

Approche Bond Graph pour la défectabilité et l'isolabilité algébriques de défauts composants

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 23 Janvier 2013

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Lille 1

(spécialité Automatique et Informatique Industrielle)

par

Samir BENMOUSSA

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Jean-Charles CADIOU Noureddine MANAMANNI	Professeur à l'université de Nantes Professeur à l'université de Reims Champagne-Ardenne
<i>Examineurs :</i>	Lydie NOUVELIERE Christophe SUEUR	Maître de Conférences de l'Université d'Evry Val d'Essonne Professeur à Ecole Centrale de Lille
<i>Directeur de thèse :</i>	Belkacem OULD BOUAMAMA Rochdi MERZOUKI	Professeur à Polytech'Lille Professeur à Polytech'Lille

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées durant ces trois années de thèse.

Je remercie plus particulièrement Belkacem Ould Bouamama et Rochdi Merzouki, Professeurs à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, pour m'avoir encadré. Je les remercie pour leur pédagogie, leur soutiens et pour toutes les discussions instructives et fructueuses que nous avons eues durant toute la durée de ce travail de recherche.

Mes remerciements vont également à Monsieur Jean-Charles CADIOU et Monsieur Nouredine MANAMANNI qui m'ont fait l'honneur de rapporter mon travail. Qu'ils soient assurés de ma profonde reconnaissance. Je remercie également Monsieur Christophe Sueur et Madame Lydie NOUVELIERE d'accepter d'être examinateurs de cette thèse.

La présente thèse a pu commencer grâce à une bourse algérienne, qui m'a été allouée par le programme PNE, auquel j'adresse ma profonde reconnaissance.

Pendant les années de thèse, j'ai beaucoup apprécié l'ambiance amicale qui règne au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS), je tiens à remercier tous ses membres et plus particulièrement ceux de l'équipe Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée de Systèmes (MOCIS). Je remercie également les secrétaires, notamment Madame Marcelle Desfromont pour sa gentillesse.

Merci aussi aux doctorants ainsi qu'aux post-doctorants du LAGIS avec qui j'ai pu partager les joies et des difficultés de la vie de thésard, en particulier : Lamine Chalal, Rui Loureiro, Youcef Touati, Talel Zouari, Mohamed Benmerikhi et Issam Djemili.

Cette thèse a également bénéficié du soutien total de ma famille. Je pense aujourd'hui avec beaucoup de tendresse à mes parents, à la confiance qu'ils m'accordent. Je veux les remercier de tout mon coeur, ainsi que mes soeurs et mes frères. Sans votre soutien, tout ceci n'aura jamais pu aboutir et je vous serai éternellement reconnaissant d'avoir su me donner les moyens d'arriver jusqu'ici. Aucun mot ne saurait décrire ma pensée.

Merci aussi à tous les "anonymes" qui auraient certainement mérité d'être cités.

Je dédie cette thèse à la mémoire de ma mère.

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1	Introduction	11
1.2	Concepts généraux	12
1.2.1	Les méthodes à base de données	15
1.2.2	Les méthodes à base de modèle	16
1.3	Détection et isolation structurelle d'un défaut	18
1.3.1	Méthodes Analytiques	19
1.3.2	Méthodes Graphiques	24
1.4	Conclusion	31

Chapitre 2

Modélisation de défaut composant par Bond Graph

2.1	Introduction	33
2.2	La méthodologie Bond Graph	34
2.2.1	Les liens de puissances	35
2.2.2	La notion de causalité	35
2.2.3	Eléments de base de BG	36
2.3	Modélisation de défauts composants	40
2.3.1	Types de défauts	40
2.3.2	Modélisation mathématique d'un défaut composant	42
2.3.3	Défaut composant par BG	43
2.3.4	Exemple de modélisation	50
2.4	Conclusion	53

Chapitre 3

Détection et isolation de défauts composants par BG

3.1	Introduction	56
3.2	Théorie de module et propriétés des BGs	56
3.2.1	Théorie du module	57
3.2.2	Quelques propriétés du l’outil Bond Graph	61
3.2.3	Anneau Bond Graph	63
3.2.4	La bicausalité	64
3.2.5	Observabilité	66
3.3	Détectabilité et isolabilité structurelles de défauts composants	70
3.3.1	Modèle Anneau BG de diagnostic	71
3.3.2	DéTECTABILITÉ STRUCTURELLE DE DÉFAUTS COMPOSANTS	75
3.3.3	ISOLABILITÉ STRUCTURELLE DE DÉFAUTS COMPOSANTS	78
3.4	Placement de capteur pour le recouvrement de la surveillabilité du système	84
3.5	Paramétrisation différentielle de défauts	88
3.5.1	Expression du gain	88
3.5.2	Gains des éléments	89
3.5.3	Paramétrisation différentielle du défaut	92
3.6	Conclusion	94

