoler les défauts lorsque cela est possible. Cette procédure de diagnostic est illustrée par la figure 4.6 et peut être résumée comme suit.

Dans un premier temps, les RRAs sont évaluées en utilisant les sorties mesurées et les entrées de commande qui représentent des variables connues du système. A partir de cette évaluation des RRAs, un vecteur de cohérence est obtenu. Si sa valeur est différente de $(0, 0 \dots 0)$

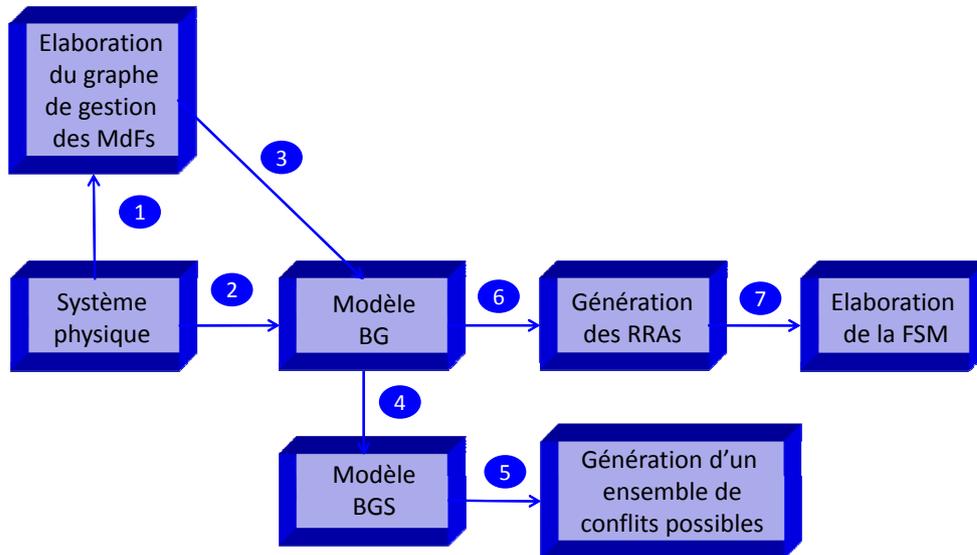


FIGURE 4.5 – Etape de conception hors ligne

alors il est comparé aux différentes signatures présentes sur la MSF. Cela conduit à une liste de défauts possibles et permet l'extraction d'un sous-ensemble de fautes candidates. En utilisant directement les valeurs mesurées, la consistance des conflits possibles, générés hors ligne à partir du BGS, est vérifiée et les situations anormales sont identifiées. Dans une dernière étape, la cohérence entre les résultats obtenus par l'évaluation des RRAs et par la génération des conflits possibles est vérifiée. Si cohérence il y a, certains défauts peuvent être isolés. Dans le cas contraire, un résultat partiel est donné.

L'algorithme de diagnostic peut être résumé comme suit. A un instant t donné, le vecteur de cohérence est déterminé. Ce vecteur est formé par un ensemble de résidus qui sont évalués en ligne et chaque vecteur correspond à une signature d'un défaut donné. Pour chaque valeur égale à 1 dans la signature, il lui correspond un résidu qui est sensible à un défaut. Pour traiter le cas des fautes multiples, on crée un ensemble F dans lequel nous mettons tous les défauts sensibles à au moins l'un des résidus dont la valeur est passée à 1. Par la suite, à partir des conflits possibles (ensemble des fautes candidates) déterminés hors ligne à partir du BGS, nous éliminons ceux qui contiennent des éléments n'appartenant pas à l'ensemble F . Ainsi le conflit possible restant correspond à l'ensemble de défauts pouvant être à l'origine des observations. Cette procédure est illustrée par l'algorithme ci-dessous :

Algo. 3 : Diagnostic à base de modèles qualitatifs et quantitatifs

Initialisation :

$F \leftarrow \emptyset$ %chemin parcouru sur le graphe

$PC \leftarrow \emptyset$ %ensemble de conflits possibles

$\sigma_t \leftarrow \emptyset$ %vecteur observé à partir d'un instant t (il est formé par les résidus r_i)

Début :

Attendre σ_t

Faire

Si ($r_i \in \sigma_t$) et ($r_i == 1$) **Alors**

pour tout f_i sensible à r_i **faire**

$F \leftarrow F \cup \{f_i\}$;

fin pour

fin si

$PC_i \leftarrow \text{GenererPCs(BGS)}$; (voir Algo.2)

pour tout $PC_i \subset PC$ **faire**

Si $PC_i \notin F$ **alors**

$PC \leftarrow PC \setminus \{PC_i\}$

fin si

fin pour

retourner PC

Attendre prochaine observation du vecteur σ_{t+1} ;

Tant que (σ_{t+1}) n'est pas déterminé)

fin

A chaque faute correspond un ensemble de services élémentaires qui deviennent indisponibles. Le parcours de l'arbre ET/OU (cf. figure 3.12) qui définit les relations entre objectifs à réaliser et services élémentaires, permet de déterminer quels objectifs sont réalisables en fonction de la disponibilité des ressources matérielles et de mettre à jour le graphe de gestion des modes de fonctionnement.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de diagnostic de fautes simples et multiples à base du Bond Graph Signé a été proposée. La méthode

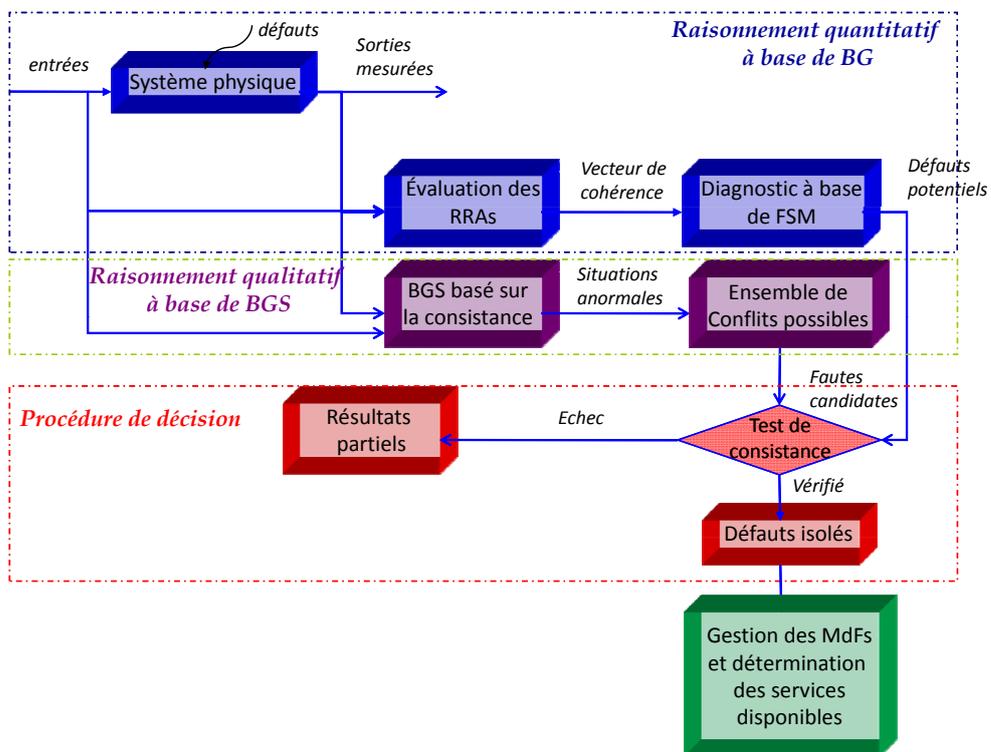


FIGURE 4.6 – Exploitation en-ligne

est basée sur l'utilisation des propriétés structurelles de l'outil bond graph pour la génération d'indicateurs de fautes et sur la modélisation du BGS pour l'identification d'un ensemble de fautes plausibles en fonction des valeurs qualitatives pouvant être prises par les observations. L'algorithme de diagnostic développé repose sur deux étapes ; l'une est réalisée hors ligne et consiste à prédire l'évolution des différents paramètres en fonction des observations disponibles et à générer la matrice d'incidence. La seconde étape consiste à évaluer sur plusieurs fenêtres d'observations les résidus en émettant l'hypothèse de l'occurrence d'une faute simple (non combinée) et qui sera utile pour l'étude de la cohérence avec les fautes candidates générées à partir du raisonnement qualitatif. Ainsi, les résultats obtenus sont validés et les résultats, qui sont déterminés hors ligne mais qui sont physiquement impossible, sont éliminés. Finalement, le résultat de cet algorithme de diagnostic caractérise la condition de transition d'un mode de fonctionnement à un autre et détermine l'ensemble des services disponibles. Nous offrons ainsi à l'opérateur humain un module de diagnostic global s'avérant être un outil d'aide à la prise de décisions. Afin de prouver la généralité de l'approche développée, celle ci sera appliquée dans le prochain chapitre à deux systèmes différents. Le premier étant un système énergétique. Il s'agit de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons. Le second cadre applicatif de nos approches est un véhicule électrique multi-actionné qui a été développé dans le cadre du projet européen InTraDE.

CHAPITRE 5

Applications

Première Partie :

Application aux piles à combustible échangeuses de protons

5.1 Introduction

Pour garantir le bon fonctionnement des Piles à Combustibles (PàC), il est nécessaire d'utiliser des techniques systématiques pour la détection et l'isolation de défauts [PHLIPPOTEAU, 2009]. Parmi ces techniques, on trouve les approches à base de modèles quantitatifs [AITOUCHE, 2011]. Ces approches ne sont pas très bien adaptées au diagnostic des piles à combustibles qui sont mal instrumentées et dont la modélisation est complexe en raison du couplage de phénomènes multi-physiques (électrique, électrochimique, thermodynamique, hydraulique...). Qui plus est, les valeurs numériques ne sont pas toujours connues. Face à ces difficultés, l'approche BGS apparaît un outil intéressant. Par son aspect graphique, en représentant les liens entre variables sans recourir à des valeurs numériques précises, elle facilite la modélisation. En combinant raisonnement causal et génération de résidus, elle fiabilise les diagnostics.

5.2 Description de la pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif formé d'un empilement de cellules élémentaires et qui produit de l'électricité par le biais d'une réaction électrochimique. Cette réaction génère un courant électrique (qui peut être dirigé en dehors des cellules pour alimenter, par exemple, un moteur électrique) et nécessite un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) et de l'oxygène. Plusieurs cellules sont mises en série afin d'avoir une tension suffisamment élevée pour l'application souhaitée.

Comme le montre la figure 5.1, la pile à combustible est constituée de :

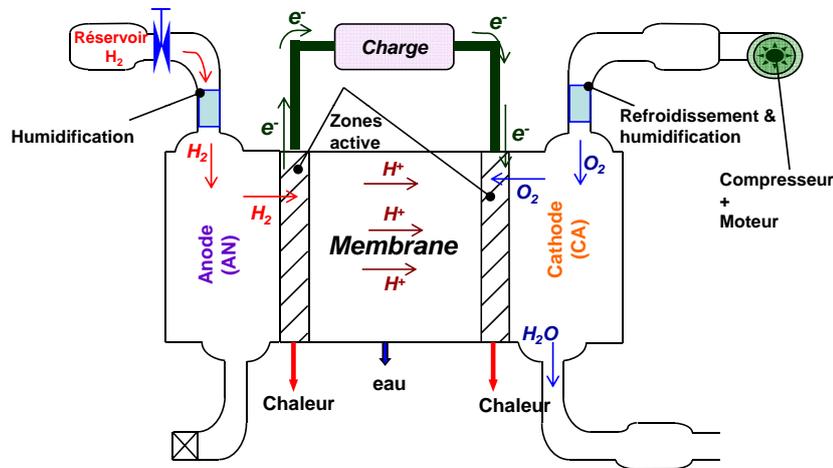


FIGURE 5.1 – Description de la PàC

- Deux plaques bipolaires, l'une pour distribuer l'hydrogène et l'autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau.
- Deux électrodes, à savoir l'anode et la cathode, qui sont séparées par un électrolyte (appelé membrane pour notre cas d'étude). Ce dernier est un matériau qui bloque le passage des électrons tout en laissant passer les protons H^+ . Cette caractéristique est d'une importance capitale pour la réalisation de la réaction électrochimique.
- Des catalyseurs généralement en platine qui accélèrent les réactions entre les gaz.

5.3 Principe de fonctionnement

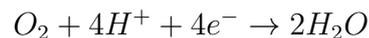
Le principe de fonctionnement de la pile à combustible échangeuse de protons peut être résumé comme suit :

- L'anode est chargée en dihydrogène (H_2) provenant d'un réservoir et entrant par la plaque bipolaire gauche à travers des couches de diffusion. En même temps, la cathode est chargée en oxygène (O_2) provenant de l'air et entrant par la plaque bipolaire droite, également à travers des couches de diffusion. En effet, celles-ci sont utilisées pour favoriser la distribution des gaz réactifs et l'évacuation de l'eau produite au niveau des électrodes.
- Arrivées à l'anode, les molécules de dihydrogène réagissent sur

le catalyseur et se dissocient en protons H^+ et en électrons e^- selon la réaction chimique suivante :



- Ensuite, tandis que les protons H^+ diffusent dans l'électrolyte (la membrane), les électrons sont contraints à circuler dans un circuit externe. Ainsi, un courant électrique continu est créé. Il est nécessaire de préciser que l'électrolyte est une membrane polymère hydratée permettant le transport des ions H^+ hydratés.
- Au niveau de la cathode, les électrons venant du circuit électrique, les protons H^+ ayant traversés l'anode et l'oxygène (qui réagit sur le catalyseur pour former des ions radicaux super oxydés) se combinent pour former des molécules d'eau selon la réaction chimique suivante :



- Cette réaction produit également de la chaleur émanant des pertes dans les réactions. La pile à combustible fonctionne tant qu'elle est alimentée en réactifs et produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. La réaction chimique globale d'une pile à combustible est donc la suivante :



5.4 Enjeux du diagnostic de la pile à combustible

Dans cette application, nous nous intéressons uniquement aux PàC à membranes échangeuses de protons appelées PEM. Nous traitons notamment le cas de défauts internes qui découlent du fonctionnement même de la pile et non des dégradations externes. Ces défauts sont généralement liés à des dégradations réversibles et c'est ce qui suscite le développement d'outils de diagnostic et d'aide à la prise de décision.

La modélisation pourrait ainsi devenir prédictive du comportement de la PàC lorsque les conditions opératoires varient. Parmi les défauts réversibles, nous nous sommes focalisés sur l'engorgement et l'assèchement qui sont liés au problème de gestion de

l'eau dans la pile et qui impacte directement son état de santé. Ce problème est particulièrement important dans les PàC PEM où l'eau existe sous les phases liquide et vapeur. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, une PàC permet de générer un courant électrique tout en produisant de l'eau et de la chaleur. La présence d'un excès d'eau engendre le ralentissement de la diffusion des gaz et provoque leur mauvaise répartition sur les couches de diffusion car celles-ci doivent rester sèches. D'où la nécessité d'évacuer l'eau pour assurer le bon fonctionnement de la pile. D'autre part, la membrane doit être suffisamment hydratée pour assurer le transport des protons H^+ suite à la dissociation des molécules de dihydrogène sur le catalyseur. Cette réaction nécessite également que la couche active soit hydratée.

Il est donc indispensable de gérer convenablement l'eau dans la pile de telle façon que l'eau soit évacuée, sous peine d'engorgement de la cathode, tout en veillant à ce qu'elle soit suffisamment présente pour ne pas engendrer d'assèchement de la membrane. Nous constatons donc qu'il est primordial de détecter et d'isoler ces deux défauts (engorgement et assèchement) afin de prévenir l'endommagement de la pile et d'assurer son bon fonctionnement. Cette tâche est d'autant plus difficile que les deux défauts sont liés de façon antagoniste.

La gestion de l'eau liquide est problématique dans le cas des PàC. Plusieurs chercheurs ont proposé des méthodes pour permettre d'y pallier. Hissel et al. [HISSEL, 2004] par exemple ont développé une méthode de diagnostic basée sur l'utilisation des techniques du soft computing et en l'occurrence la logique floue et les algorithmes génétiques. Dans un autre travail, Yousfi Steiner et al. [YOUSFI-STEINER, 2011] ont proposé une procédure de diagnostic basée sur la comparaison des paramètres mesurés avec ceux calculés à partir d'un Réseau de Neurones (RN) caractérisant le fonctionnement normal de la PàC. Les RNs ont une très bonne prédiction statistique ayant la capacité de s'accommoder de valeurs très bruitées ou même manquantes. Néanmoins, cette caractéristique ne permet pas de s'affranchir du fait que les RNs soient complètement impossibles à inspecter.

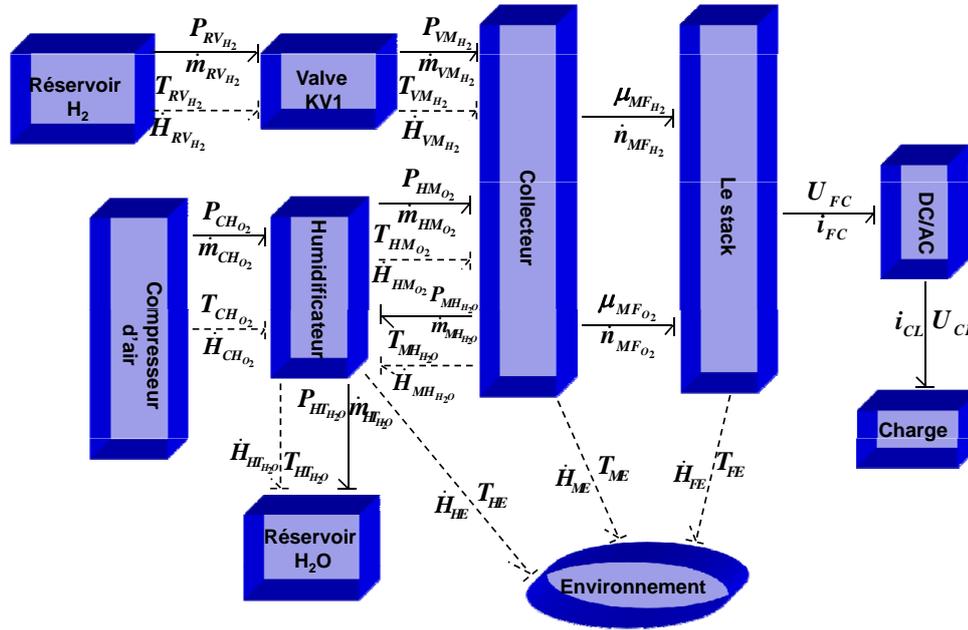


FIGURE 5.2 – Bond Graph à mots de la pile à combustible

5.5 Bond graph à mots de la pile à combustible

Dans cette section, nous présentons le Bond Graph à mots de la pile à combustible PEM. Ce BG à mots donne une représentation organique de la pile, faisant apparaître les composants internes au système et leur interactions (voir figure 5.2). Cette représentation est déduite de l'analyse du fonctionnement de la PàC. Contrairement aux schémas blocs classiques, elle précise, pour chaque sous-système, quelles sont les variables d'énergie consommées. Ces dernières sont exprimées en termes de flux et d'effort.