Chapitre 4

Etude de cas : Application au véhicule autonome intelligent

4.1	Introduction	97
4.2	Description et modélisation du véhicule intelligent autonome RobuTAINeR	98
4.3	Analyse structurelle de la détectabilité et l’isolabilité de défauts	112
4.3.1	Modèle BG du système de la traction en présence de défauts composants.	112
4.3.2	Détection et isolabilité structurelles de défauts composants	114
4.4	Résultats de Co-simulations	119
4.4.1	Calcul de résidus	120
4.4.2	Résultats de co-simulations	123
4.5	Conclusion	129

Conclusions et Perspectives

Annexe A

Transformée de Laplace en théorie du module

Annexe B

Méthodologie BG

B.1 variables mises en jeu	135
B.2 Procédure d'affectation de la causalité	135
B.3 Règle de Mason	136

Bibliographie	139
----------------------	------------

Table des figures

1	Topologie d'organisation de l'équipe MOCIS.	2
2	Les différentes approches d'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité de défauts, (*) approche proposée.	7
1.1	Les différents types de défauts et l'architecture générale d'un système de diagnostic	13
1.2	Classification des méthodes de diagnostic	15
1.3	Diagnostic à base de modèle	17
1.4	Un graphe biparti	26
2.1	Représentation BG du transfert de puissance	35
2.2	Les différentes configurations de la causalité	36
2.3	Représentation des éléments passifs	36
2.4	(a) : source d'effort ou de flux, (b) : source d'effort ou de flux contrôlée	38
2.5	Les éléments de jonction	38
2.6	Les différents détecteurs (a) : d'effort, (b) : de flux	39
2.7	Représentation graphique d'un défaut additif	41
2.8	Représentation graphique d'un défaut multiplicatif	41
2.9	Representation BG de l'Eq.2.7.	45
2.10	Modélisation BG d'un défaut multiplicatif.	45
2.11	Modèle BG acausal d'un défaut sur un élément R	46
2.12	Modèle BG du l'élément R en présence de défaut : (a) causalité résistance, (b) causalité conductance	46
2.13	Modèle BG acausal d'un défaut sur un élément C	47
2.14	Modèle BG du l'élément C en présence de défaut : (a) causalité intégrale, (b) causalité dérivée	47
2.15	Modèle BG acausal d'un défaut sur un élément I	48
2.16	Modèle BG du l'élément I en présence de défaut : (a) causalité intégrale, (b) causalité dérivée	48
2.17	Modèle BG d'un défaut sur un élément TF.	49
2.18	Modèle BG d'un défaut sur un élément GY.	49
2.19	(a) : Moteur à courant continu, (b) : Modèle BG correspondant	51
2.20	Modèle BG du moteur DC défectueux	52
3.1	Exemple d'un chemin causal	61

3.2	Exemple d'une boucle causale	62
3.3	Les différentes possibilités d'affectation de la causalité	65
3.4	Différentes configurations des éléments bicausaux	65
3.5	(a) détecteur d'effort, (b) détecteur d'effort dualisé, (c) détecteur de flux, (d) détecteur de flux dualisé	67
3.6	Un exemple pédagogique d'un modèle BG	69
3.7	Modèle BG de la Figure 3.6 en causalité dérivée	70
3.8	Modèle BG dual du modèle BG de la Figure 3.6.	71
3.9	Modèle anneau BG à mot d'un système défectueux.	72
3.10	Modèle anneau BG à mot de diagnostic.	72
3.11	Modèle BG du système défectueux.	75
3.12	Modèle anneau BG de diagnostic du système défectueux.	76
3.13	Un graphe orienté sorties - défauts représentant le théorème 3.4	79
3.14	modèle anneau BG de diagnostic pour la détectabilité structurelle de défauts.	80
3.15	Modèle anneau BG de diagnostic pour l'isolabilité structurelle de défauts.	81
3.16	Modèle anneau BG de diagnostic pour placement de capteur, (*) : capteur fictif.	86
3.17	Modèle anneau BG de diagnostic après le placement de capteurs.	87
4.1	Un terminal portuaire doté d'un système de transport intelligent.	99
4.2	(a) : CAD du RobuTAINeR, (b) : Image réelle frontale du véhicule Robu- TAINeR.	99
4.3	CAD d'un quart de véhicule RobuTAINeR.	100
4.4	Image réelle d'un quart de RobuTAINeR	101
4.5	Modèle BG à mot du RobuTAINeR.	101
4.6	BG à mot du j^{eme} système électromécanique de la traction.	102
4.7	Modèle BG du j^{eme} système électromécanique de la traction en causalité intégrale.	104
4.8	Projections des efforts sur le véhicule.	107
4.9	Modèle BG du véhicule autonome intelligent RobuTAINeR.	108
4.10	Modèle BG en causalité intégrale du système électromécanique en présence de défauts composants.	113
4.11	Modèle anneau BG de diagnostic pour l'analyse structurelle de détectabilité et isolabilité de défauts composants.	115
4.12	Schéma de co-simulation : Simulink /SCANeR studio.	120
4.13	Résidus en fonctionnement nominal (FN) et en situation de défauts	124
4.14	Les entrées en fonctionnement nominal et en situation de défauts	126
4.15	Les sorties du système en fonctionnement nominal (FN) et en situation de défauts	126
4.16	Résidus en fonctionnement nominal (FN) et en situation de défauts multiple	127
4.17	Les entrées en fonctionnement nominal et en situation de défauts multiples	128
4.18	Les sorties du système en fonctionnement nominal et en situation de défauts multiples	128

Introduction générale

Cadre et contexte de la thèse

Ce travail de thèse est effectué au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS - UMR CNRS 8219). Il est réalisé dans le cadre de l'équipe Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée des Systèmes (MOCIS) <http://www.mocis-lagis.fr>; sous la direction de M. Belkacem Ould Bouamama, et de M. Rochdi Merzouki, professeurs à l'école polytechnique universitaire de Lille.

L'équipe MOCIS s'intéresse à la conception intégrée de systèmes de commande et de supervision en utilisant de façon cohérente un seul outil : *les bond graphs* (BG) allant de la modélisation, pilotage et informatisation des procédures développés. La Figure 1 montre la topologie de cette organisation. Cette démarche intégrée est basée sur l'exploitation de propriétés particulières des BG qui sont (i) causales et structurelles par ses aspects graphiques (ii) mathématiques et physiques par ses aspects comportementaux et (iii) fonctionnelles par sa topologie modulaire.

L'originalité des travaux de l'équipe est le développement depuis plus d'une vingtaine d'années du BG non seulement pour la modélisation multi-physique mais aussi pour l'analyse structurelle et la conception de systèmes de commande et de surveillance. Par exemple, dans le cadre de l'analyse structurelle et de surveillance (cadre de notre thèse) les travaux antérieurs de l'équipe peuvent être résumés comme suit : (i) l'analyse structurelle d'observabilité et de commandabilité [Sueur 1991], (ii) l'analyse des propriétés et conditions de surveillabilité (aptitude à détecter et à localiser des défauts) [Ould-Bouamama 2003] et (iii) la platitude pour la surveillance de défauts des action-

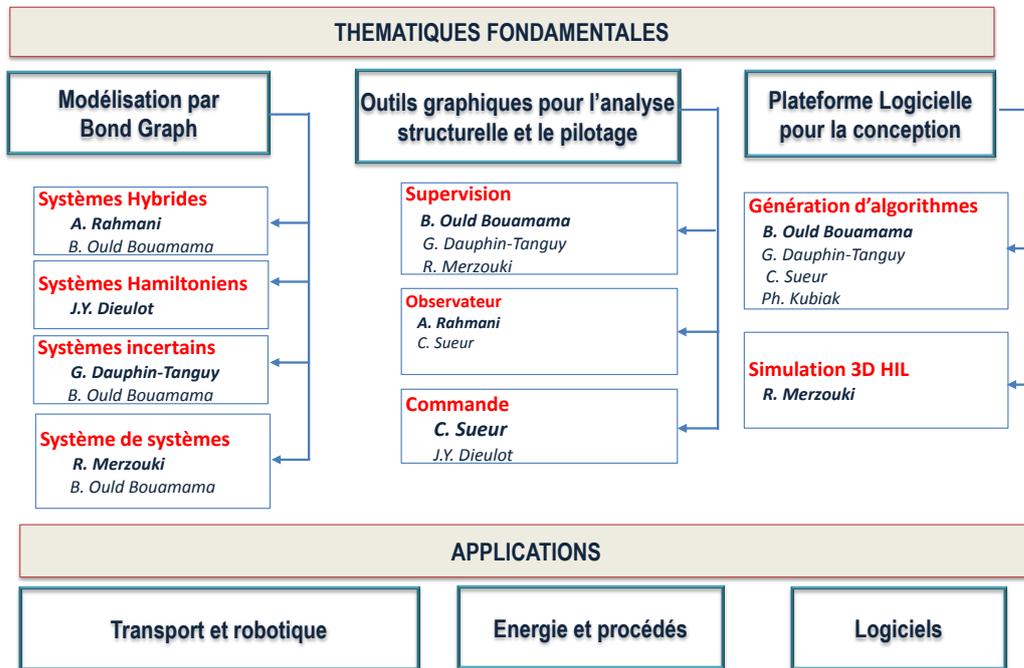


Figure 1 – Topologie d'organisation de l'équipe MOCIS.

neurs [El-Osta 2005].