Le BG à mots est indispensable afin de représenter graphiquement l'ensemble des phénomènes physiques pris en considération. En ce qui concerne la PàC, les variables énergétique utilisées sont respectivement : (couple, vitesse angulaire) = $(\tau, \dot{\omega})$, (pression, flux massique) = (P, \dot{m}) , (température, flux d'enthalpie) = (T, \dot{H}) , (potentiel chimique, flux molaire) = (μ, \dot{n}) et (tension, Courant) = (U, i) . Ces variables sont respectivement

associées aux domaines mécanique, hydraulique, thermique, chimique et électrique. En ce qui concerne la réaction chimique de la pile, deux types de variables énergétiques sont utilisées notamment le *potentiel chimique* et le *flux molaire* en ce qui concerne les phénomènes de transformation et l'*affinité chimique* A (J/mol) et la *vitesse de la réaction* J . Pour des raisons de clarté, nous nous sommes focalisés dans cette application uniquement sur le coeur de la pile. Les sous systèmes qui interagissent avec la PàC sont :

- La valve $KV1$ qui contrôle le débit du dihydrogène.
- L'humidificateur : côté anode, il est utilisé pour hydrater le flux d'hydrogène et côté cathode, il rajoute de la vapeur d'eau au niveau du flux d'oxygène entrant afin de prévenir l'assèchement de la membrane.
- Le système de refroidissement (cooler) afin de réduire la température de l'air avant qu'il arrive au niveau du stack.
- Le système d'approvisionnement en air et qui est formé d'un compresseur d'air et d'un moteur.
- Le collecteur de retour représente la conduite qui assure l'évacuation de l'eau résultant de la réaction chimique au niveau de la pile vers le réservoir H_2O .
- Le convertisseur DC/AC qui permet de transformer la tension électrique aux bornes du stack en une tension alternative.

5.6 Modèle Bond Graph de la PàC

Peraza & al.[PERAZA, 2008] ont proposé un modèle Bond Graph simplifié de la PàC PEM en émettant certaines hypothèses de modélisation. Dans cette section, nous proposons un modèle BG plus développé pour des fins de diagnostic. La pile à combustible que nous avons utilisée pour la simulation est une PàC PEM de 6 KW, 45 volts alimentant un convertisseur DC/DC de 100 Vdc (les performances de la pile considérée sont données par la figure 5.3). Le modèle Bond Graph que nous avons proposé est donné par la figure 5.4. Les transformateurs TF_{an} et TF_{ca} modulés par le flux molaire représentent des transformations chimiques respectivement relatives au débit du dihydrogène à travers l'anode et du débit de l'oxygène à travers la cathode. D'autre part, le transformateur TF_e représente la transformation de l'énergie libre de Gibbs (variation de l'enthalpie) en énergie

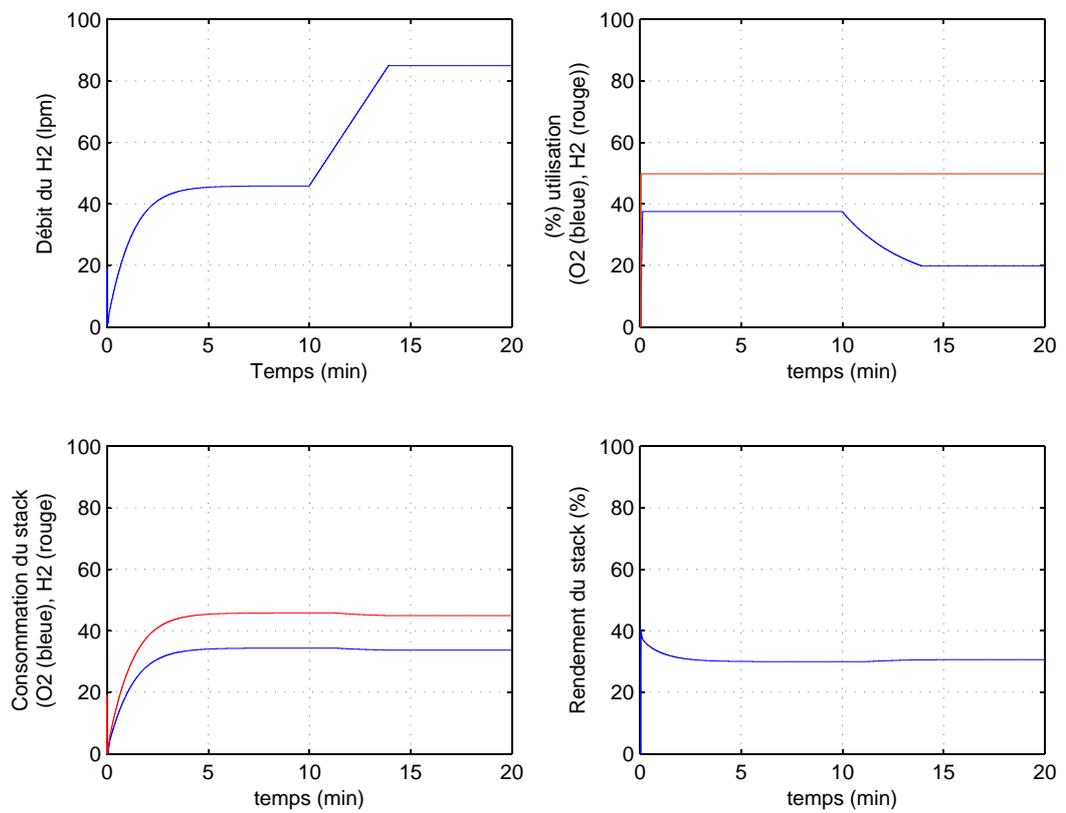


FIGURE 5.3 – Performances de la PàC PEM étudiée (6Kw, 45 Volts)

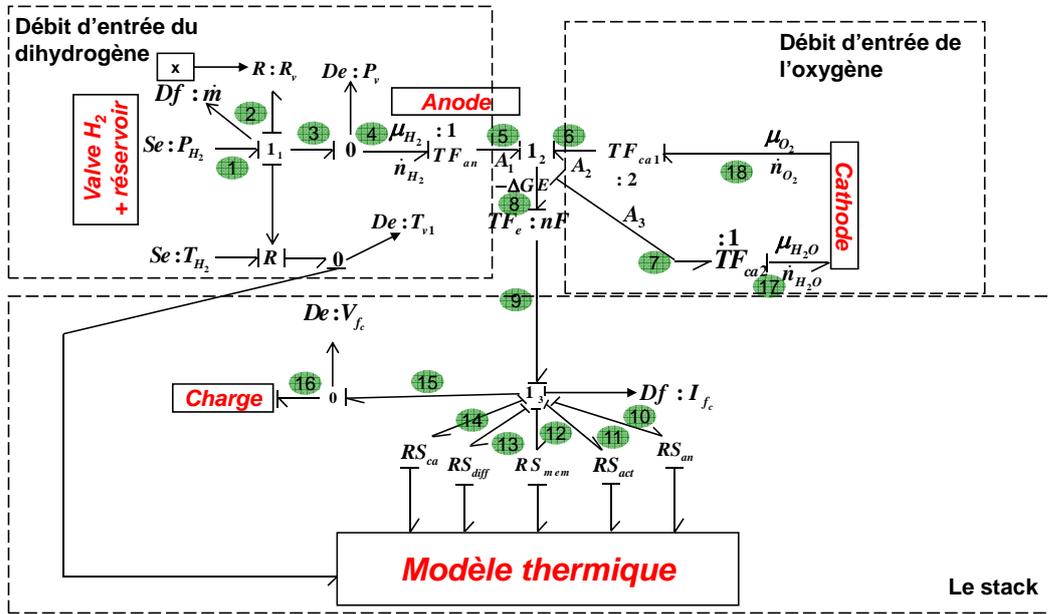


FIGURE 5.4 – Modèle Bond Graph de la pile à combustible

électrique en supposant que l'énergie libre de Gibbs peut être convertie en énergie électrique. Le potentiel théorique E de la pile à combustible est lié à l'énergie libre de Gibbs ΔG appelée enthalpie libre telle que :

$$E = \frac{-\Delta G}{nF}$$

où $n = 2$ correspond à la quantité d'électrons échangée lors de la réaction et F est la constante de Faraday (96485 C/mol).

Cette relation est ainsi modélisée par le transformateur $TF_e : nF$. Les jonctions sont utilisées afin de connecter les différents éléments BG. Les jonctions 0 sont utilisées lorsque l'effort est le même et les flux sont différents, contrairement aux jonctions 1 qui sont utilisées lorsque le flux est le même et les efforts sont différents. Les détecteurs De et Df correspondent respectivement aux capteurs d'effort et de flux. On trouve ainsi sur le modèle BG proposé, cinq capteurs qui permettent de mesurer respectivement le flux massique \dot{m} , la température T_{v1} , la pression P_v , le courant aux bornes du stack I_{fc} et la tension V_{fc} . Se et Sf correspondent respectivement aux sources d'effort et de flux. L'élément R_v représente la vanne qui contrôle le débit d'entrée d'hydrogène et qui est ainsi modélisée par une résis-

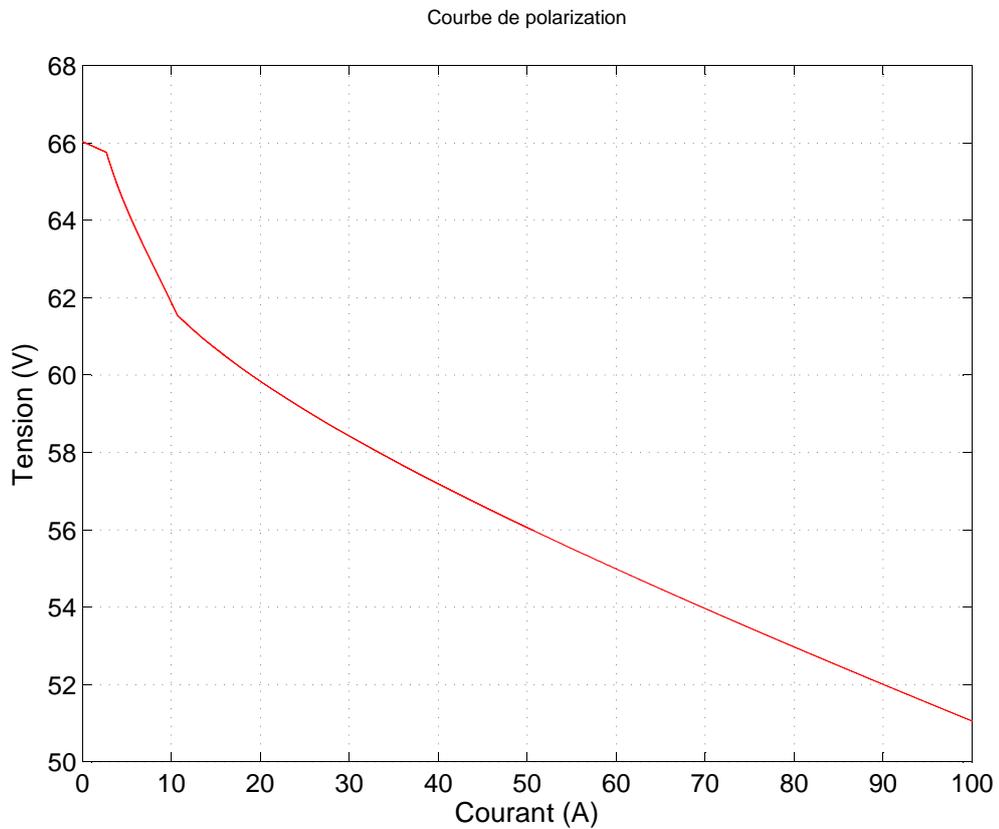


FIGURE 5.5 – Courbe de polarisation de la PàC (6 Kw, 45 Volts)

tance hydraulique modulée par un bond d'information x (signal de commande). L'élément R représente le frottement à travers les couches de diffusion. Les pertes thermiques sont modélisées par l'élément RS qui correspond à une résistance active et qui traduit respectivement les pertes dans la couche d'activation, les pertes dans les couches de diffusion, les pertes dues à la concentration ...

La courbe de polarisation de la pile à combustible simulée est donnée par la figure 5.5.

Concentrons nous maintenant sur la figure 5.4 afin de déduire des indicateurs de fautes sous forme de RRAs :

A partir de la *Jonction*(1_1), les équations suivantes peuvent être déduites :

$$e_1 - e_2 - e_3 = 0 \quad (5.1)$$

$$e_1 = P_{H2} \quad (5.2)$$

$$e_2 = f(f_2, x) \quad (5.3)$$

$$f_2 = f_3 = \dot{m} \quad (5.4)$$

$$e_3 = e_4 = P_v \quad (5.5)$$

A partir des équations (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) et (5.5), nous déduisons la première relation de redondances analytiques suivante :

$$P_{H2} - f(f_2, x) - P_v = 0 \quad (5.6)$$

De même, à partir de la jonction(1₃), nous pouvons écrire les équations suivantes :

$$e_9 - e_{10} - e_{11} - e_{12} - e_{13} - e_{14} - e_{15} = 0 \quad (5.7)$$

$$e_{10} = f_{10} \times RS_{an}; e_{11} = f_{11} \times RS_{act}; e_{12} = f_{12} \times RS_{mem} \quad (5.8)$$

$$e_{13} = f_{13} \times RS_{diff}; e_{14} = f_{14} \times RS_{ca}; e_{15} = V_{fc} \quad (5.9)$$

$$f_{10} = f_{11} = f_{12} = f_{13} = f_{14} = I_{fc} \quad (5.10)$$

$$e_8 = nF \times e_9 \quad (5.11)$$

$$e_{19} = f(P_{O_2}, T_{O_2}); P_{O_2} = f(\dot{m}_{O_2}, P_{out}); e_5 = f(T_{v_1}, e_4) \quad (5.12)$$

$$e_5 = e_6; e_{18} = f(P_{H_2O}, T_{H_2O}) \quad (5.13)$$

A partir des équations (5.7) à (5.13), la seconde RRA est déduite :

$$f(T_{v_1}, P_v) + f[f(\dot{m}_{O_2}, P_{out}), T_{O_2}] - nF[I_{f_c} \times (RS_{act} + RS_{diff} + RS_{ca} + RS_{an} + RS_{mem}) + V_{f_c}] - f(P_{H_2O}, T_{H_2O}) = 0 \quad (5.14)$$

A partir de la jontion(1₂) et en suivant la même procédure, la troisième RRA suivante est obtenue :

$$\frac{1}{nF}[f(T_{v_1}, P_v) + f(P_{O_2}, T_{O_2}) - f(P_{H_2O}, T_{H_2O})] - I_{f_c} \times (RS_{act} + RS_{diff} + RS_{ca} + RS_{an} + RS_{mem}) - V_{f_c} = 0 \quad (5.15)$$

La matrice de signatures de défauts donnée par table 5.1, est déduite directement à partir des trois RRAs (5.6), (5.14) et (5.16). Le vecteur (R1, R2, R3) représente la signature du défaut. Les défauts isolables sont ceux dont la signature est unique i.e. différente des autres signatures tel est le cas de la signature $V = (1, 1, 1)$ correspondant au capteur de pression du H_2 . Néanmoins, les autres défauts ne sont pas isolables car leur signature n'est pas unique. A partir de la matrice de signatures de défauts, il est clair que les défauts liés à gestion de l'eau dans la pile, et en l'occurrence l'assèchement de la membrane et l'engorgement de la cathode, sont détectables mais non isolables car ces deux défauts possèdent la même signature $V = (0, 0, 1)$. Nous proposons donc d'appliquer la méthode développée dans les précédents chapitres et en l'occurrence l'utilisation du BGS afin de pallier cette problématique.

Défaut	R_1	R_2	R_3	D	I
Assèchement de la membrane	0	0	1	1	0
Engorgement de la cathode	0	0	1	1	0
Régulateur de la valve H_2	1	0	0	1	0
Capteur du flux massique H_2	1	0	0	1	0
Capteur de pression H_2	1	1	1	1	1
Capteur de température H_2	0	1	1	1	0
Capteur de courant	0	1	1	1	0
Capteur de tension	0	1	1	1	0
Capteur de température Cathode	0	1	1	1	0
Capteur de pression Cathode	0	1	1	1	0

TABLE 5.1 – Matrice de signatures de défauts de la PàC PEM

5.7 BGS pour le diagnostic qualitatif de la PàC

A partir du modèle BG décrit précédemment, nous avons construit le BGS en suivant les propriétés et l'algorithme que nous avons défini dans le troisième chapitre. Le BGS correspondant à la PàC PEM est donné par la figure 5.6.

Prenons maintenant le cas des défauts liés à la gestion d'eau dans la pile (assèchement et engorgement).

Une analyse préalable est réalisée afin de déterminer l'évolution et la propagation du défaut sur le BGS en fonction des valeurs associées aux noeuds d'observations dans le but de déterminer les ensembles de conflits possibles. En effet, nous avons introduit des défauts en modifiant à chaque fois les paramètres de la PàC et en l'occurrence les valeurs mesurables afin de déterminer la direction d'évolution des autres variables afin d'y associer des valeurs qualitatives sur le BGS. L'évaluation des résidus, donnée par la figure 5.8, permet l'obtention de la signature $V = (0, 0, 1)$, celle ci permet de détecter un défaut de gestion de l'eau dans la pile mais ne permet pas de dissocier entre l'assèchement de la membrane et l'engorgement de la cathode.

Un scénario de défaut est donné par la figure 5.7. Ces résultats de simulation sont utilisés et permettent de déterminer les conflits possibles suivants :

$$f_{m_1}^+ \longrightarrow f_3^+ \longrightarrow f_4^- \longrightarrow f_5^- \longrightarrow f_8^+ \longrightarrow f_9^+ \longrightarrow f_{m_2}^+ \quad (5.16)$$

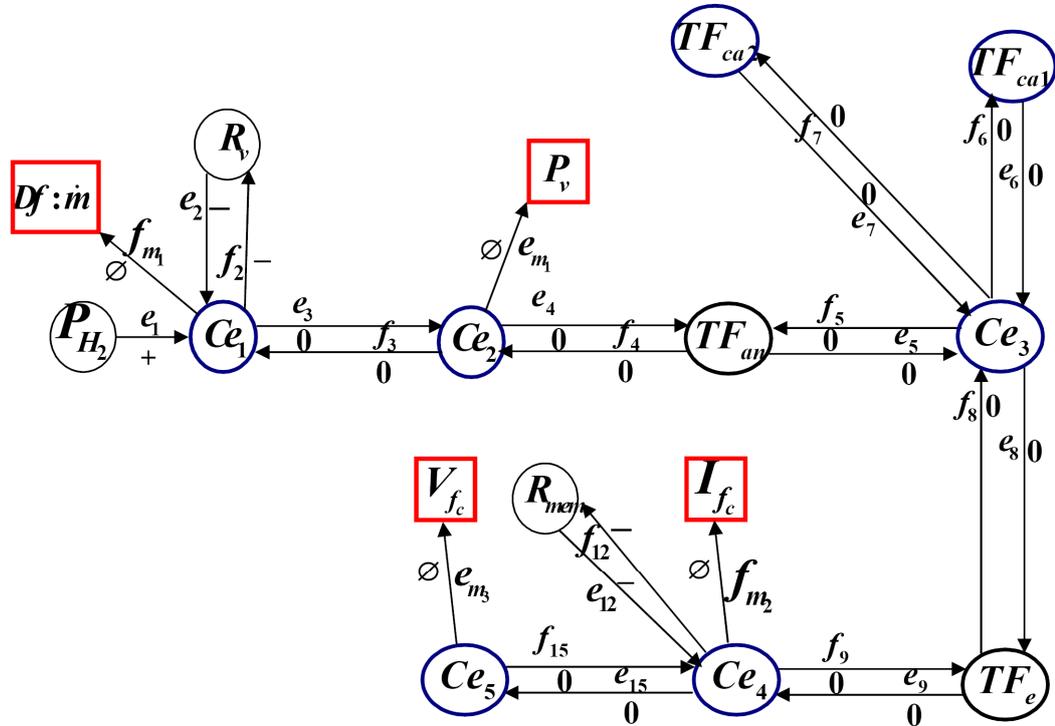


FIGURE 5.6 – Bond Graph Signé de la PàC PEM

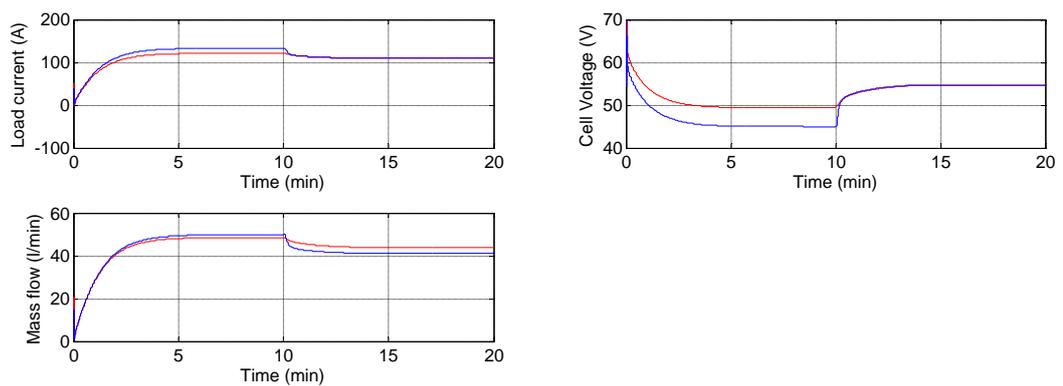


FIGURE 5.7 – Résultats de simulation suite à l'introduction d'un défaut sur la PàC

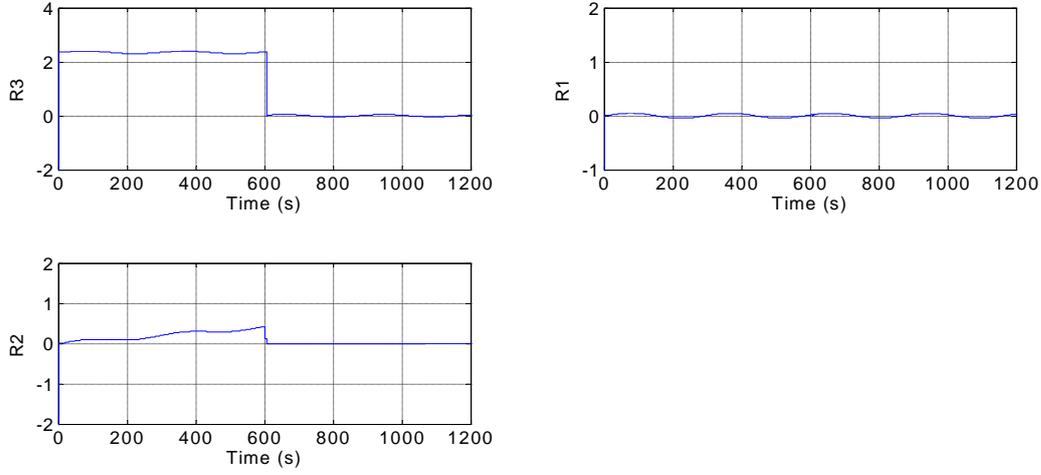


FIGURE 5.8 – Résultats de l'évaluation des résidus suite à l'introduction d'un défaut

$$e_{m_3}^+ \longrightarrow e_{15}^+ \longrightarrow e_2^- \longrightarrow f_{12}^- \longrightarrow f_{m_2}^- \quad (5.17)$$

$$e_{m_3}^+ \longrightarrow e_{15}^+ \longrightarrow e_9^- \longrightarrow e_8^- \longrightarrow e_5^+ \longrightarrow e_4^+ \longrightarrow e_{m_1}^+ \quad (5.18)$$

Nous notons une inconsistance entre les résultats de simulation et le conflit possible 5.17 car la valeur f_{m_2} augmente selon les simulations lorsque la valeur de e_{m_3} augmente. Néanmoins, les conflits possibles 5.16 et 5.18 correspondent aux observations. Par conséquent, l'élément à l'origine du défaut est un élément appartenant au chemin de propagation 5.17 et en l'occurrence la résistance de la membrane. Il a été établi dans [BARBIR, 2005] que la résistance de la membrane est sensible à l'assèchement de la membrane. Ainsi à partir du vecteur observé $V = (0, 0, 1)$ et à partir de l'analyse qualitative à base du BGS, nous avons réussi à isoler le défaut malgré le fait qu'on ne dispose pas d'un capteur pour la mesure de la résistance de la membrane et malgré le fait que l'analyse quantitative à base du bond graph ne permet pas d'isoler ce défaut.

5.8 Conclusion

L'application proposée dans cette partie a permis de tester en simulation l'efficacité de l'algorithme de diagnostic développé dans le chapitre précédent. En effet, nous avons proposé un modèle du coeur de la pile à combustible et non de tous les éléments interagissant avec elle. De plus, on ne s'est intéressé qu'au MdF correspondant à une production normale. Néanmoins, Nous pouvons envisager de passer, en fonction des défauts constatés, à d'autres MdFs comme celui correspondant à une production dégradée ou à une production réduite ...

Nous avons montré qu'un diagnostic qui ne reposerait que sur l'analyse des résidus obtenus par la génération de RRAs n'est pas suffisant pour isoler deux défauts antagonistes que sont l'assèchement de la membrane et l'engorgement de la cathode. Par contre, si l'on ajoute à cette première analyse, un raisonnement qualitatif basé sur le BGS alors l'isolation de ces deux défauts devient possible sans ajouter de capteurs supplémentaires. Nous espérons, par cette première application avoir montré l'intérêt de l'approche proposée.

Deuxième Partie :

Application à un système électromécanique d'un véhicule électrique

5.9 Introduction

Cette deuxième application concerne le diagnostic et la supervision d'un système de transport intelligent et plus précisément d'un prototype de véhicule intelligent autonome appelé Robu-Tainer (voir figure 5.9) et conçu dans le cadre du projet européen InTraDE [InTraDE]. Ce véhicule est dit intelligent en raison de l'instrumentation embarquée dont il dispose et qui permet de recueillir les informations acquises des capteurs (GPS, capteurs lasers, centrale inertielle, gyroscopes...), d'implémenter des algorithmes de surveillance en ligne et de naviger en toute autonomie. Ce véhicule est conçu pour le transport des conteneurs dans les ports tout en s'adaptant à l'infrastructure existante.

Ce système permet ainsi d'améliorer la sûreté de fonctionnement, la gestion du trafic et l'optimisation de l'espace dans les zones portuaires et confinées. Ce système IAV (Intelligent and Autonomous Vehicle) peut adapter sa vitesse et sa trajectoire en fonction de l'état du trafic et des missions pour lesquelles il a été conçu. En effet, il s'agit d'un véhicule multi-actionné qui permet le transport des conteneurs dans les zones portuaires et confinées moyennant une décentralisation de la traction et de la direction. Chaque quart de véhicule dispose de deux roues jumelées actionnées par un moteur de traction électrique et un moteur de direction hydraulique. Le moteur de direction est monté autour de l'axe des deux roues jumelées et leur permet ainsi une rotation de 90° qui assure le déplacement latéral du véhicule en lui rajoutant des degrés de libertés.

Le véhicule peut se déplacer ainsi dans toutes les directions pour éviter les problèmes de congestion. Mais aussi il peut soit trans-



FIGURE 5.9 – Image réelle du premier prototype RobuTainer

porter directement le conteneur (voir figure 5.10) ou bien se glisser sous une table (appelée cassette) sur laquelle le conteneur de 40 pieds est placé. Par la suite, le système de suspension pneumatique du véhicule s'actionne (se gonfle) afin de lever à la fois la table et le conteneur. La stabilité de l'ensemble est assurée par l'activation automatique d'un système de verrouillage électrique qui assure le maintien du conteneur sur la table. Les tables peuvent être ainsi déposées dans des zones de stockage intermédiaires (ceci se fait par le dégonflage de la suspension, la désactivation du système de verrouillage et le déplacement latérale du véhicule) afin que les camions puissent prendre la relève pour le transport des conteneurs en évitant les problèmes liés aux files d'attente des camions dans les zones portuaires à cause de leur manque de flexibilité par comparaison à l'IAV. L'architecture matérielle de ce dernier présente des redondances matérielles notamment au niveau de la traction et de la direction.

Ces redondances, au niveau des chaînes d'actionnement, permettent d'envisager le développement de stratégies de reconfiguration de manière à assurer une continuité de service lors de l'apparition de défauts. Cette tolérance aux défauts est d'autant plus utile que le système évolue de manière autonome. Elle suppose toutefois, que les dysfonctionnements puissent être détectés et isoler par des algorithmes de diagnostic performants et que les différents modes de fonctionnement du véhicule puissent clairement être identifiés et gérés.

Cette application s'avère ainsi, très bien adaptée pour la validation des algorithmes de diagnostic et de supervision développés et explicités dans les précédents chapitres.

5.10 Description du RobuTainer

Le Robutainer est un véhicule électrique sur-actionné qui peut être piloté automatiquement dans les zones portuaires et confinées. Ce véhicule englobe quatre ensembles formés chacun de deux roues jumelées ; une roue motrice piloté indépendamment par un moteur de traction et une roue assurant le freinage et la stabilisation du véhicule à l'arrêt. Les quatre moteurs de traction sont des moteurs à courant continu délivrant un couple moteur



FIGURE 5.10 – Image réelle du transport d'un conteneur par le RobuTainer

important avec une entrée de commande décentralisée.

Ce véhicule est structuré comme un graphe formé de quatre parties indépendantes et présentant ainsi quatre parties redondantes composées chacune d'un système électromécanique à savoir le moteur à courant continu, le moteur de direction et les deux roues (la roue motrice et la roue de freinage) en interaction avec le sol. De plus, chaque système électromécanique dispose de trois capteurs intégrés afin de fournir les mesures du courant électrique (i_{mj}), de la vitesse angulaire du rotor ($\dot{\theta}_{ej}$) et de la vitesse angulaire de la roue ($\dot{\theta}_{sj}$). A ces trois capteurs s'ajoute un gyroscope permettant d'acquérir les accélérations longitudinale, latérale et verticale, ainsi que la vitesse du lacet. On notera que les vitesses longitudinale et latérale (à savoir \dot{u} and \dot{v}) sont directement estimées à partir des mesures des accélérations.

5.11 Modélisation du RobuTainer

En raison de l'architecture particulière du RobuTainer composé de quatre parties redondantes et pour des raisons de clarté, nous considérons dans ce qui suit uniquement la dynamique du châssis et de deux des systèmes électromécaniques composés chacun d'un moteur à courant continu et d'une roue de traction. Le modèle BG correspondant est donné par la figure 5.11. Comme le montre le modèle BG proposé, la dynamique du châssis est exprimée via les forces F_{x1} et F_{y1} calculées comme suit :

$$F_{x1} = F_{l1} \cdot \cos(\alpha_1) - F_{c1} \cdot \sin(\alpha_1) \quad (5.19)$$

$$F_{y1} = F_{l1} \cdot \sin(\alpha_1) + F_{c1} \cdot \cos(\alpha_1) \quad (5.20)$$

Les expressions mathématiques qui modélisent la dynamique longitudinale du véhicule sont obtenues directement du modèle BG comme suit :

$$m \cdot \ddot{u} = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} + m \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{v} \quad (5.21)$$

La dynamique latérale et le lacet peuvent être obtenus respectivement par :

$$m \cdot \ddot{v} = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} - m \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{u} \quad (5.22)$$

$$J.\ddot{\psi} = [-F_{x1}+F_{x2}+F_{x3}-F_{x4}].c+[F_{y1}+F_{y2}].a-[F_{y3}+F_{y4}].b \quad (5.23)$$

Les effets de la dynamique du lacet dans les directions latérales et longitudinales sont représentés respectivement par $m.\dot{\psi}.\dot{u}$ et $m.\dot{\psi}.\dot{v}$.

5.12 Diagnostic de défauts simples et multiples

5.12.1 Raisonnement quantitatif basé sur les BG

Afin d'expliquer la procédure de génération des RRAs pour le diagnostic de défauts, nous nous sommes concentrés dans cette partie sur le moteur à courant continu et la roue vu que le modèle BG est le même pour les quatre moteurs de traction ainsi que les roues de traction du véhicule. Le modèle BG en causalité dérivée du j^{me} système électromécanique (incluant le moteur à CC ainsi la roue de traction) est donné par la figure 5.12. L'énergie électrique est fournie par la partie électrique du moteur à CC. Cette partie est représentée par une source de tension électrique d'entrée U_{0j} en série avec une résistance R_{ej} et une inductance L_{ej} . Le courant électrique est mesuré par le capteur $Df : i_{mj}$. L'élément Gyrateur GY décrit la transformation de la puissance entre la partie électrique du moteur et la partie mécanique. Cette dernière est modélisée par l'inertie J_{ej} et le paramètre de frottement visqueux f_{ej} . La vitesse angulaire est mesurée par le capteur $Df : \dot{\theta}_{ej}$. La transmission mécanique, qui relie la partie mécanique du moteur à la charge suivant une constante de réduction Nj , est représentée par un élément TF . La roue est représentée par son inertie J_{sj} , par le paramètre de la force de frottement f_{sj} , par la force latérale F_{lj} et par le rayon de la roue R . La vitesse angulaire de la roue est mesurée par le capteur $Df : \dot{\theta}_{sj}$.

Pour obtenir les RRAs, le modèle BG doit être mis en causalité dérivée préférentielle afin d'éviter le problème des conditions initiales inconnues. Ceci est fait en convertissant chaque détecteur de flux ou d'effort en une source de signal modulée par la valeur

Sous-système	Paramètre	Valeur
j^{th} Moteur de traction (Partie électrique)	L_{ej}	0.075 H
	R_{ej}	0.32 Ω
	K_{ej}	0.122 Nm/A
j^{th} Moteur de traction (Partie mécanique)	J_{ej}	0.0095 Kg m^2
	f_{ej}	0.043 Nms/rad
	K_{ej}	1 Nm/A
j^{th} Transmission	N_j	13
j^{th} Roue de traction	f_s	0.04 Nms/rad
	J_s	4 Kg m^2
	R	0.38 m
Châssis	m	2917.2 Kg
	a	2.3 m
	b	2.3 m
	c	2.3 m
	h	0.486 m

TABLE 5.2 – valeurs numériques des paramètres du RobuTainer

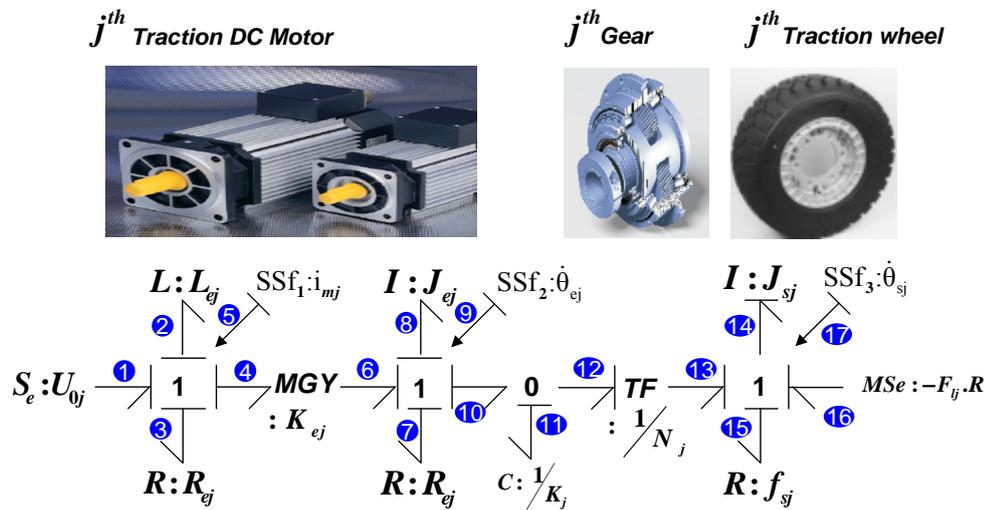


FIGURE 5.12 – Modèle BG en causalité dérivée

mesurée. Il est à noter que tous les éléments dynamiques sont reliés par des chemins causaux à au moins un détecteur et que tous les éléments dynamiques I et C admettent une causalité dérivée sur le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle. Le système est donc observable. Néanmoins, après dualisation des détecteurs, un conflit de causalité apparaît sur le système situé en amont du transformateur TF lorsque nous passons à une causalité dérivée, cette partie du système est sous-déterminée. Toutefois, la partie après le transformateur TF est sur-déterminée car aucun conflit de causalité n'apparaît en dualisant le détecteur. Comme les conditions initiales sont connues parce que le système réel est équipé de détecteurs, les RRA peuvent être générées, même si l'élément C est maintenu en causalité intégrale. Le modèle BG résultant du j^{me} système électromécanique est donné par la figure 5.12. Les valeurs des paramètres du Robu-Tainer sont données par la table 5.2. A partir du modèle BG, les relations constitutives des jonctions, du gyrateur et des transformateurs sont déduites et les RRAs liant les variables et les paramètres connus sont comme suit :

$$ARR_{1j} : U_{0j} - R_{ej} \cdot i_{mj} - L_{ej} \cdot \frac{d}{dt}(i_{mj}) - k_{ej} \cdot \dot{\theta}_{ej} = 0 \quad (5.24)$$

$$ARR_{2j} : J_{ej} \frac{d}{dt}(\dot{\theta}_{ej}) + f_{ej} \dot{\theta}_{ej} + K_{ej}(\theta_{ej} - N_j \theta_{sj}) - i_{mj} \cdot k_{ej} = 0 \quad (5.25)$$

$$ARR_{3j} : J_{sj} \frac{d}{dt}(\dot{\theta}_{sj}) + f_{sj} \dot{\theta}_{sj} - N_j \cdot K_{ej}(\theta_{ej} - N_j \theta_{sj}) - R \cdot F_{lj} = 0 \quad (5.26)$$