Objectif

Le présent travail s'inscrit dans la continuité et complémentarité des travaux pour l'analyse structurelle et de la surveillance des systèmes modélisés par BG, et a pour objectif principal d'étudier : (i) les propriétés structurelles d'un système du point de vue détection et isolation de défauts composants. (ii) un placement de capteurs optimal pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence des défauts composants.

Positionnement

Surveiller le bon fonctionnement d'un système physique est une tâche devenue indispensable de nos jours. Cette dernière est généralement assurée par un système informatisé

appelé *système de diagnostic*. Le principe de fonctionnement d'un système de diagnostic est basé sur une comparaison entre le comportement réel du système avec un comportement de référence en fonctionnement normal. Cette procédure permet dans une première phase de détecter les changements de comportement (*détection*) dus à l'apparition de défaut au sein du système puis de localiser dans une deuxième phase les composants défectueux (*isolation*). Plusieurs méthodes ont été développées pour résoudre les différents problèmes de détection et d'isolation de défaut (Fault Detection and Isolation, FDI). Dictées par la connaissance a priori du système qu'elle soit de nature historique ou dynamique et structurelles du système, deux grandes familles de méthodes peuvent être distinguées : celles à base de l'historique du système, et celles à base de modèle.

Les méthodes à base de l'historique du système, appelées aussi les méthodes à base de données (Data-based methods) reposent sur la connaissance des observations antérieures et archivées du système. Un traitement est appliqué alors sur ces dernières afin d'extraire des caractéristiques qui correspondent au fonctionnement normal et anormal du système. Pour cette dernière, ces méthodes font appel à des outils de l'intelligence artificielle tels que : les réseaux de neurones [Frank 1997], les systèmes bayésiens [Yongli 2006], ou à l'intelligence humaine comme les systèmes experts [Qian 2008]. Ces méthodes ont l'avantage de surpasser la connaissance analytique et structurelle du système puisqu'ils reposent uniquement sur les informations collectées dans la base de données. Par conséquent, une connaissance a priori sur les états de fonctionnement (normal et défaillant) est nécessaire pour le bon établissement du système de diagnostic. Ce qui n'est souvent pas évident dans les systèmes réels surtout pour la collecte de modes défaillants.

Pour contourner ce problème, les méthodes à base de la connaissance de la dynamique et de la structure du système, appelées aussi, les méthodes à base de modèle (Model-based methods) peuvent être une alternative. S'appuyant sur la connaissance physique du processus à surveiller, un ou plusieurs modèles (analytique ou graphiques) qui décrivent le système en fonctionnement normal ou anormal est obtenu. Le diagnostic à base de modèle peut être de nature *qualitative* ou *quantitative*. Le diagnostic est assuré par une comparaison entre le comportement réel du système (fourni par les capteurs) et un

comportement de référence (fourni par un modèle). Cette comparaison donne naissance à un *résidu*. Il existe plusieurs méthodes pour la génération de résidu telles que : les observateurs [Patton 1997, Hammouri 1999], les filtres [Edelmayer 1994, Henry 2001] et celles basées sur la redondance analytique [Chow 1984, Gertler 1997, Staroswiecki 2000, Blanke 2003, Ould-Bouamama 2003, Samantary 2008a]. La mise en oeuvre de ces méthodes nécessite une modélisation physique précise et les performances du système de surveillance dépendent fortement de l'architecture de mesure disponible sur le système.

La deuxième étape consiste à localiser le défaut en ayant recours à des signatures répertoriées et/ou à une logique de décision. La détermination des conditions de détectabilité et d'isolabilité de défauts ainsi que la proposition d'un placement de capteurs pour satisfaire ces propriétés est une problématique importante à résoudre avant la conception du système de surveillance. On distingue deux approches pour la résolution de ce problème : une approche *analytique* et une *approche graphique*.

L'approche analytique de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles de défauts repose sur la représentation mathématique du système généralement mis sous forme d'équations d'état et dont l'objectif est de fournir des conditions mathématiques à satisfaire pour qu'un défaut soit détectable et isolable. Quant à l'approche graphique, elle est basée sur la représentation graphique de la structure du système et/ou sa dynamique. Cette représentation peut être tirée à partir du modèle mathématique comme les *Digraphs* [Dion 2003] ou *Graphes Bipartites* [Blanke 2003] ou bien à partir des connaissances de la physique du système comme le *Bond Graph* (BG) [Karnopp 1975].