Les résidus sont alors :

$$R_{1j} = U_{0j} - R_{ej} \cdot i_{mj} - L_{ej} \cdot \frac{d}{dt}(i_{mj}) - k_{ej} \cdot \dot{\theta}_{ej} \quad (5.27)$$

$$R_{2j} = J_{ej} \frac{d}{dt}(\dot{\theta}_{ej}) + f_{ej} \dot{\theta}_{ej} + K_{ej}(\theta_{ej} - N_j \theta_{sj}) - i_{mj} \cdot k_{ej} \quad (5.28)$$

$$R_{3j} = J_{sj} \frac{d}{dt}(\dot{\theta}_{sj}) + f_{sj} \dot{\theta}_{sj} - N_j \cdot K_{ej}(\theta_{ej} - N_j \theta_{sj}) - R \cdot F_{lj} \quad (5.29)$$

A partir des équations 5.21, 5.22 et 5.23, nous déduisons trois autres résidus correspondant aux différentes dynamiques du châssis. Les résidus correspondant sont comme suit :

$$R_4 = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} + m.\dot{\psi}.\dot{v} - m.\ddot{u} \quad (5.30)$$

$$R_5 = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} - m.\dot{\psi}.\dot{u} - m.\ddot{v} \quad (5.31)$$

$$R_6 = [-F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} - F_{x4}] .c + [F_{y1} + F_{y2}] .a - [F_{y3} + F_{y4}] .b - J.\ddot{\psi} \quad (5.32)$$

La matrice de signature de défauts correspondante est donnée par la Table 5.3. Le vecteur $(R_{1j}, R_{2j}, R_{3j}, R_4, R_5, R_6)$ représente la signature du défaut. la procédure de décision est considérée lors de la phase de l'évaluation des résidus par rapport à certains seuils. Comme le montre la table 5.3, les seuls défauts pouvant être isolés sont ceux correspondant à $Df : \dot{\theta}_{ej}$, $Df : \dot{\theta}_{sj}$ et J car chaque signature associée à ces éléments est unique dans la matrice de signature de défauts. Ce résultat est expliqué par le fait qu'il y ait une redondance matérielle des capteurs (le capteur de mesure de la vitesse angulaire sur la partie mécanique du moteur et le capteur de mesure de la vitesse angulaire au niveau de la roue). Néanmoins, en raison du manque de signatures uniques sur la MSD, les défauts affectant les autres éléments ne peuvent pas être isolés et le cas de fautes multiples n'est pas pris en considération. Dans ce qui suit, nous allons faire appel au BGS afin de prouver qu'il est possible d'améliorer les résultats de diagnostic obtenus sur la base de l'analyse structurelle du BG.

5.12.2 Diagnostic qualitatif à base de BGS

Le BGS est directement déduit du BG de la figure 5.11 en respectant les propriétés, le formalisme et l'algorithme que nous avons présenté dans le troisième chapitre. Ce modèle est représenté par la figure 5.13. Ensuite, la propagation de défaut est réalisée en vue de déterminer qualitativement l'ensemble des fautes candidates correspondant aux conflits possibles en partant de

Parties	Variables	Résidus						Surveillabilité	
		R_{1j}	R_{2j}	R_{3j}	R_4	R_5	R_6	D_b	I_b
j^{me} moteur de traction (partie électrique)	R_{ej}	1	0	0	0	0	0	1	0
	L_{ej}	1	0	0	0	0	0	1	0
	U_{0j}	1	0	0	0	0	0	1	0
	k_{ej}	1	1	0	0	0	0	1	0
	$Df : i_{mj}$	1	1	0	0	0	0	1	0
j^{me} moteur de traction (partie mécanique)	f_{ej}	0	1	0	0	0	0	1	0
	J_{ej}	0	1	0	0	0	0	1	0
	K_j	0	1	1	0	0	0	1	0
	N_j	0	1	1	0	0	0	1	0
	$Df : \hat{\theta}_{ej}$	1	1	1	0	0	0	1	1
j^{me} roue de traction	R	0	0	1	1	1	1	1	0
	J_{sj}	0	0	1	0	0	0	1	0
	$Df : \hat{\theta}_{sj}$	0	1	1	1	1	1	1	1
	f_{sj}	0	0	1	0	0	0	1	0
Châssis	m	0	0	0	1	1	1	1	0
	J	0	0	0	0	0	1	1	1
	$Df : \dot{u}$	0	0	1	1	1	1	1	0
	$Df : \dot{v}$	0	0	0	1	1	1	1	0
	$Df : \psi$	0	0	0	1	1	1	1	0

TABLE 5.3 – Matrice de signature de défauts (MSD)

l'ensemble des noeuds d'observations. Une partie des chemins de propagation de défauts sur le BGS ainsi que les conflits possibles déduits sont donnés par la figure 5.14.

5.13 Implémentation des algorithmes de diagnostic

5.13.1 Outils utilisés

Considérons maintenant le cas d'un scénario de défaut afin d'illustrer toute la procédure de diagnostic. Les scénarios de défauts traités dans cette section ne concernent que les éléments du système électromécanique du RobuTainer comme nous l'avons défini précédemment. Les tests sont effectués sur un logiciel de simulation de la dynamique des véhicules (CALLAS/SCANeR Studio) et sont basés sur des données réelles du RobuTainer.

La plate-forme logicielle démonstrateur CALLAS/SCANeR studio a été conçue dans le cadre du projet européen InTraDE afin d'implémenter et de tester les modèles et les algorithmes de diagnostic générés fournissant ainsi un outil d'aide à la prise de décision embarqué. Cette démarche vise à améliorer la sécurité du système de transport avant sa conception industrielle et à tester tous les scénarios de défauts plausibles.

Dans notre étude, une co-simulation est effectuée à l'aide d'un

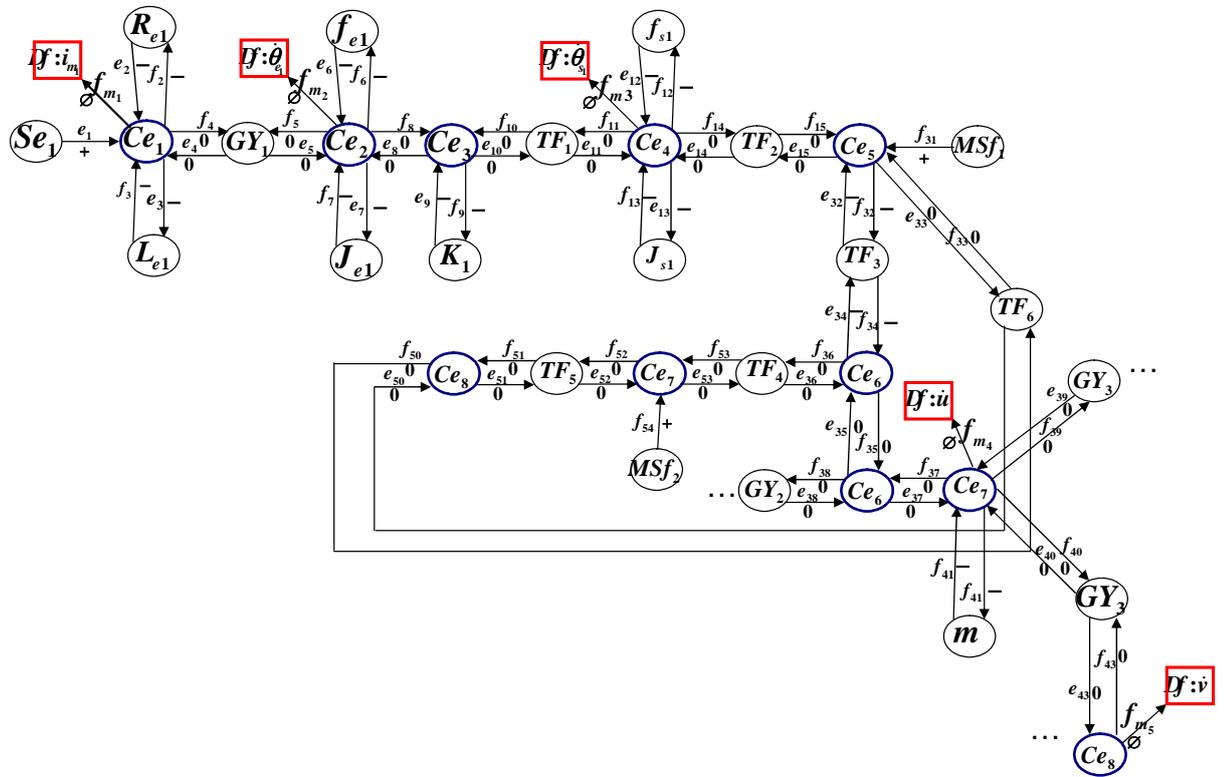


FIGURE 5.13 – BGS du RobuTainer déduit à partir du BG correspondant

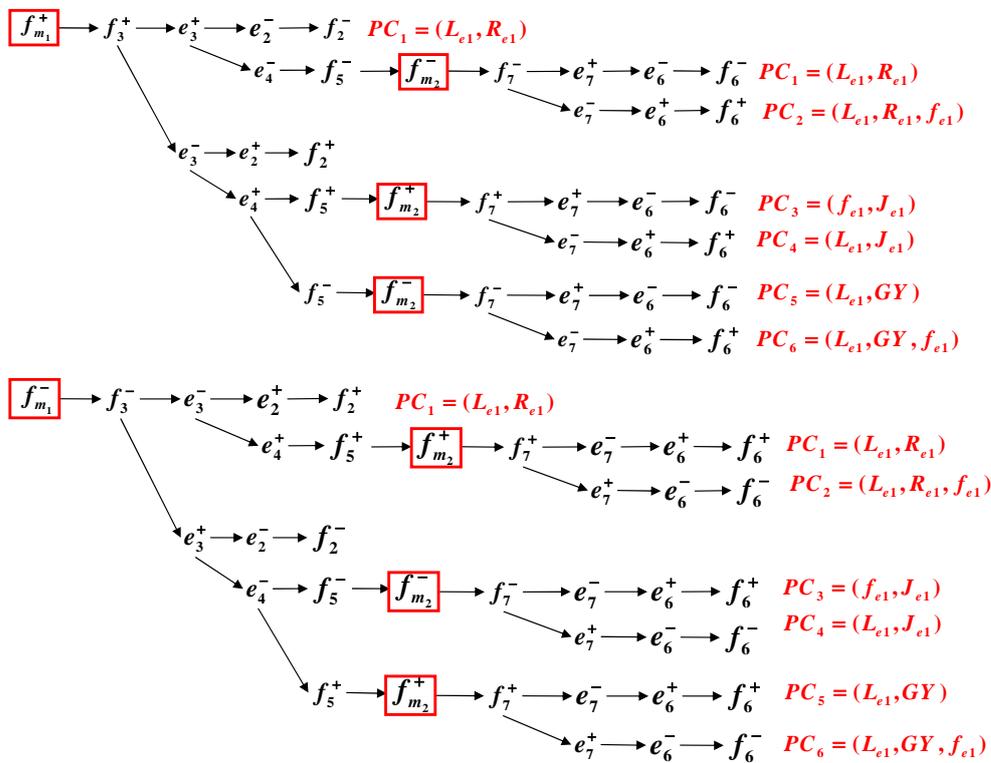


FIGURE 5.14 – Propagation de défauts sur le BGS et conflits possibles déduits

programme mis en oeuvre sous la boîte à outils Matlab/Simulink qui présente la dynamique du moteur de traction du RobuTainer et un autre programme mis en oeuvre sous forme CAL-LAS/SCANeR studio où toutes les dynamiques du RobuTainer sont validées à partir d'expériences et à l'aide de données réelles.

5.13.2 Scénario de défauts

Dans ce scénario de défauts, nous supposons que le capteur de courant électrique fonctionne correctement. Nous avons introduit deux défauts qui concernent respectivement le paramètre d'inertie J_{e1} et l'inductance L_{e1} à l'instant 100s. Les résultats de simulation de ce scénario de défauts sont fournis par la figure 5.15. Nous notons que la valeur du courant électrique mesurée f_2 augmente ainsi que la valeur de la vitesse angulaire du moteur f_5 . Ces deux variables correspondent aux noeuds d'observation et donc du point de départ de notre analyse de diagnostic. Ces observations sont traduites sur le BGS par la variable f_{m_1} qui prend le signe '+' et la variable f_{m_2} qui prend le signe '+' également. De plus, l'évaluation des résidus suite à l'introduction de ces deux défauts simultanés est donnée aussi par la figure (Fig.5.15).

Nous notons que les résidus R_3 , R_4 , R_5 et R_6 ne sont pas sensibles aux défauts. Ce résultat correspond au vecteur de signature de défaut suivant $V = (1, 1, 0, 0, 0, 0)$. Cette signature nous mène à considérer tous les paramètres sensibles aux résidus R_1 et/ou R_2 et en l'occurrence les six premiers paramètres de la matrice de signature de défauts (voir table 5.3). Il est à noter que cette matrice se base sur l'hypothèse de défauts simples. Néanmoins, ceci conduit à un faux résultat dans le cas de notre scénario de défauts car la sensibilité des deux résidus R_1 et R_2 d'un point de vue du raisonnement quantitatif est expliquée par un seul élément et en l'occurrence le défaut du capteur de vitesse angulaire du moteur de traction. Nous avons choisi de présenter ce scénario parmi tant d'autres afin de démontrer l'intérêt de l'approche à base du BGS. En effet, la détermination de la propagation des défauts sur le BGS est donnée par la figure 5.13.

Cet arbre de propagation ainsi que les observations de la figure 5.15) nous mène à considérer les conflits possibles PC_3 et PC_4 pouvant expliquer les symptômes. A partir de la matrice (Table 5.3), le conflit possible PC_4 peut être éliminé car les fautes can-

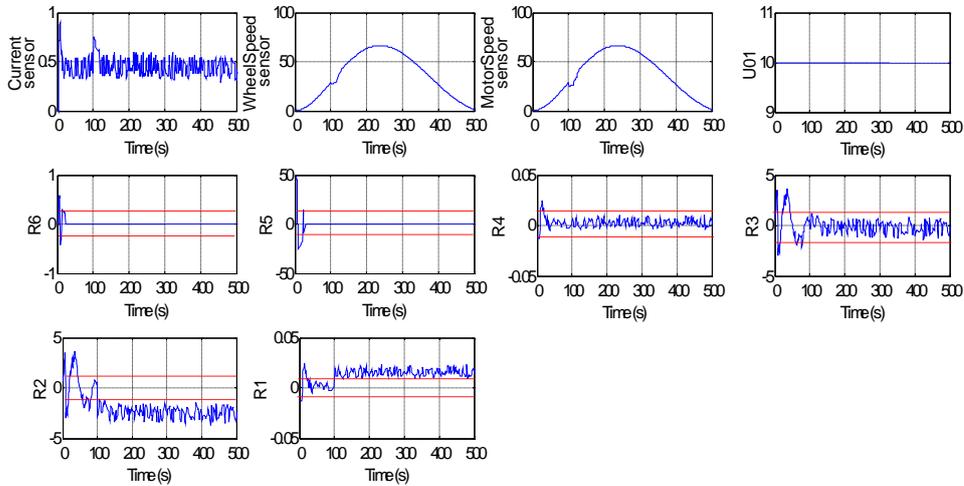


FIGURE 5.15 – Mesures obtenues suite à l'introduction de défauts

didates impliquées dans ce dernier supposent que le résidu R_1 ne réagit pas alors que ce n'est pas le cas. Ainsi, nous déduisons, à partir de la matrice de signature de défauts et de l'analyse qualitative sur le BGS, que le conflit possible PC_3 incluant les éléments J_{e1} et L_{e1} est le plus à même d'expliquer les différentes observations (déviations des paramètres et évaluation des résidus).

Le raisonnement qualitatif s'avère alors être un outil incontournable pour compenser les limites de l'approche quantitative. Finalement, même si le raisonnement qualitatif peut améliorer la procédure d'aide à la prise de décision, dans certains cas on ne peut trouver que des résultats partiels surtout lorsqu'on ne trouve pas de cohérence entre les résultats issus du modèle quantitatif et ceux issus du modèle qualitatif.

5.14 Modélisation fonctionnelle hors-ligne du RobuTainer

L'objectif de cette partie est la conception d'un système de supervision représentant la gestion des modes de fonctionnement à chaque instant et les conditions de reconfiguration du RobuTainer par un automate fini qui spécifie les conditions de changement de modes en fonction de la disponibilité des services

sous-jacents à chaque mode. En effet, l'information gérant la transition est issue des résultats des algorithmes de diagnostic de défauts simples et multiples et que nous avons présenté dans la partie précédente. Donc par rapport aux approches classiques, nous déduisons dans ce travail l'état non seulement d'un composant mais d'un ensemble de composants associés à une fonction bien définie. Par conséquent, l'isolation du défaut est réalisée sur une fonction (ensemble d'éléments Bond Graph) et non sur un composant. A chaque mode de fonctionnement (noeud du graphe) représenté par l'ensemble des services, sont définis des modèles Bond Graph.

Nous avons donc appliqué le Modèle Générique de Composant (MGC). Ce dernier décrit le RobuTainer à partir des services rendus par ses composants. Les services sont organisés en sous-ensembles cohérents par rapport à une situation donnée et un ensemble d'objectifs à réaliser correspondant à des modes de fonctionnement. Le BG et le BGS permettent de décrire, d'un point interne, comment chaque service et comment chaque objectif est réalisé. La procédure de diagnostic proposée fournit à l'automate les conditions de passage d'un mode à un autre pour l'activation de la transition.

5.14.1 Objectifs du RobuTainer et leurs organisations

Dans le cadre du projet européen InTraDE, sept objectifs et cinq modes de fonctionnement sont définis pour le RobuTainer, comme suit :

* Objectifs :

- O1 : Ne pas bouger.
- O2 : Suivre une trajectoire.
- O3 : Porter une charge (un conteneur).
- O4 : Faciliter le chargement et le déchargement.
- O5 : Se garer facilement.
- O6 : Assurer la durabilité du véhicule.
- O7 : Assurer la sécurité de l'environnement.

* Modes de Fonctionnement (MdF)

- MdF1 : Le RobuTainer est garé et non utilisé. Le véhicule étant en bon état de fonctionnement (sans défauts).
- MdF2 : RobuTainer est en mouvement, sans charge et se diri-

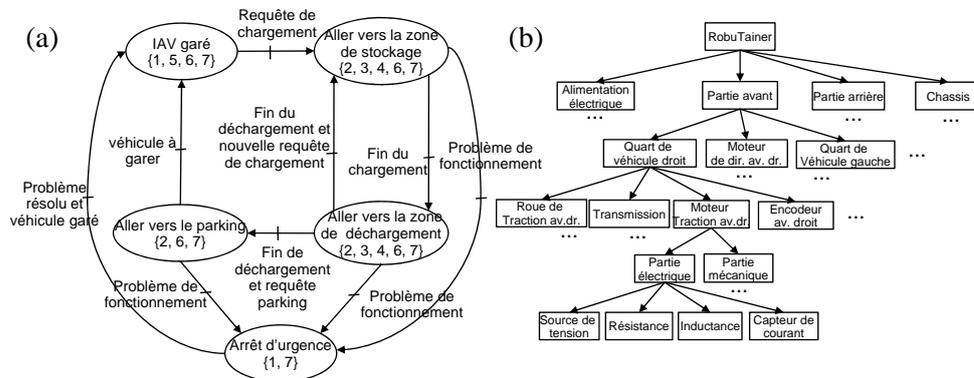


FIGURE 5.16 – (a) Automate décrivant le passage d'un MdF à un autre (b) décomposition matérielle du RobuTainer

geant vers la station de chargement.

- MdF3 : RobuTainer est en mouvement, avec une charge et se dirigeant vers la station de déchargement.
- MdF4 : RobuTainer retourne vers le parking.
- MdF5 : RobuTainer est à l'arrêt à cause de la détection d'un obstacle ou d'un dysfonctionnement majeur.

L'automate décrivant les MdFs est donné par la figure 5.16(a), où la notation $\{*\}$ spécifie les objectifs que le RobuTainer doit réaliser pour un MdF donné.

5.14.2 Décomposition matérielle du RobuTainer

La décomposition matérielle du RobuTainer est (partiellement) donnée par la figure 5.16(b). Celle-ci fait apparaître deux sous-systèmes identiques : la partie avant et la partie arrière du véhicule. Seule la décomposition de la partie avant est donnée et elle fait apparaître quatre sous-systèmes : les sous-systèmes de direction avant gauche, avant droit ainsi que les systèmes de traction gauche et droit du véhicule. Seule la décomposition du quart avant-droit du véhicule est donnée car c'est cette partie que nous allons utiliser pour illustrer notre approche dans ce qui suit. Afin de réaliser la décomposition complète du RobuTainer, nous avons eu recours au logiciel VUE (Visual Understanding Environment) [VUE], qui fournit un environnement visuel flexible pour structurer, présenter des données. Un aperçu est

donné par la figure 5.17.

Réalisation des objectifs du RobuTainer La réalisation des objectifs de RobuTainer repose sur les services fournis par les composants de ce dernier. L'ensemble des versions permettant la réalisation d'un objectif peut être automatiquement déduit à partir de la décomposition de matérielle du RobuTainer en suivant une approche ascendante et en considérant que les services du niveau inférieur sont utilisés comme ressources pour les services du niveau supérieur. Prenons, comme exemple, les composants internes d'un quart de véhicule (cf. figure 5.16(b)). Le moteur à courant continu (moteur de traction) fournit le service "Générer le couple moteur" qui est consommée par la partie transmission. Celle-ci fournit le service "Transmettre le couple moteur" à la roue qui réalise à son tour le service "Absorber le couple moteur". Ces trois services associés au service "Mesurer la vitesse angulaire" (fournie par l'encodeur) permettent à l' i^{me} quart du véhicule de réaliser le service "Contrôler la vitesse de rotation de la i^{me} roue "(cf. figure 5.18). En associant les deux services qui commandent les deux roues d'un même côté (avant ou arrière), les services de niveau supérieur "Contrôler la vitesse de la partie avant (ou arrière)" et "Contrôler la direction de la partie avant (ou arrière)" sont obtenus. De plus, il existe deux versions pour le service de contrôle de la direction avant (arrière). L'une est obtenue grâce au service fourni par le système de direction et l'autre est réalisé par l'application de vitesses de rotation différentes sur les roues. Suivant ce principe, les différentes possibilités de réalisation de l'objectif "O2 : Suivre une trajectoire" sont automatiquement trouvées. Elles sont en partie données par la figure 5.18.

5.15 Supervision en ligne du RobuTainer

Pour surveiller correctement le RobuTainer, nous avons développé dans un premier temps une interface graphique permettant de simuler les différents défauts plausibles en rajoutant des blocs de perturbations au niveau des différents paramètres du système électromécanique et en l'occurrence le moteur de traction et en utilisant comme entrées des données réelles acquises à partir des

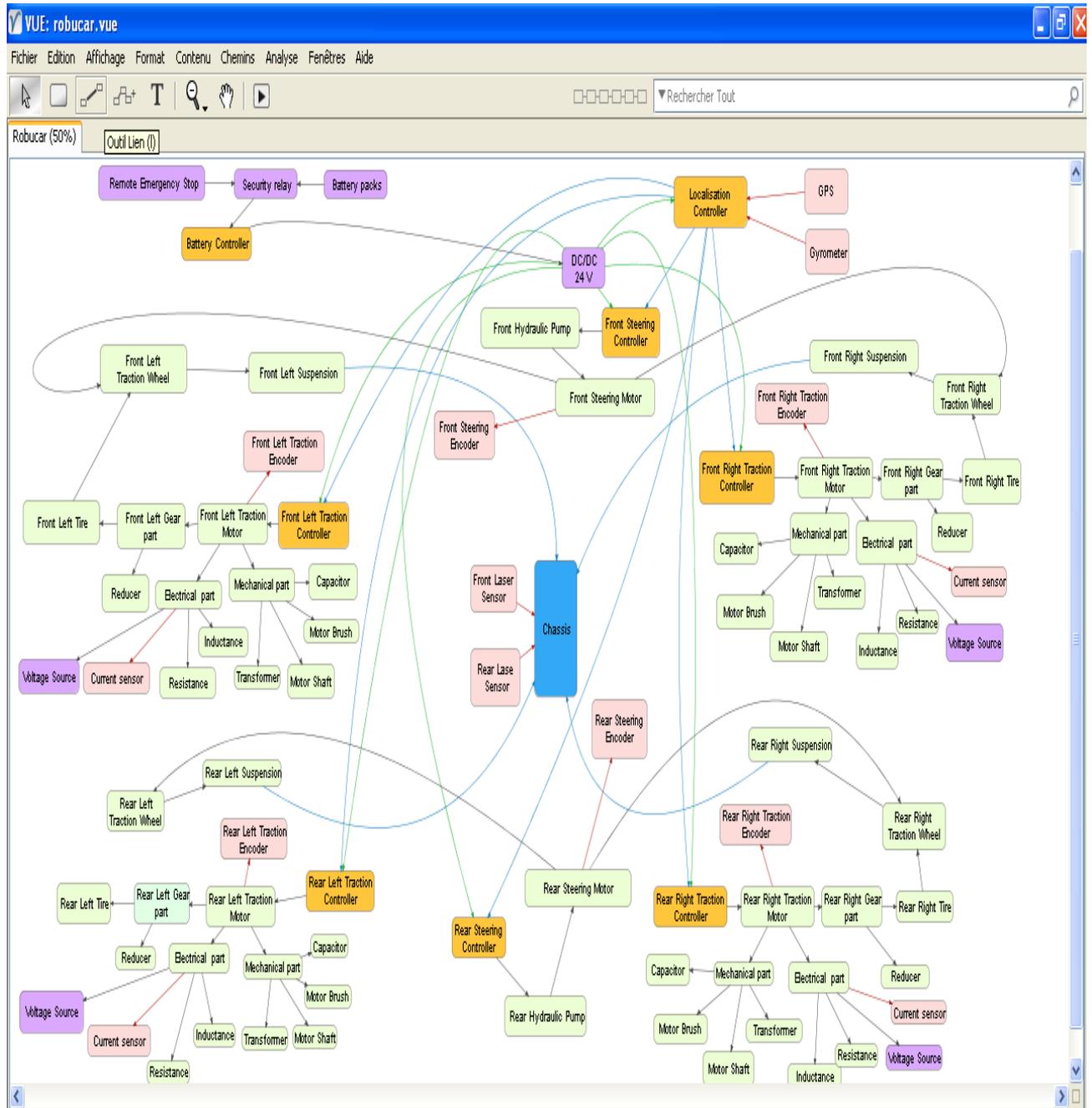


FIGURE 5.17 – Aperçu de la décomposition du RobuTainer moyennant le logiciel VUE

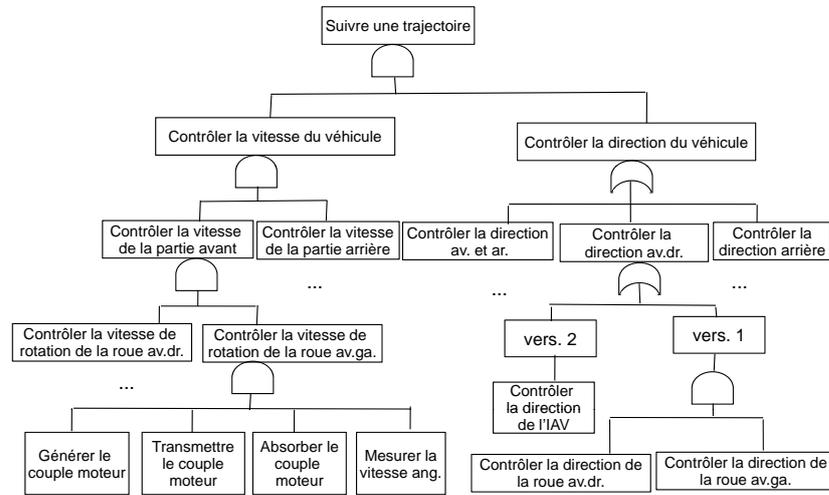


FIGURE 5.18 – Arbre ET/OU associé à l'objectif O2

différents capteurs. L'idée est de pouvoir valider l'algorithme de diagnostic présenté précédemment en estimant l'influence des différents défauts (même ceux que nous ne sommes pas à même d'introduire directement sur le véhicule au risque de le détériorer). L'interface de supervision représentée sur la figure 5.19 permet également de calculer les différents résidus concernant le système électromécanique (les trois premiers résidus de la matrice de signature présenté précédemment) et de déterminer la signature correspondante ainsi que le mode de fonctionnement.

La deuxième étape de la validation de notre algorithme, passe par le logiciel ScannerStudio pour l'évaluation en ligne des résidus en exploitant les résultats obtenus par simulation notamment pour la propagation des défauts sur le BGS. Ainsi, la supervision en ligne se fait moyennant le logiciel ScannerStudio qui permet (1) de construire le terrain sur lequel évolue le véhicule (moyennant la superposition d'un google earth map), (2) d'introduire le modèle du RobuTainer ainsi qu'une représentation 3D de ce dernier, (3) de tester des scénarios de défauts et (4) d'analyser les résultats obtenus (voir figure 5.20). Le démonstrateur ScannerStudio a été conçu dans le cadre du projet InTraDE et permet de visualiser en temps réel l'évolution du véhicule sur le terrain virtuel créé en amont et permet également de commander le véhicule par l'intermédiaire d'un cockpit qui y est connecté. SCA-

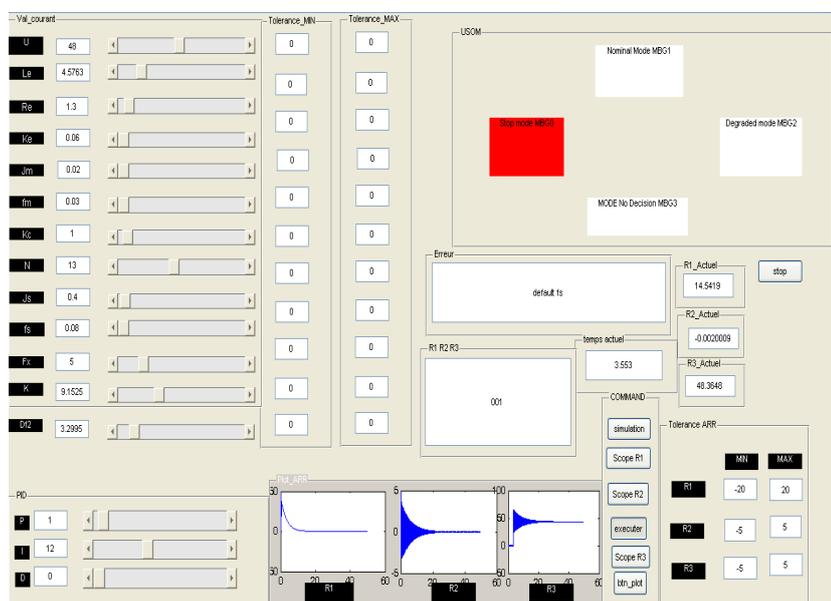


FIGURE 5.19 – Interface graphique développée pour la simulation de défauts moyennant des données réelles

NeR Studio est donc couplé avec un cockpit de véhicule avec un retour d'effort en corrélation direct avec le RobuTainer (voir la figure 5.21). Plus de détails sur le démonstrateur ScannerStudio peuvent être trouvés en annexes.

5.15.1 Scénario de défauts

Prenons le scénario de défauts présenté et traité précédemment. Nous avons réussi à pallier les limites de la matrice de signature de défauts en exploitant le raisonnement qualitatif à base du BGS. Pour le scénario de défaut considéré, nous avons réussi à détecter et à isoler les deux défauts liés respectivement au paramètre d'inertie J_{e1} et à l'inductance L_{e1} . Ce résultat de diagnostic nous permet de déduire que le service "Générer le couple moteur" n'est plus disponible. La figure 5.18 montre que l'indisponibilité de ce service implique l'indisponibilité des services "Contrôler la vitesse de rotation de la roue avant gauche" et "Contrôler la vitesse du véhicule". Ainsi, la réalisation de l'objectif "O2 : Suivre une trajectoire" n'est plus possible. Cet objectif est critique pour le MdF2 donc le RobuTainer passe à un MdF dans lequel cet objectif n'apparaît plus et en l'occurrence

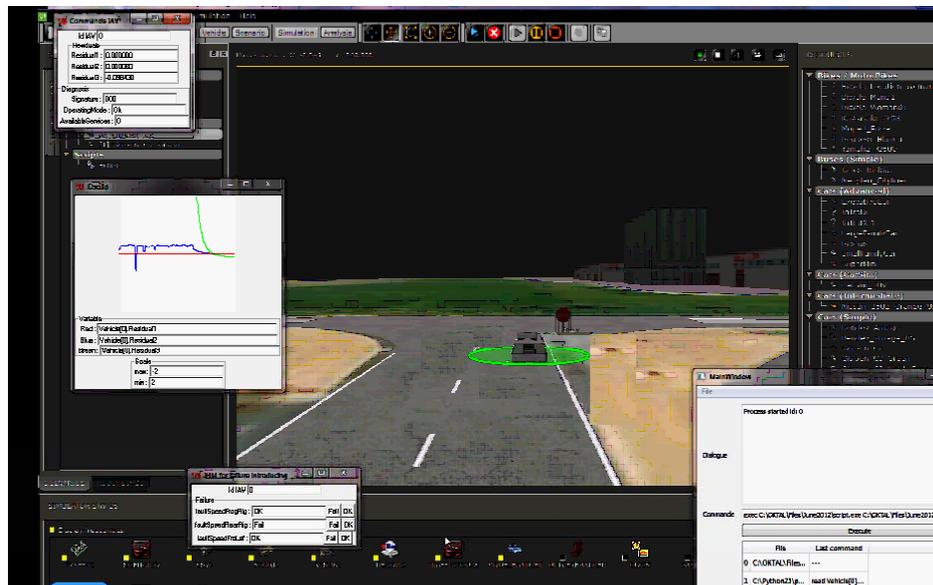


FIGURE 5.20 – Supervision moyennant le démonstrateur ScannerStudio

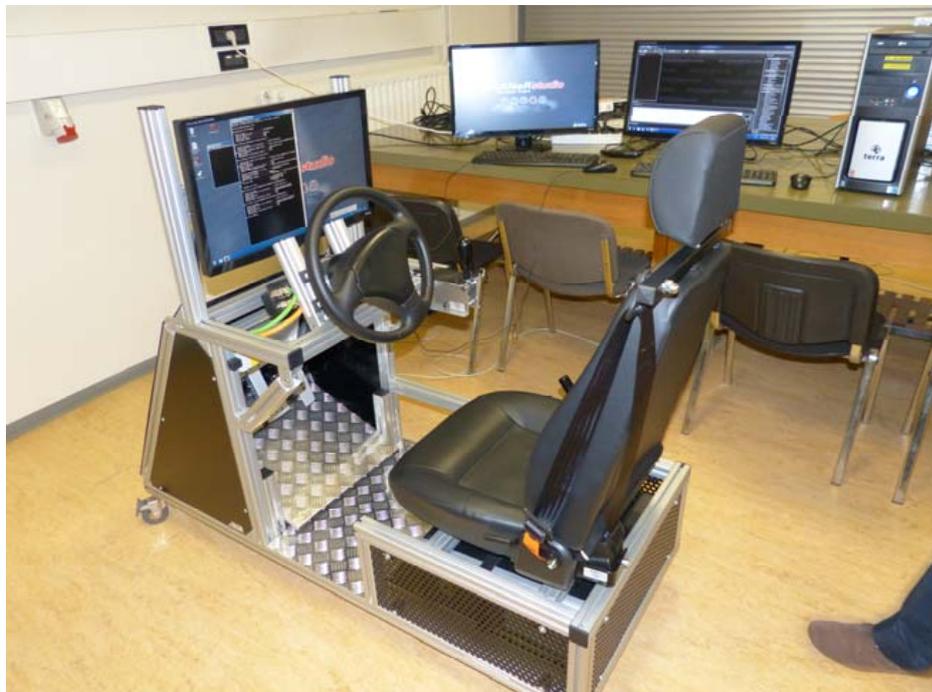


FIGURE 5.21 – Cockpit connecté à ScannerStudio

le MdF5 correspondant à l'arrêt d'urgence.