Parmi les méthodes analytiques, on distingue les méthodes d'analyse géométrique et algébrique. Les conditions géométriques de la détectabilité et de l'isolabilité de défauts sont données en terme des espaces invariants inobservables [Massoumnia 1989, Meskin 2007]. Tandis que les méthodes algébriques sont basées principalement sur la théorie du module introduite par [Fliess 1990], et elles reposent sur l'étude d'observabilité de la variable de défaut par rapport aux variables de commande (entrée) et de mesure (sortie) du système. Cette approche d'analyse est appliquée pour les systèmes linéaires [Fliess 2003, Fliess 2004], comme pour une classe de systèmes non-linéaires [Cruz-Victoria 2008b, Marinez-Guerra 2006].

Ces méthodes s'intéressent uniquement aux défauts pouvant affecter les actionneurs et les capteurs. De plus, le modèle mathématique sous forme d'équations d'état ne représente pas la topologie du système physique et l'architecture visuelle du système d'instrumentation. En outre, la procédure de vérification de détection et de l'isolation structurelles est coûteuse en termes de temps de calcul.

Les méthodes graphiques sont basées sur une abstraction du modèle : digraphe, graphe biparti ou BG. La structure et la topologie du système à surveiller représentée par l'architecture du graphe facilite l'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles de défauts ainsi que le placement de capteurs. Par exemple, sur un modèle digraphe, l'étude de la détectabilité et l'isolabilité structurelle d'un défaut (actionneur, capteur) est faite en se basant sur la notion des chemins disjoints [Commault 2002]. Si les défauts (actionneurs ou capteurs) ne sont pas structurellement détectables et isolables, un placement de capteurs basé sur une décomposition du graphe est proposé [Commault 2007, Commault 2008]. Pour un graphe biparti, l'étude de la détectabilité et l'isolabilité structurelles repose sur la notion du couplage et consiste à identifier les sous-systèmes *surdéterminés*. [Krysander 2002] et [Krysander 2005] propose des algorithmes basés sur la manipulation des différents couplages sur le graphe biparti pour déterminer les sous-graphes surdéterminés. Sur un modèle BG, l'analyse structurelle de la détectabilité et l'isolabilité de défaut est étudiée à partir de la matrice de signature de défaut (Fault Signature Matrix, FSM). Cette dernière est déduite à partir des relations de redondance analytiques (RRAs) générées de façon systématique à partir du modèle BG [Ould-Bouamama 2006]. Les conditions de la surveillabilité structurelle (aptitude à détecter et isoler une faute) peuvent alors être analysées à partir du modèle BG [Samantary 2006, Djeziri 2007, Samantary 2008a]. Dans le cas où le système est sous-déterminé, un placement de capteur devient nécessaire. [Khemliche 2006] propose un placement de capteur combinatoire pour la détectabilité de défauts composants. [Djeziri 2009] propose un placement de capteur qui permet de lever le problème de causalité sur le modèle BG dédié pour le diagnostic. Un logiciel pour l'automatisation de la procédure de génération d'algorithme de surveillance basé sur les RRAs à partir d'un modèle BG a été

développé dans [Ould-Bouamama 2006].

Des résultats intéressants ont été obtenus en combinant les approches algébriques et l'outil BG : l'étude de la platitude [Achir 2005], la caractérisation des zéros invariants [Chalh 2007], la dualité [Lichiardopol 2010]. Ces travaux ont prouvé que l'étude des propriétés structurelles des systèmes physiques en utilisant la théorie du module est plus simple à partir de leurs modèles BG. Pour la surveillance, peu de travaux ont considéré les deux approches en même temps. Dans [Cruz-Victoria 2008a], l'outil BG est utilisé uniquement comme un moyen de modélisation. [El-Osta 2005] étudie la surveillabilité de défauts d'actionneurs sur un modèle analytique déduit du BG en utilisant la notion de la platitude. Ce travail de thèse considère les deux approches en même temps, et *a pour objectif de fournir des conditions graphiques permettant de conclure sur la détectabilité et l'isolabilité structurelles de défauts composants en se basant sur l'étude de leur observabilité par rapport aux variables connues du système (mesures et entrées)*. Par rapport aux travaux cités qui étudient les conditions de surveillabilité des défauts actionneurs et capteurs à partir du modèle analytique (sous forme d'état), le travail de thèse considère en plus les défauts système (composant) à partir directement du modèle graphique (le BG). La démarche proposée dans ce manuscrit peut être résumée par la Figure 2.

Contributions et résultats obtenus

Les résultats de recherche obtenus complètent les travaux de l'équipe dans le cadre de l'analyse structurelle et de surveillance à base de modèle BG. Les principales contributions peuvent être résumées comme suit :

- Modélisation BG du défaut composant ;
- Conditions graphiques de détectabilité et isolabilité structurelles de défauts composants ;
- Placement de capteur pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts composants.