5.16 Conclusion

L'application proposée dans cette partie a permis de tester la robustesse vis-à-vis du diagnostic des défauts multiples de l'algorithme proposé. L'application a été faite sur un système électromécanique et en l'occurrence un véhicule électrique autonome réel conçu dans le cadre du projet européen InTraDE. Cette application montre l'utilité du raisonnement qualitatif à base du BGS surtout lorsqu'on le combine avec l'analyse structurelle à base de BG pour la génération d'indicateurs de défauts. Nous avons vu aussi que le modèle générique de composants permet de décrire une entité selon les services qu'elle fournit et leur organisation en modes de fonctionnement. Il explicite la relation fonctionnelle qui existe entre un système, ses sous-systèmes et les composants d'un sous-système.

Cette description facilite le raisonnement des opérateurs humains. Elle offre une représentation claire des réelles possibilités de conduite d'un système. De plus, l'algorithme de diagnostic proposé et le formalisme du BGS permettent la modélisation comportementale du système qui explicite la réalisation de chaque fonction. La complémentarité de ces approches a été illustrée, pour des raisons de clarté, sur un exemple restreint, le système électromécanique du RobuTainer.

CHAPITRE 6

Conclusion et perspectives

Sommaire

6.1 Conclusion	143
6.2 Perspectives	145

6.1 Conclusion

Le travail de recherche effectué dans ce mémoire présente une contribution traitant du diagnostic de défauts simples et multiples sur des systèmes pluridisciplinaires. L'objectif de ce travail a été de proposer une stratégie de diagnostic globale pour la gestion des modes de fonctionnement du système à étudier en situations normale et anormale moyennant le BG comme outil de modélisation et de génération d'algorithmes de diagnostic. Pour ce faire, un formalisme générique, le BGS fonctionnel, a été développé afin de rajouter au BG certaines caractéristiques lui permettant d'inclure le raisonnement qualitatif. La stratégie de diagnostic qui a été proposée englobe donc des concepts et techniques issus des deux communautés FDI et DX. Cette stratégie s'inscrit, elle-même, dans une démarche qui implique trois niveaux conceptuels fondamentaux (différents mais cohérents) permettant d'avoir une description qui facilite le raisonnement des opérateurs humains et qui offre une représentation claire des réelles possibilités de conduite d'un système.

Dans un premier temps, même si le BGS peut être généré à partir du système physique étudié, un algorithme spécifique a été défini afin de pouvoir le faire directement à partir du modèle BG. Ceci offre l'avantage de travailler sur des sémantiques équivalentes, facilement compréhensibles et utilisables par toute personne habituée à la modélisation BG.

Par la suite, la définition du BGS comme outil graphique incluant une composante qualitative a permis de développer une approche par abduction basée sur l'étude de la propagation de défauts sur ce dernier à partir des noeuds d'observations. Cette approche a fourni une description du système à surveiller et a présenté une solution pour aborder le problème de détection et d'isolation des défauts multiples. En effet, les résultats générés hors ligne à partir de cette approche et en l'occurrence les ensembles de défauts (conflits possibles) pouvant expliquer les observations sont utilisés en ligne et sont comparés à ceux (résultats) obtenus par l'évaluation des RRAs déduites des propriétés causales et structurelles du BG. Cette comparaison est basée sur un algorithme qui a été développé et qui a permis d'obtenir des résultats cohérents car le modèle BGS est généré à partir du BG.

Les résultats obtenus à partir de ce raisonnement qualitatif et quantitatif permettent de mettre à jour le graphe de gestion des modes de fonctionnement et la liste des services disponibles issus des modèles fonctionnels établis. En effet, un Modèle Générique de Composants (MGC) a été également proposé dans ce mémoire afin de prendre en considération les aspects physiques et fonctionnels du système à étudier. Chaque fonction est décrite de façon non ambiguë par un modèle comportemental donné sous la forme d'un BGS. Et les résultats issus de l'algorithme global du diagnostic qui a été proposé, permettent d'évaluer la possibilité de réaliser telle ou telle fonction et ainsi de définir à chaque instant le mode de fonctionnement du système.

Le travail présenté dans ce mémoire a été développé dans le cadre du projet européen InTraDE. Les algorithmes proposés ont été appliqués et validés sur des bancs de test virtuels et en l'occurrence moyennant un démonstrateur temps réel ScannerStudio qui a été conçu dans le cadre du projet. La partie qui a

été concernée par l'application est le système électromécanique de traction d'un prototype de véhicule électrique autonome. Les résultats fournissent un outil d'aide à la décision pouvant être intégré sous forme d'un module de diagnostic embarqué et qui est en cours de transfert aux partenaires industriels du projet. Un second défi a été lancé durant cette thèse et a consisté à prouver la généralité des algorithmes développés en considérant une application de nature différente et en l'occurrence la PàC à membrane échangeuse de protons. Nous sommes restés en phase de simulation mais les résultats ont été concluants et nous ont permis d'avoir un spectre plus large notamment vis-à-vis des applications pouvant être considérées.

6.2 Perspectives

Le pronostic de défauts est une thématique en perspective car c'est un domaine de recherche relativement récent qui suscite de plus en plus l'intérêt de la communauté scientifique. En effet, nous avons prouvé l'efficacité du BGS dans le domaine du diagnostic est notamment la détection et l'isolation de défauts simples et multiples. Mais il serait judicieux de l'utiliser pour aborder le domaine du pronostic et en l'occurrence l'anticipation ou la prédiction des éventuelles dégradations pouvant affecter un système dynamique car le BGS permet de prendre en considération des propriétés fonctionnelles, structurelles et causales qui associées à des approches probabilistes pourraient éventuellement donner des résultats intéressants.

Une deuxième perspective consiste à appliquer les algorithmes développés sur une réelle pile à combustible PEM afin de pouvoir se rendre compte des limites de notre approche sur un système aussi complexe et ainsi proposer des améliorations et cerner les limites de notre approche.

ANNEXES

ANNEXE **A**

Simulation 3D - temps réel via ScanerStudio

Sommaire

A.1	Qu'est ce que ScanerStudio ?	149
A.2	Différents modes d'utilisation de ScanerStudio pour la simulation temps réel	151
A.2.1	Mode terrain	151
A.2.2	Mode véhicule (Vehicle Mode)	151
A.2.3	Mode Scenario (Mode scénario)	153
A.2.4	Mode simulation	153
A.2.5	Mode analysis (Mode d'analyse de données)	154

A.1 Qu'est ce que ScanerStudio ?

Le logiciel ScanerStudio est un logiciel de simulation 3D-temps réel du trafic de véhicules. Il dispose d'une configuration flexible et modulaire ce qui signifie qu'il offre la possibilité d'utiliser, de rajouter ou de regrouper différents modules en fonction des besoins de l'application. Les principales caractéristiques de ce logiciel sont comme suit :

- Il offre une architecture distribuée.

- Il dispose d'une IHM (Interface Homme-Machine) conviviale.
- Il est multi plateformes (Windows XP, Vista, Windows 7, RT OS).
- Il offre la possibilité d'intégrer ou d'être intégré dans des logiciels tiers tels que Matlab-Simulink, CALLAS-Prosper...
- Il permet de stocker les paramètres de simulation sous formes de fichiers XML afin de les analyser ultérieurement.
- Il permet de créer et d'intégrer des APIs (Application Programming Interfaces) externes qui peuvent être programmées moyennant différents langages de programmation. Il nous a donc permis l'implémentation d'algorithmes de diagnostic à travers des scripts appropriés.
- Il permet la visualisation dynamique des objets 3D tel est le cas des conteneurs, obstacles...
- Il permet la création de terrains fidèles à la réalité par superposition d'un modèle issu d'une base de données cartographiques tel est le cas de Google Earth. Il permet ainsi de retranscrire le comportement d'un véhicule réel sur l'environnement de visualisation. Il permet donc de faire à la fois de la simulation de scénarios et la supervision temps réel.

En effet, le simulateur ScannerStudio de part sa flexibilité et sa compatibilité avec de nombreux langages de programmation (Java, C/C++, Python, FORTRAN ...) nous a offert la possibilité d'intégrer des modules externes, supplémentaires et dédiés à différentes tâches à savoir l'approche de diagnostic développée dans ce mémoire, la supervision approfondie à différentes échelles (macro, micro), suivi et contrôle de véhicules...

Cette intégration est facile à mettre en place et personnalisable tel est l'exemple de l'API que nous avons présentée dans la deuxième application et qui permet d'évaluer les résidus, de définir l'ensemble des fautes candidates en fonction de l'analyse faite hors ligne moyennant le BGS, de déterminer ainsi les services disponibles et le mode de fonctionnement adéquat.

Ainsi l'environnement ScannerStudio se positionne d'une part comme outil d'interopérabilité, permettant de faire cohabiter des simulateurs de technologies hétérogènes (Matlab, Simulink, Callas, etc) mais aussi en tant qu'environnement de développement collaboratif vu que plusieurs intervenants peuvent travailler sur un même terrain mais en développant des programmes différents vu qu'il s'agit d'une plateforme de supervision de systèmes réels

grâce à sa fonctionnalité intégrée de distribution sur un réseau hétérogène. Scaner Studio a donc permis de récupérer les données du véhicule, de retracer sa trajectoire en temps réel sur un environnement virtuel et de permettre à l'opérateur d'avoir une vision globale sous forme d'outils d'aide à la prise de décisions.

A.2 Différents modes d'utilisation de ScanerStudio pour la simulation temps réel

A.2.1 Mode terrain

Ce mode est la base de toute simulation temps réel vu qu'il permet de créer un terrain qui retranscrit, d'une façon fidèle à la réalité, l'environnement dans lequel évolue le véhicule à superviser. Ceci se fait moyennant une superposition d'une cartographie 3D (Google Earth) d'un terrain et par la création de profils de routes, de bâtiments, de panneaux de signalisation ... grâce à une panoplie d'outils fournie par ScanerStudio. La figure A.1 représente le terrain du port d'Oostend (Belgique) créé à partir de ce logiciel.

A.2.2 Mode véhicule (Vehicle Mode)

Le mode "Vehicle" représente la partie dynamique du logiciel ScanerStudio. Dans ce mode, l'utilisateur est en mesure d'introduire le modèle comportemental du véhicule dont on veut simuler les différentes dynamiques. En effet, chaque véhicule est décrit par un modèle qui peut être directement défini par l'introduction des paramètres des différentes parties du véhicule en se référant à un modèle prédéfini sur ScanerStudio. Il est également possible d'associer à un véhicule un modèle qui provient du logiciel Matlab-Simulink par exemple. Ceci permet par la suite d'analyser le comportement du véhicule, de définir la position et la vitesse de ce dernier, son itinéraire, les capteurs dont il dispose et d'exécuter des scénarios de test. La figure A.2 présente un aperçu du mode "Vehicle".

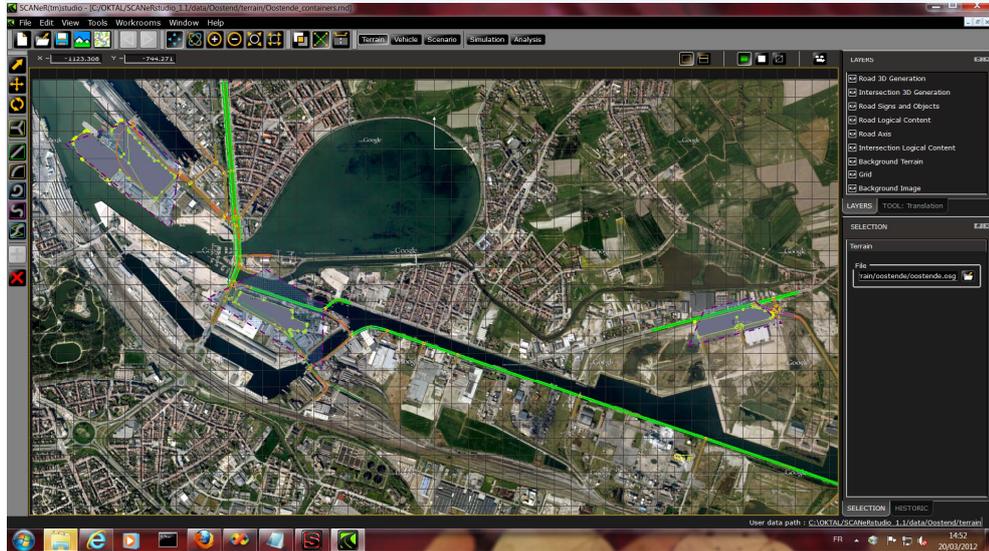


FIGURE A.1 – Mode terrain : création de l'environnement virtuel du port d'Oostend

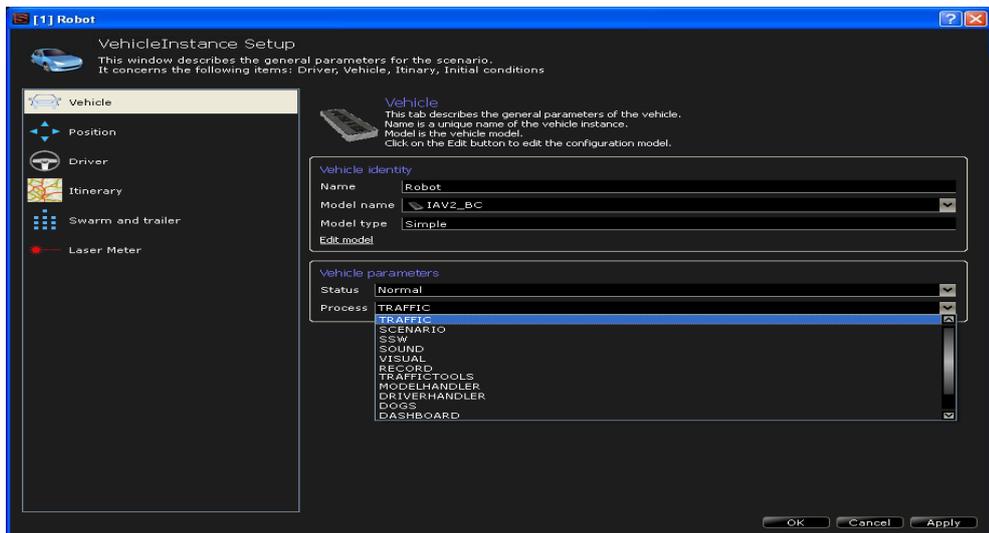


FIGURE A.2 – Mode véhicule : spécifications du RobuTainer

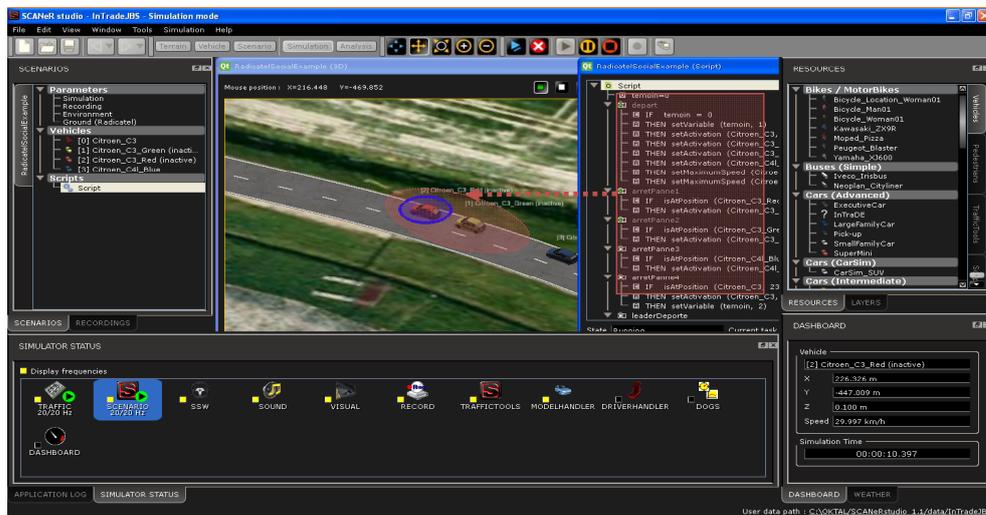


FIGURE A.3 – Mode scénario : création d'un scénario de test

A.2.3 Mode Scenario (Mode scénario)

Le mode "Scenario" est un mode qui permet de sélectionner le terrain qui a été créé dans le mode Terrain et de placer les véhicules dont on veut simuler le comportement sur ce terrain. Ces véhicules peuvent être interactifs c'est-à-dire qu'ils sont gérés par des modules externes ou bien autonomes c'est-à-dire gérés par un module interne à ScannerStudio. Dans le mode Scenario, plusieurs éléments peuvent être rajoutés tel est le cas des puits et sources. En effet, les éléments sources permettent de créer un flux aléatoire de véhicules par unité de temps et qui interagissent avec les véhicules dont on veut étudier le comportement. Les véhicules de ce flux disparaissent dès qu'ils atteignent l'élément puits. Ainsi, nous pouvons créer n'importe quel scénario réaliste sur les différents terrains qui ont été créés. Un aperçu de ce mode est donné par la figure A.3.

A.2.4 Mode simulation

Le mode "simulation" permet d'exécuter le scénario créé et défini en mode "Scenario". Il permet également de lancer les différents modules gérant la commande, la trajectoire... des véhicules interactifs impliqués dans le scénario. Différents modules existent et doivent être également lancés lors de la simulation comme le module Physics qui permet de prendre en considération la



FIGURE A.4 – Mode simulation : simulation du scénario créé

dynamique des objets tel est le cas des conteneurs, le module Visual qui permet une visualisation 3D du véhicule sélectionné, le module Record qui permet d'enregistrer toutes les données de simulation pour pouvoir les exploiter dans le mode "Analysis", le module SSW qui permet de commander le véhicule via le cockpit...

Il y a également les modules externes qui sont associés aux APIs correspondant au module de diagnostic, d'optimisation... comme le montre la figure A.6. Un aperçu du mode "Simulation" est donné par la figure A.4.

A.2.5 Mode analysis (Mode d'analyse de données)

Les résultats de simulation peuvent être visualisés sous forme de graphiques, ils peuvent également être affichés sous formes de tableaux Excel, ou présentés d'une façon dynamique grâce à des animations 3D. Cela est possible en mode "Analysis" qui permet de récupérer toutes les données relatives à tous les véhicules impliqués dans le scénario de test. Toutes les données issues des capteurs du vrai véhicule lorsqu'il est connecté à ScannerStudio peuvent être également affichées en mode Analysis. Un aperçu de ce mode est donné par la figure A.5

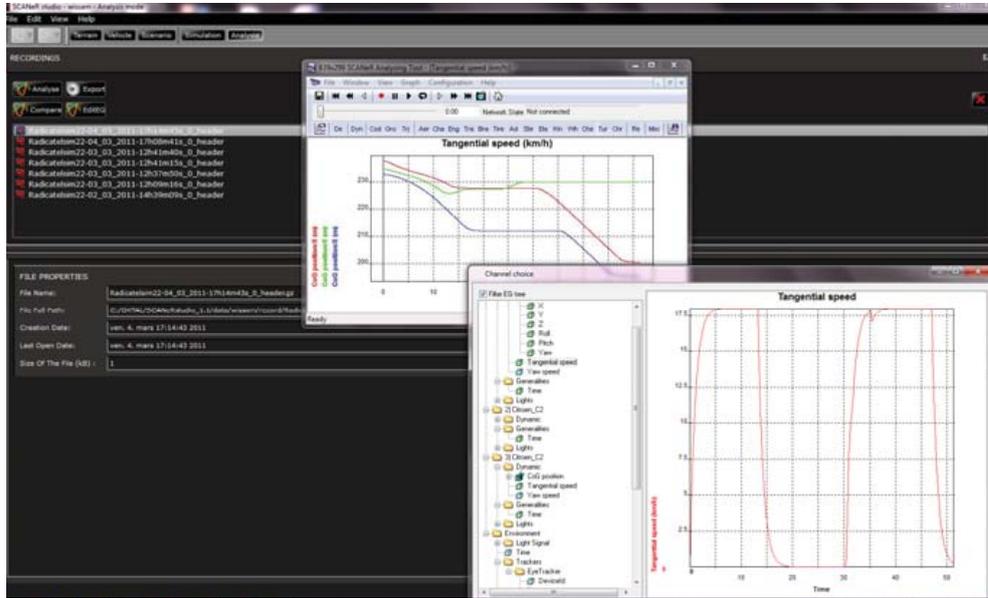


FIGURE A.5 – Mode d'analyse de données

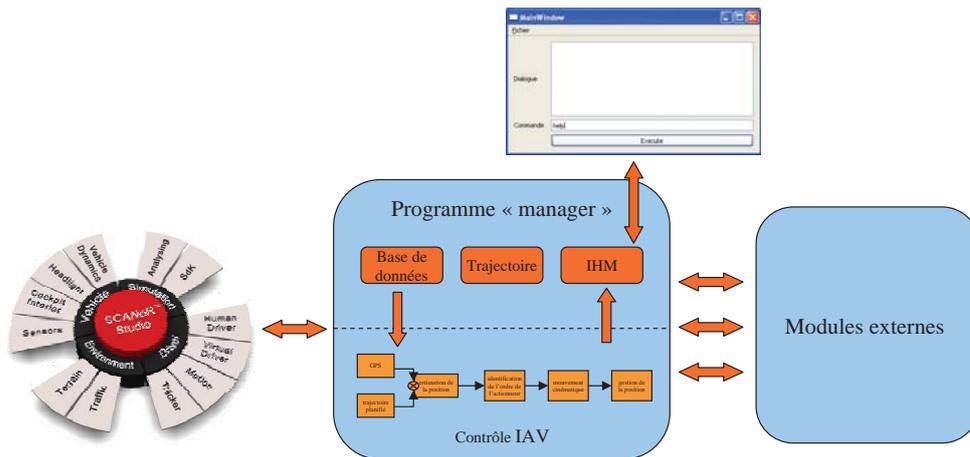


FIGURE A.6 – Modules externes connectés à ScannerStudio

ANNEXE B

Algorithme de génération du BGS à partir du BG

B.1 Algorithme de génération du BGS à partir du BG

L'algorithme présenté brièvement dans le troisième chapitre et qui permet de déduire le BGS directement à partir du BG est donné ci dessous :

Algo. 1 : Construire le BGS à partir du BG

Entrée : $BG(X, B)$
 $BGS.X \leftarrow BG.X, BGS.A \leftarrow \{\}$
pour tout $BG.b$ tel que $b.x_i \in Se \cup MSe$ **faire**
 créer $a = (b.x_i, e, +, b.x_j)$
 $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$
fin pour
pour tout $BG.b$ tel que $b.x_i \in Sf \cup MSf$ **faire**
 créer $a = (b.x_i, f, +, b.x_j)$
 $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$
fin pour
pour tout $BG.b$ tel que $b.x_i \in De$ **faire**

```

    créer  $a = (b.x_j, e_m, \phi, b.x_i)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$ 
fin pour
pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_i \in Df$  faire
    créer  $a = (b.x_j, f_m, \phi, b.x_i)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a\}$ 
fin pour

pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_j \in I$  faire
    créer  $a_1 = (b.x_j, f, -, b.x_i)$ 
    créer  $a_2 = (b.x_i, e, -, b.x_j)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a_1, a_2\}$ 
fin pour

pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_j \in C$  faire
    créer  $a_1 = (b.x_j, e, -, b.x_i)$ 
    créer  $a_2 = (b.x_i, f, -, b.x_j)$ 
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a_1, a_2\}$ 
fin pour

pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_j \in TF \cup GY$  faire
    si  $b.c = j$  alors
        créer  $a_1 = (b.x_i, e, 0, b.x_j)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_j, f, 0, b.x_i)$ 
    si non
        créer  $a_1 = (b.x_i, f, 0, b.x_j)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_j, e, 0, b.x_i)$ 
    fin si
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a_1, a_2\}$ 
fin pour

pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_j \in R$  faire
    si  $b.x_i \in J_1$  alors
        si  $\exists a \in BGS.A : a.x_j = b.x_i$  et  $a.l = f$  alors
            créer  $a_1 = (b.x_j, e, -, b.x_i)$ 
            créer  $a_2 = (b.x_i, f, -, b.x_j)$ 
        si non
            créer  $a_1 = (b.x_j, f, -, b.x_i)$ 
            créer  $a_2 = (b.x_i, e, -, b.x_j)$ 
        fin si
    fin si

```

```

    si  $b.x_i \in J_0$  alors
      si  $\exists a \in BGS.A : a.x_j = b.x_i$  et  $a.l = e$  alors
        créer  $a_1 = (b.x_i, e, -, b.x_j)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_j, f, -, b.x_i)$ 
      si non
        créer  $a_1 = (b.x_j, e, -, b.x_i)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_i, f, -, b.x_j)$ 
      fin si
    fin si
     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a_1, a_2\}$ 
fin pour

pour tout  $BG.b$  tel que  $b.x_i \in J_0 \cup J_1$  et  $b.x_j \in J_0 \cup J_1$ 
faire
  si  $b.x_i \in J_1$  alors

    si  $\exists a \in BGS.A : a.x_j = b.x_i$  et  $a.l = f$  alors

      créer  $a_1 = (b.x_i, f, 0, b.x_j)$ 
      créer  $a_2 = (b.x_j, e, 0, b.x_i)$ 
    si non
      créer  $a_1 = (b.x_j, f, 0, b.x_i)$ 
      créer  $a_2 = (b.x_i, e, 0, b.x_j)$ 
    fin si
  fin si

  si  $b.x_j \in J_1$  alors

    si  $\exists a \in BGS.A : a.x_j = b.x_j$  et  $a.l = f$  alors

      créer  $a_1 = (b.x_j, f, 0, b.x_i)$ 
      créer  $a_2 = (b.x_i, e, 0, b.x_j)$ 
    si non
      créer  $a_1 = (b.x_i, f, 0, b.x_j)$ 
      créer  $a_2 = (b.x_j, e, 0, b.x_i)$ 
    fin si
  fin si

  si  $b.x_i \in J_0$  alors

```

```

    si  $\exists a \in BGS.A : a.x_i = b.x_j$  et  $a.l = e$  alors
        créer  $a_1 = (b.x_i, e, 0, b.x_j)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_j, f, 0, b.x_i)$ 
    si non
        créer  $a_1 = (b.x_j, e, 0, b.x_i)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_i, f, 0, b.x_j)$ 
    fin si
fin si

si  $b.x_j \in J_0$  alors

    si  $\exists a \in BGS.A : a.x_j = b.x_j$  et  $a.l = e$  alors

        créer  $a_1 = (b.x_i, e, 0, b.x_i)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_i, f, 0, b.x_j)$ 
    si non
        créer  $a_1 = (b.x_i, e, 0, b.x_j)$ 
        créer  $a_2 = (b.x_j, f, 0, b.x_i)$ 
    fin si
fin si

     $BGS.A \leftarrow BGS.A + \{a_1, a_2\}$ 
fin pour

Retourner  $BGS(X, A)$ 

```

BIBLIOGRAPHIE

- [ABDELWAHED, 2005] S. Abdelwahed, G. Karsai and G. Biswas, *A Consistency-based Robust Diagnosis Approach for Temporal Causal Systems*, The 16th International Workshop on Principles of Diagnosis, pages 73 - 79, Monterey, USA, 2005.
- [AITOUCHE, 2011] A. Aitouche, Q. Yang and B. Ould-Bouamama, *Fault detection and isolation of PEM fuel cell system based on nonlinear analytical redundancy*, The European Physical Journal Applied Physics **54**(2), pages 1 - 12, 2011.
- [ARABIAN-HOSEYNABADI, 2010] H. Arabian-Hoseynabadi, H. Oraee and P.-J. Tavner, *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems **32**(7), pages 817 - 824, 2010.
- [ATAMER, 2004] A. Atamer, *Comparison of FMEA and field-experience for a turbofan engine with application to case based reasoning*, IEEE Aerospace Conference **5**, pages 3354 - 3360, Big Sky, Montana, 2004.
- [BARBIR, 2005] F. Barbir, H. Gorgun and X. Wang, *Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells*, Journal of Power Sources **141**(1), pages 96 - 101, 2005.
- [BARONI, 2000] P. Baroni, G. Lamperti, P. Pogliano and M. Zannella, *Diagnosis of a class of distributed discrete-event systems*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cyberne-

- tics, Part A : Systems and Humans **30**(6), pages 731 - 752, 2000.
- [BEN-GAL, 2007] I. Ben-Gal, *Bayesian Networks*, Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability edited by F. Ruggeri, R.S. Kennett, F.W. Faltin, Wiley, 2007.
- [BIAN, 2011] M. Bian, J. Shi, S. Wang, *FTA-based fault diagnose expert system for hydraulic equipments*, International Conference on Fluid Power and Mechatronics, pages 959 - 963, Beijing, 2011.
- [BISWAS, 2009] G. Biswas, X. Koutsoukos, A. Bregon and B. Pulido, *Analytic redundancy, possible conflicts, and tcg-based fault signature diagnosis applied to nonlinear dynamic systems*, the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, pages 1486 - 1491, 2009.
- [BISWAS, 2004] G. Biswas, M.-O. Cordier, J. Lunze, L. Trave-Massuyes and M. Staroswiecki, *Diagnosis of Complex Systems : Bridging the Methodologies of the FDI and DX Communities*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics focuses on cybernetics **34**(5), 2159 - 2162, 2004.
- [BISWAS, 2003] G. Biswas, G. Simon, N. Mahadevan, S. Narasimhan, J. Ramirez and G. Karsai, *A robust method for hybrid diagnosis of complex systems*, The 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, pages 1125 - 1130, Washington, D.C., 2003.
- [BLANKE, 2006] M. Blanke, M.Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Springer, 2006.
- [BLANKE, 2001] M. Blanke, M. Staroswiecki and E. Wu, *Concepts and methods in fault-tolerant control*, American Control Conference **4**, pages 2606 - 2620, 2001.
- [BOON-LOW, 2010] C. Boon-Low, D. Wang, S. Arogeti and M. Luo, *Quantitative hybrid bond graph-based fault detection and isolation*, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering **7**(3), pages 558 - 569, 2010.
- [BORUTZKY, 2006] W. Borutzky, A. Orsoni, and R. Zobel, *Bond graph modeling and simulation of mechatronics systems an*

- introduction into the methodology*, 20th European Conference on Modeling and Simulation, Germany, 2006.
- [BREGON, 2010] A. Bregon, *Integration of FDI and DX techniques within Consistency-based Diagnosis with Possible Conflicts*, PhD Thesis, University of Valladolid, 2010.
- [BROENINK, 1997] J.-F. Broenink, *Modeling, simulation and analysis with 20-sim*, Journal a Special Issue CACSD **38**(3), pages 22 - 25, 1997.
- [CASSEZ, 2008] F. Cassez and S. Tripakis, *Fault Diagnosis with Static and Dynamic Observers*, Fundamenta Informaticae **88**(4), pages 497 - 540, 2008.
- [CHATTI, 2013] N. Chatti, B. Ould-Bouamama, A.-L. Gehin and R. Merzouki, *Signed Bond Graph for multiple faults diagnosis*, IFAC Engineering Applications of Artificial Intelligence (Under review), 2013.
- [CHATTI, 2013] N. Chatti, A.-L. Gehin, R. Merzouki and B. Ould-Bouamama, *Functional and Behavior Models for the Supervision of an Intelligent and Autonomous System*, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering **10**(2), pages 431 - 445, 2013.
- [CHATTI, 2011] N. Chatti, W. Khalil, A.-L. Gehin, R. Merzouki and B. Ould-Bouamama, *Intelligent supervision of autonomous heavy vehicles : Application to maritime area*, the 14th international conference on harbor, maritime and multimodal Logistics Modeling and Simulation, pages 33 - 37, 2011.
- [CHATTI, 2011] N. Chatti, A.-L. Gehin, R. Merzouki and B. Ould-Bouamama, *Online supervision of intelligent vehicle using functional and behavioral models*, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pages 827 - 832, Germany, 2011.
- [COMMAULT, 2008] C. Commault, J.-M. Dion and S.-Y. Agha, *Structural analysis for the sensor location problem in fault detection and isolation*, Automatica **44**(8), pages 2074 - 2080, 2008.
- [CORDIER, 2004] M.-O. Cordier, P. Dague, F. Levy, J. Montmain, M. Staroswiecki and L. Trave-Massuyes, *Conflicts versus analytical redundancy relations*, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics Part B : Cybernetics **34**(5), pages 2163 - 2177, 2004.

- [DAIGLE, 2008] M.-J. Daigle, *A qualitative event-based approach to fault diagnosis of hybrid systems*, Thesis dissertation, Nashville, Tennessee, 2008.
- [DING, 2008] S.-X. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques : Design Schemes, Algorithms, and Tools*, Springer edition, Heidelberg, Berlin, Germany, 2008.
- [DJEZIRI, 2009] M.-A. Djeziri, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki and G. Dauphin-Tanguy, *Optimal sensor placement for fault diagnosis*, IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga, pages 1 - 6, 2009.
- [DJEZIRI, 2007] M.-A. Djeziri, R. Merzouki, B. Ould-Bouamama and G. Dauphin-Tanguy, *Robust fault diagnosis by using bond graph approach*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics **12**(6), pages 599 - 611, 2007.
- [DJEZIRI, 2007] M.-A. Djeziri, *Diagnostic des Systèmes Incertains par l'approche Bond Graph*, Thèse de doctorat de l'Université de Lille1, 2007.
- [DUAN, 2012] R.-X. Duan and H.-L. Zhou, *A New Fault Diagnosis Method Based on Fault Tree and Bayesian Networks*, Energy Procedia **17**(Part B), pages 1376 - 1382, 2012.
- [DUNJO, 2010] J. Dunjo, V. Fthenakis, J.-A. Vilchez and J. Arnaldos, *Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review*, Journal of Hazardous Materials **173**(1-3), pages 19 - 32, 2010.
- [GAWTHROP, 1995] P. Gawthrop, *Bicausal bond graphs*, International Conference on Bond Graph Modelling and Simulation, pages 83 - 88, 1995.
- [GEHIN, 2008] A.-L. Gehin and M. Staroswiecki, *Reconfiguration analysis using generic component models*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans **38**(3), pages 575 - 583, 2008.
- [HAMSCHER, 1992] W. Hamscher, L. Console and J. de Kleer, *Readings in Model-based Diagnosis*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA, USA, 1992.
- [HARKAT, 2007] M.-F. Harkat, S. Djelel, N. Doghmane and M. Benouaret, *Sensor Fault Detection, Isolation and Reconstruction Using Nonlinear Principal Component Analysis*,

- International Journal of Automation and Computing **4**(2), pages 149-155, 2007.
- [HISSEL, 2004] D. Hissel, M.C. Péra and J.-M. Kauffmann, *Diagnosis of automotive fuel cell power generators*, Journal of Power Sources **128**(2), pages 239-246, 2004.
- [InTraDE] Website of InTraDE - <http://www.intrade-nwe.eu>.
- [IRI, 1979] M. Iri, K. Aoki, E. O'shima and H. Matsuyama, *An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process*, Computers & Chemical Engineering **3**(1-4), pages 489 - 493, 1979.
- [ISERMANN, 2011] R. Isermann, *Fault Diagnosis Applications : Model Based Condition Monitoring, Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems*, Springer, 2011.
- [ISERMANN, 2005] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems : An Introduction From Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, 2005.
- [KAMAL12, 2012] E. Kamal, *Robust Fault Tolerant Control of DFIG Wind Energy Systems with Unknown Inputs*, Renewable Energy **56**, pages 2 - 15, 2012.
- [KARIUKI, 2007] S.-G. Kariuki and K. Lowe, *Integrating human factors into process hazard analysis*, Reliability Engineering & System Safety **92**(12), pages 1764 - 1773, 2007.
- [KHEMLICHE, 2006] M. Khemliche, B. Ould-Bouamama and H. Haffaf, *Sensor placement for component diagnosability using bond-graph*, Sensors and Actuators A : Physical **132**(2), pages 547 - 556, 2006.
- [LEE, 1985] W.-S. Lee, D.-L. Grosh, F.-A. Tillman and C.-H. Lie, *Fault Tree Analysis, Methods, and Applications : A Review*, IEEE Transactions on Reliability **34**(3), pages 194 - 203, 1985.
- [LIN, 2010] X. Lin, B. Cheng and J. Chen *Context-aware end-to-end QoS qualitative diagnosis and quantitative guarantee based on Bayesian network*, Computer Communications **33**(17), pages 2132 - 2144, 2010.
- [LIU, 2008] F. Liu and D. Qiu, *Safe diagnosability of stochastic discrete event systems*, IEEE Transactions on Automatic Control **53**(5), pages 1291 - 1296, 2008.