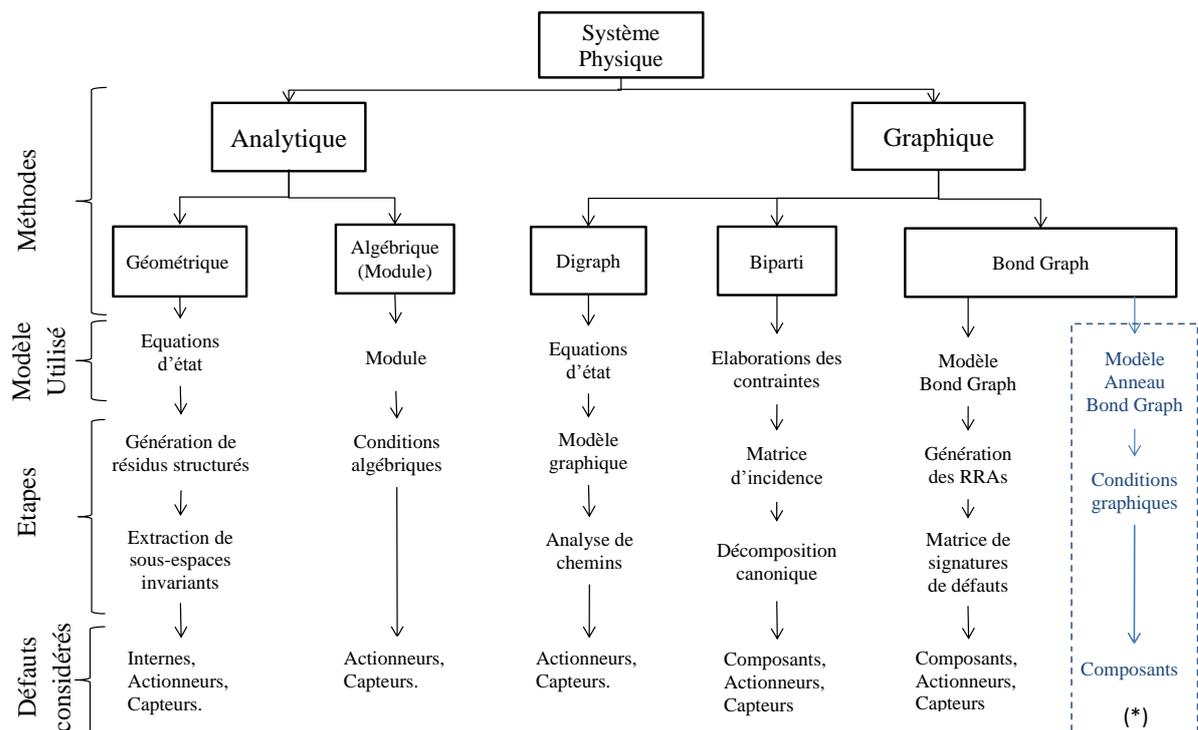


Figure 2 – Les différentes approches d’analyse de la détectabilité et de l’isolabilité de défauts, (*) approche proposée.

Ces résultats ont fait l’objet des publications suivantes :

Article de revue

S. Benmoussa, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki. "Bond Graph Approach for Plant Fault Detection and Isolation : Application to Intelligent Autonomous Vehicle". IEEE Transaction on Automation Science and Engineering, 2012 (en révision finale).

R. Loureiro, S. Benmoussa, Y. Touati, R. Merzouki, B. Ould-Bouamama. "Integration of fault diagnosis and fault tolerant control for healthy monitoring of class of MIMO Intelligent Autonomous vehicles". IEEE Transaction on vehicular Technology, 2012 (en révision).

Chapitre d’ouvrage

S. Benmoussa, R. Merzouki, B. Ould Bouamama. "Bond Graph Model-Based Fault detection and Isolation : Application to Intelligent Autonomous Vehicle". Mechatronic and

Innovative Applications. PP : 111 – 126, ISBN : 978-1-60805-440-4, Bentham Science.

Article de conférence

S. Benmoussa, R. Merzouki, B. Ould Bouamama. "Plant Fault Diagnosis using Bond Graph Approach : Application to Intelligent Autonomous Vehicle". The 8th IFAC Safe-process, PP : 952-957, 2012, Mexico.

R. Loureiro, S. Benmoussa, Y. Touati, R. Merzouki, B. Ould-Bouamama. "Graphical Approach for State Reconstruction and Monitoring Analysis", 7th IEEE ICIEA, PP : 1205 – 1210, 2012, Singapore.

S. Benmoussa, B. Ould Bouamama, R. Merzouki. "Component fault detection and isolation : comparison between bond graph and algebraic approach". IMMACA2011, PP : 214 – 220. Italy.

Organisation du manuscrit

Le manuscrit est organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art sur les méthodes d'analyses structurelles de détectabilité et isolabilité de défauts. Pour introduire ce concept, une brève introduction aux notions de diagnostic a été présentée. Ensuite, nous avons expliqué les différentes approches d'analyse de détection et d'isolation de défaut tout en exposant les avantages et les limites de chaque méthode. Les travaux récents obtenus ont montré l'efficacité d'analyse des systèmes physiques à l'aide de la théorie du module à partir de leurs modèles BG. Notre travail est une extension de ces travaux pour l'étude de la détectabilité et l'isolabilité structurelle de défauts composants à partir du modèle BG sur la base de la théorie du module.

Le deuxième chapitre concerne la représentation des défauts composants sur un modèle BG. L'objectif de cette modélisation est d'utiliser par la suite les propriétés cau-

sales et structurelles de BG pour une prise de décision sur la détectabilité et l'isolabilité de ce défaut.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude structurelle d'un système du point de vue détection et isolation de défauts. Dans cette partie, en combinant la théorie du module avec les propriétés structurelles et causales de l'outil BG, les conditions graphiques de détectabilité et d'isolabilité structurelles de défauts composants ont été proposées. Ces dernières sont simples à vérifier sur le modèle BG. Ainsi, un placement de capteur optimal pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts composants a été proposé en utilisant la définition de la longueur du chemin causal sur le modèle BG.

Le chapitre quatre présente une étude de cas par une application au véhicule autonome intelligent, appelé RobuTAINeR conçu dans le cadre d'un projet européen IN-TRADE pour le chargement et déchargement de containers dans les ports [[InTraDE 2012](#)]. Les résultats de co-simulations ont été analysés pour montrer la validité des résultats structurels obtenus.

La conclusion fait état de thème abordé dans ce manuscrit, permettant de dégager des axes de recherches pouvant contribuer à compléter les travaux présentés dans cette thèse.

Chapitre 1

Etat de l'art

Sommaire

1.1 Introduction	11
1.2 Concepts généraux	12
1.2.1 Les méthodes à base de données	15
1.2.2 Les méthodes à base de modèle	16
1.3 Détection et isolation structurelle d'un défaut	18
1.3.1 Méthodes Analytiques	19
1.3.2 Méthodes Graphiques	24
1.4 Conclusion	31

1.1 Introduction

Aux principales performances recherchées dans un système de diagnostic, qui sont la capacité de ce dernier à détecter et isoler un défaut dès son apparition (Fault Detection and Isolation, FDI), correspond le concept de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles de défauts. Ce dernier est introduit afin de décrire les propriétés structurelles du système physique du point de vue FDI. La détectabilité et l'isolabilité d'un défaut sont analysées généralement sur la base de la matrice de signature de pannes déduite à partir des résidus structurés ou directionnels par exemple. En pratique on considère d'abord la

signature de panne théorique qui doit ensuite être validée en ligne sur le procédé réel par la matrice de signature dite pratique. En raison des problèmes introduits par les incertitudes de mesure et/ou paramétriques, ces deux signatures peuvent être différentes. L'étude structurelle d'un système du point de vue FDI joue un rôle très important, puisqu'elle intervient dans la définition du cahier des charges du système physique et aussi, dans la conception du système de diagnostic avant conception du système réel. Dans ce chapitre, nous présenterons un aperçu général sur les différentes approches de la détection et de l'isolation de défauts. Par ailleurs, nous introduirons le concept de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles de défauts, ainsi que les travaux existants dans le domaine et nous présenterons l'intérêt du BG pour traiter une telle problématique.

1.2 Concepts généraux

Un système dynamique est dit en fonctionnement *normal* lorsque celui-ci est capable d'assurer les fonctions pour lesquelles il a été conçu. L'apparition d'un défaut sur un des composants du système peut engendrer un dysfonctionnement sur le composant, ainsi le système peut ne pas accomplir avec succès les fonctions requises. Dans la littérature, un défaut est défini par :

Définition 1.1 : (*Défaut*) *Un défaut est une déviation non autorisée et imprévue d'au moins une propriété caractéristique ou d'un paramètre du système par rapport à la condition standard, [Isermann 2006].*

Un défaut peut générer la défaillance du composant, donc ce dernier n'est plus en mesure d'accomplir une ou plusieurs fonctions requises. Dans ce cas, le système est dit en fonctionnement *défaillant* et un arrêt du système est envisagé si le défaut est jugé critique pour le fonctionnement de ce dernier ou bien le comportement du système défaillant est dit risqué sur l'environnement qui l'entoure. Par exemple, si un défaut se produit sur un des capteurs installés sur le système (Figure 1.1), la mesure acquise par ce capteur n'est plus sûre et/ou indisponible ; la tâche associée au capteur n'est plus assurée, ce qui pourrait être nuisible pour le fonctionnement du système.