- [LOBO, 1997] J. Lobo C. Uzcátegui, *Abductive consequence relations*, Artificial Intelligence **89**(1-2), pages 149 - 171, 1997.
- [LUENBERGER, 1966] D.-G. Luenberger, *Observers for multivariable systems*, IEEE Transactions on Automatic Control **11**(2), pages 190 - 197, 1966.
- [LUNZE, 2006] J. Lunze, *Control reconfiguration after actuator failures : The generalized virtual actuator*, 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS), pages 1309 - 1314, China, 2006.
- [MADER, 2011] R. Mader, G. Griessnig, A. Leitner, C. Kreiner, Q. Bourrouilh, E. Armengaud, C. Steger and R. Weiss, *A Computer-Aided Approach to Preliminary Hazard Analysis for Automotive Embedded Systems*, 18th IEEE International Conference and Workshops on Engineering of Computer Based Systems, pages 169 - 178, Las Vegas, USA, 2011.
- [MANDERS, 2000] E.-J. Manders, S. Narasimhan, G. Biswas and P.-J. Mosterman, *A combined qualitative/quantitative approach for fault isolation in continuous dynamic systems*, 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, pages 1074 - 1079, 2000.
- [MAURYA, 2004] M.-R. Maurya, R. Rengaswamy and V. Venkatasubramanian, *Application of signed digraphs-based analysis for fault diagnosis of chemical process flowsheets*, Engineering Applications of Artificial Intelligence **17**(5), pages 501 - 518, 2004.
- [MAURYA, 2003] M.-R. Maurya, R. Rengaswamy and V. Venkatasubramanian, *A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes. 1. Algorithms and Analysis*, Industrial and Engineering Chemistry Research **42**(20), pages 4789 - 4810, 2003.
- [MAURYA, 2003] M.-R. Maurya, R. Rengaswamy and V. Venkatasubramanian, *A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes. 2. control loops and flowsheet analysis analysis*, Industrial and Engineering Chemistry Research **42**(20), pages 4811 - 4827, 2003.

- [MEDJAHER, 2008] K. Medjaher, A. Mechraoui and N. Zerhouni, *Diagnostic et pronostic de défaillances par réseaux bayésiens*, 4èmes Journées Francophones sur les Réseaux Bayésiens, JFRB'2008 , Lyon, 2008.
- [MEDJAHER, 2006] K. Medjaher, A. K. Samantary, B. Ould-Bouamama and M. Staroswiecki, *Supervision of an industrial steam generator. PartII : On line implementation*, Control Engineering Practice **14**(1), pages 85 - 96, 2006.
- [MEDJAHER, 2005] K. Medjaher, *Contribution de l'outil bond graph pour la Conception de systèmes de supervision des Processus industriels*, Thèse de doctorat de l'Université de Lille1, 2005.
- [MERZOUKI, 2013] R. Merzouki, A.-K. Samantary, A.-K. Pathak and B. Ould-Bouamama, *Intelligent Mechatronic Systems : Modelling, Control and Diagnosis*, Springer Verlag, 2013.
- [MERZOUKI, 2009] R. Merzouki, M.-A. Djeziri and B. Ould-Bouamama, *Intelligent monitoring of electric vehicle*, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pages 797 - 804, Singapor, 2009.
- [MERZOUKI, 2007] R. Merzouki, K. Medjaher, M.A. Djeziri and B. Ould-Bouamama, *Backlash Fault Detection in Mechatronics System*, Mechatronics Journal **17**(6), pages 299 - 310, 2007.
- [MOHAMED-BASRI, 2012] H. Mohamed-Basri, K. Lias, W.-A. Wan Zainal Abidin, K.-M. Tay and H. Zen, *Fault Detection using Dynamic Parity Space Approach*, IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, pages 52- 56, Melaka, Malaysia, 2012.
- [MOSTERMAN, 1999] P.-J. Mosterman and G. Biswas, *Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans **29**(6), pages 554 - 565, 1999.
- [MOUSSA-ALI, 2011] A. Moussa-Ali, C. Join and F. Hamelin, *Diagnostic des systèmes dynamiques linéaires sans modèle explicite*, Journal Européen des Systèmes Automatisés **45**(4-6), pages 339 - 362, 2011.

- [MUKHERJEE, 2001] A. Mukherjee and A. Samantaray, *System modeling through bond graph objects on symbols 2000*, International Conference on Bond graph Modelling and Simulation **33**(1), pages 164 - 170, 2001.
- [NEMETH, 2003] E. Nemeth, R. Lakner, K.-M. Hangos and I.-T. Cameron, *Hierarchical CPN model-based diagnosis using HAZOP knowledge*, Research Report SCL-009, Hungarian National Research, 2003.
- [NIEMANN, 2005] H. Niemann and J. Stoustrup, *An architecture for fault tolerant controllers*, International Journal of Control **78**14, pages 1091 - 1110, 2005.
- [OKTAL] Website of OKTAL - <http://www.oktal.fr>.
- [OULD-BOUAMAMA, 2012] B. Ould-Bouamama, R. El Harabi, M.-N. Abdelkrim and M.-K. Ben Gayed, *Bond graphs for the diagnosis of chemical processes*, Computers & Chemical Engineering **36**, pages 301 - 324, 2012.
- [OULD-BOUAMAMA, 2008] B. Ould-Bouamama and A. Samantaray, *Model-Based Process Supervision. A Bond Graph Approach*, Springer-Verlag, Germany, 2008.
- [OULD-BOUAMAMA, 2006] B. Ould-Bouamama, K. Medjaher, A. Samantaray and M. Staroswiecki, *Supervision of an industrial steam generator. Part 1 : Bond Graph Modelling*, Control Engineering Practice **14**(1), pages 71 - 86, 2006.
- [OULD-BOUAMAMA, 2006] B. Ould-Bouamama, A. Samantaray and Staroswiecki, *Software for supervision system design in process engineering*, IFAC World Congress, pages 691 - 695, 2006.
- [OULD-BOUAMAMA, 2000] B. Ould-Bouamama, G. Dauphin-Tangui, M. Staroswiecki and D. Amo-Bravo, *Bond graph analysis of structural fdi properties in mechatronic systems*, 1st IFAC Symposium on Mechatronic Systems **3**, pages 1057 - 1062, Germany, 2000.
- [OZARIN, 2013] N.-W. Ozarin, *Bridging software and hardware FMEA in complex systems*, Annual Proceedings on Reliability and Maintainability, pages 1 - 6, Hauppauge, USA, 2013.
- [PALMA02, 2002] L.-B. Palma, F.-J. Coito and R.-N. Silva, *Adaptive observer based fault diagnosis approach applied to*

- a thermal plant*, 10th Mediterranean Conference on Control and Automation, pages 67 - 83, Lisbon, Portugal, 2002.
- [PATTON, 2000] R. Patton, P. Frank and R. Clark, *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Springer, 2000.
- [PAYNTER, 1961] H.-M. Paynter, *Analysis and design of engineering systems*, MIT press, Cambridge, MA, U.K, 1961.
- [PERAZA, 2008] C. Peraza, J.-G. Diaz, F.-J. Arteaga-Bravo and C. Villanueva *Modeling and simulation of PEM fuel cell with bond graph and 20sim*, American Control Conference, pages 5104 - 5108, Seattle, Washington, USA, 2008.
- [PHLIPOTEAU, 2009] V. Phlippoteau, *Outils et méthodes pour le diagnostic d'un état de santé d'une pile à combustible*, Thèse de doctorat, INP Toulouse, 2009.
- [POOL, 1990] D. Poole, *A Methodology for Using a Default and Abductive Reasoning System*, Intelligent systems **5**(5), pages 521 - 548, 1990.
- [PUIG, 2005] V. Puig, J. Quevedo, T. Escobet B. Pulido, *On the Integration of Fault Detection and Isolation in Model Based Fault Diagnosis*, the 16th International Workshop on Principles of Diagnosis, DX05, pages 227 - 232, Pacific Grove, CA, USA, 2005.
- [PULIDO, 2004] B. Pulido, *Possible conflicts : A compilation technique for consistency-based diagnosis*, IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics **34**(5), pages 2192 - 2206, 2004.
- [REITER, 1987] R. Reiter, *A theory of diagnosis from first principles*, Artificial intelligence **32**, pages 57 - 95, 1987.
- [RHEE, 2003] S.-J. Rhee and K. Ishii, *Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability*, Advanced Engineering Informatics **17**(3-4), pages 179 - 188, 2003.
- [ROSSING, 2010] N.-L. Rossing, M. Lind, N. Jensen and S.-B. Jorgensena, *A functional hazop methodology*, Computers & Chemical Engineering **34**(2), pages 244 - 253, 2010.
- [SAMANTARAY, 2006] A. Samantaray, K. Medjaher, B. Ould-Bouamama, M. Staroswiecki and G. Dauphin-Tanguy, *Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation*, Simulation Modeling Practice and Theory **14**(3), pages 237 - 262, 2006.

- [SHANAHAN, 1989] M. Shanahan, *Prediction is Deduction but Explanation is Abduction*, International Joint Conference on Artificial Intelligence, pages 1055 - 1060, 1989.
- [SHAO, 2012] C. Shao, Z. Shao, J. Zhang and F. Bai *Fault diagnosis design based on qualitative simulation*, Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing, pages 157 - 161, 2012.
- [SHEN, 2013] Q. Shen, B. Jiang, V. Cocquempot, *Fuzzy Logic System-based Adaptive Fault Tolerant Control for Near Space Vehicle Attitude Dynamics with Actuator Faults*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems **21**(2), pages 289 - 300, 2013.
- [SIJUN, 2009] Y. Sijun, Z. Youmin, W. Xinmin and C.-A. Rabbath, *Robust fault-tolerant control using on-line control re-allocation with application to aircraft*, American Control Conference, pages 5534 - 5539, 2009.
- [SIMON, 2013] C. Simon, T. Boukhobza and F. Hamelin, *Reliability assessment method for structural observer based FDI scheme by a graph theoretic approach*, Annual Reviews in Control **37**, pages 137 - 145, 2013.
- [SOLDANI, 2007] S. Soldani, M. Combacau, A. Subias and J. Thomas, *Intermittent fault diagnosis : A diagnoser derived from the normal behavior*, 18th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-07), pages 391 - 398, Nashville, TN, 2007.
- [STAROSWIECKI, 2001] M. Staroswiecki and A.-L.Gehin, *From control to supervision*, Annual Reviews in Control **25**, pages 1 - 11, 2001.
- [STAROSWIECKI, 1991] M. Staroswiecki, V. Cocquempot and J.-P. Cassar, *Optimal design of FDI systems via parity space and observer based approaches*, International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation **1**, pages 143 - 148, Kobe, Japan, 1991.
- [SUEUR, 2012] C. Sueur and G. Dauphin-Tanguy, *Bond Graph Model based for structural component diagnosability analysis*, 2nd International Conference on Systems and Control, pages 65 - 71, Marrakech, 2012.
- [TAGINA, 1995] M. Tagina, J. Cassar, G. Dauphin-Tangy and M. Staroswiecki, *Monitoring of systems modeled by bond*

- graph*, International Conference on Bond Graph Modeling, pages 275 - 280, 1995.
- [TATENO, 2006] S. Tateno, H. Matsuyama and Y. Tsuge, *Fault diagnosis method using a signed digraph for multiple origins of failures : evaluation of the diagnosis accuracy*, IEEE International Conference on Control Applications, pages 3271 - 3276, Germany, 2006.
- [THEILLOL, 2008] D. Theillol, J. Cedric and Y. Zhang, *Actuator fault tolerant control design based on reconfigurable reference input*, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. **18**(4), pages 553 - 560, 2008.
- [THOMA, 1975] J. Thoma, *Bond Graphs : Introduction and Applications*, Elsevier Science, 1975.
- [TOUATI, 2012] Y. Touati, R. Merzouki and B. Ould-Bouamama, *Robust diagnosis to measurement uncertainties using bond graph approach : Application to intelligent autonomous vehicle*, Mechatronics **22**(8), pages 1148 - 1160, 2012.
- [TOUATI, 2011] Y. Touati, R. Merzouki and B. Ould-Bouamama, *Fault detection and isolation in presence of input and output uncertainties using bond graph approach*, The 5th international conference on integrated modeling and analysis in applied control and automation, pages 221 - 227, Italy, 2011.
- [TRAMMELL, 2001] S.-R. Trammell and B.-J. Davis, *Using a modified Hazop/FMEA methodology for assessing system risk*, 2nd International Workshop on Engineering Management for Applied Technology, pages 47 - 53, Austin, TX, USA, 2001.
- [TRAVE-MASSUYES2006, 2006] L. Trave-Massuyes, T. Escobet and X. Olive, *Diagnosability Analysis Based on Component-Supported Analytical Redundancy Relations*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans **36**(6), pages 1146 - 1160, 2006.
- [TSAI, 2004] Y.-T Tsai, K.-S. Wang and L.-C. Tsai, *A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems*, Reliability Engineering & System Safety **84**(3), pages 261 - 270, 2004.

- [VANDERHAEGEN, 2011] F. Vanderhaegen and P. Caulier, *A multi-viewpoint system to support abductive reasoning*, Information Sciences **181**(24), pages 5349 - 5363, 2011.
- [VENKATASUBRAMANIAN, 2003] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin and S. N. Kavuri, *A review of process fault detection and diagnosis : Part I : Quantitative model-based methods*, Computers & Chemical Engineering **27**(3), pages 293 - 311, 2003.
- [VENKATASUBRAMANIAN, 2003] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy and S.-N. Kavuri, *A review of process fault detection and diagnosis : Part II : qualitative models and search strategies*, Computers & Chemical Engineering **27**(3), pages 313 - 326, 2003.
- [VUE] Website vue - <http://vue.tufts.edu>, Visual Understanding Environment, Tufts University.
- [WANG, 2012] Y. Wang, Q. Li, M. Chang, H. Chen and G. Zang, *Research on Fault Diagnosis Expert System Based on the Neural Network and the Fault Tree Technology*, Procedia Engineering **31**, pages 1206 - 1210, 2012.
- [WANG, 2009] H. Wang, B. Chen, X. He, Q. Tong and J. Zhao, *SDG-based HAZOP analysis of operating mistakes for PVC process*, Process Safety and Environmental Protection **87**(1), pages 40 - 46, 2009.
- [XIAO, 2011] N. Xiao, H.-Z. Huang, Y. Li, L. He and T. Jin, *Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA*, Engineering Failure Analysis **18**(4), pages 1162 - 1170, 2011.
- [YANG, 2012] F. Yang, S.-L. Shah and D. Xiao, *Signed directed graph based modeling and its validation from process knowledge and process data*, Applied Mathematics and Computer Science **22**(1), pages 41 - 53, 2012.
- [YOUSFI-STEINER, 2011] N. Yousfi-Steiner, D. Hissel, Ph. Moçotéguy and D. Candusso, *Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes (flooding and drying out) by neural networks modeling*, International Journal of Hydrogen Energy **36**(4), pages 3067 - 3075, 2011.
- [ZHANG, 2008] K. Zhang, B. Jiang and V. Cocquempot, *Adaptive Observer-based Fast Fault Estimation*, International

- Journal of Control, Automation and Systems **6**(3), pages 320 - 326, 2008.
- [ZHANG, 2009] C.-Y. Zhang, P. Zhang, Z.-X. Yang and L. Song, *Safety assessment modeling for thermal power plants using hierarchical SDG-HAZOP method*, IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems **3**, pages 144 - 148, Shanghai, China, 2009.
- [ZHANG, 2009] K. Zhang, B. Jiang and P. Shi, *Fast fault estimation and accommodation for dynamical systems*, IET Control Theory & Applications **3**(2), pages 189 - 199, 2009.
- [ZHANG, 2011] L.-M. Zhang, H.-L. Zeng, F. Yang and D.-T. Ouyang, *Dynamic theorem proving algorithm for consistency-based diagnosis*, Expert Systems with Applications **38**(6), pages 7511 - 7516, 2011.
- [ZHANG, 2008] Y. Zhang and J. Jiang, *Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems*, Annual Reviews in Control **32**, pages 229 - 252, 2008.
- [ZHAO, 2009] J. Zhao, L. Cui, L. Zhao, T. Qiu and B. Chen, *Learning hazop expert system by case-based reasoning and ontology*, Computers & Chemical Engineering **33**(1), pages 371 - 378, 2009.
- [ZHAO, 2009] X. Zhao, L. Zhang, D. Ouyang and Y. Jiao, *Deriving all minimal consistency-based diagnosis sets using SAT solvers*, Progress in Natural Science **19**(4), pages 489 - 494, 2009.

Contribution à la supervision des systèmes dynamiques à base des Bond Graphs Signés

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'étude du diagnostic de défauts simples et multiples pour des systèmes dynamiques continus et consistent à développer une stratégie de diagnostic globale pour la gestion des modes de fonctionnement en situations normale et anormale. Nous avons d'abord développé un nouveau formalisme graphique de modélisation des systèmes dynamiques émanant des BG et que nous avons appelé le BGS. Ce formalisme est très aisément interprétable grâce à un certain nombre de propriétés et de définitions que nous avons établies. L'élaboration d'un tel formalisme permet de faire appel aux propriétés structurelles et causales du BG et d'élargir leur champ d'étude pour inclure le raisonnement qualitatif. Nous avons ensuite proposé un modèle générique permettant d'intégrer les modèles Génériques de Composants (MGC) fonctionnels et les modèles BGS pour la gestion, par un automate fini, des modes de fonctionnement et des conditions de reconfiguration d'un système autonome. Enfin, nous avons proposé une méthode de diagnostic des défauts simples et multiples en utilisant une approche par abduction basée sur l'étude de la propagation de défauts sur le BGS à partir des observations. La méthodologie proposée est validée par deux systèmes de complexité différente et en l'occurrence une pile à combustible à membrane échangeuse de protons et un système électromécanique d'un véhicule électrique.

Mots-clés : Approches graphiques, Diagnostic, Bond Graphs, fautes multiples, approches FDI, approches qualitatives, modélisation multi-niveaux, véhicules électriques.

Contribution to the supervision of dynamic systems using Signed Bond Graph

The work presented in this paper deals with the diagnosis of single and multiple faults for continuous dynamic systems. It consists on developing a global diagnosis strategy for the operating modes management in both normal and abnormal situations. We first developed a new graphical formalism for dynamic system modelling. This formalism is emanating from the BG methodology and it is called Signed Bond Graph (SBG). This latter is easily understandable by a number of properties and definitions that we have established. The development of such formalism allows to use structural and causal properties of the BG and to expand its scope to include qualitative reasoning. Furthermore, we proposed a generic model for integrating functional Generic Component Models (GCM) and SBG models for the management of operating modes and reconfiguration conditions of an autonomous system using a finite automaton. Finally, we proposed a method for diagnosing both single and multiple faults using an abduction approach based on the faults propagation within the SBG by starting from a set of observations. The proposed methodology is validated by two different systems namely a proton exchange membrane fuel cell and an electromechanical system of an electric vehicle.

Keywords : Graphical approaches, fault diagnosis, Bond Graphs, multiple faults, FDI approaches, qualitative approaches, multi-level modeling, electrical vehicles.