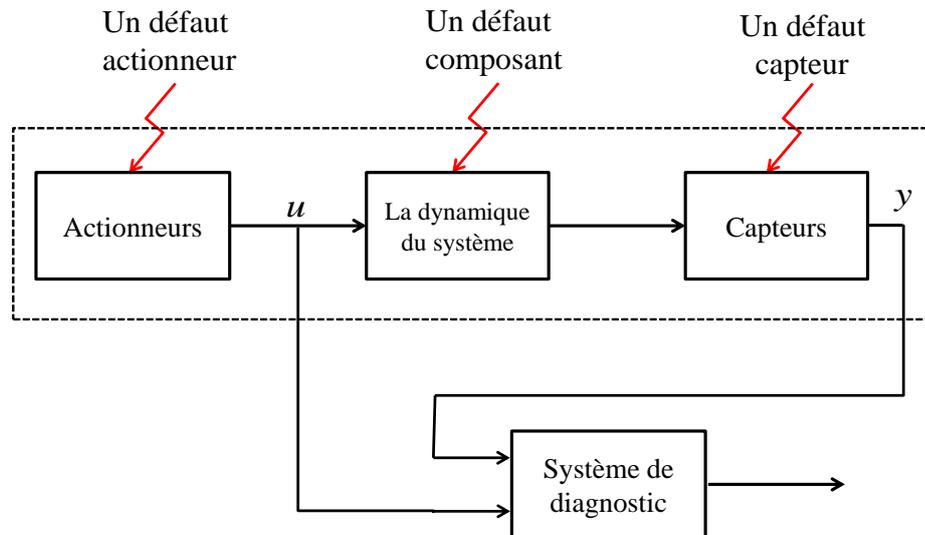


Figure 1.1 – Les différents types de défauts et l’architecture générale d’un système de diagnostic

Pour déterminer si le système est en fonctionnement normal ou défaillant, un système automatisé est conçu pour pouvoir assurer cette nouvelle tâche, on lui confère le nom de système de *diagnostic*.

Définition 1.2 : *(Diagnostic)* Le diagnostic consiste à identifier de la cause probable de la défaillance du système à l’aide d’un raisonnement logique basé sur un ensemble d’informations.

La Figure 1.1 représente l’architecture générale d’un processus industriel en considérant un système de diagnostic. Comme le montre la figure, les défauts suivants sont généralement considérés :

- Un défaut actionneur (capteur) : un défaut sur un de ces éléments peut être représenté par une déviation des valeurs fournies par ces derniers ou par une perte globale de la fonction de l’élément ;
- Un défaut composant : représente une modification de la structure du système (comme par exemple une fuite dans une conduite), ou d’un paramètre physique. Ce type de défaut engendre un changement du comportement du système.

Pour un système de diagnostic, l'ensemble d'informations utilisé représente les observations obtenues à partir du système (les entrées fournies par les actionneurs (u), les mesures acquises par les capteurs (y)), et la connaissance a priori sur le système (par exemple les caractéristiques physique du système). Les principales performances recherchées dans un système de diagnostic sont :

- Détection du défaut : détection de l'apparition de défauts (dans les unités fonctionnelles du processus), qui conduisent à un comportement indésirable ou intolérable de l'ensemble du système. A ce stade, une alarme est générée.
- Isolation du défaut : classification des différents défauts dont le but est de localiser le/ou les équipements défectueux ;
- Analyse du défaut : la détermination du type, de l'ampleur et de la cause du défaut.

Un système de diagnostic est conçu en fonction des performances recherchées, les différents types de système de diagnostic sont données par la Table 1.1.

Type du système de diagnostic	Type de sortie	Performance
Détection de défauts (FD)	Signaux d'alarmes	Indiquer la présence d'un défaut
Détection et isolation de défauts (FDI)	Signaux d'alarmes classés	Montrer quel composant est défectueux
Détection et isolation de défauts et analyses (FDIA)	Données	Fournir des informations et l'amplitude de défaut

TABLE 1.1 – Performance des systèmes de diagnostic

Définition 1.3 : (*Indicateur*) *Un indicateur de défaillance est une quantité significative et pertinente à partir de laquelle il est possible de détecter une défaillance.*

En résumé, un système de diagnostic est essentiellement basé sur l'*observation* de symptômes d'une défaillance et l'*identification* de la cause de celle-ci. L'observation réside en la détection du défaut, elle est réalisée en comparant les observations du système en fonctionnement anormal avec celles en fonctionnement normal. Tandis que l'identification

consiste à classer les symptômes afin d'obtenir une localisation (Isolation) de la cause du défaut. Dans la littérature, différentes méthodes ont été développées pour le diagnostic de défauts. En fonction du type de connaissances utilisées, deux grandes familles peuvent être distinguées :

- Méthodes basées sur l'historique du système ;
- Méthodes basées sur le modèle dynamique et sur la structure du système.

La Figure 1.2 présente une classification des méthodes de diagnostic.

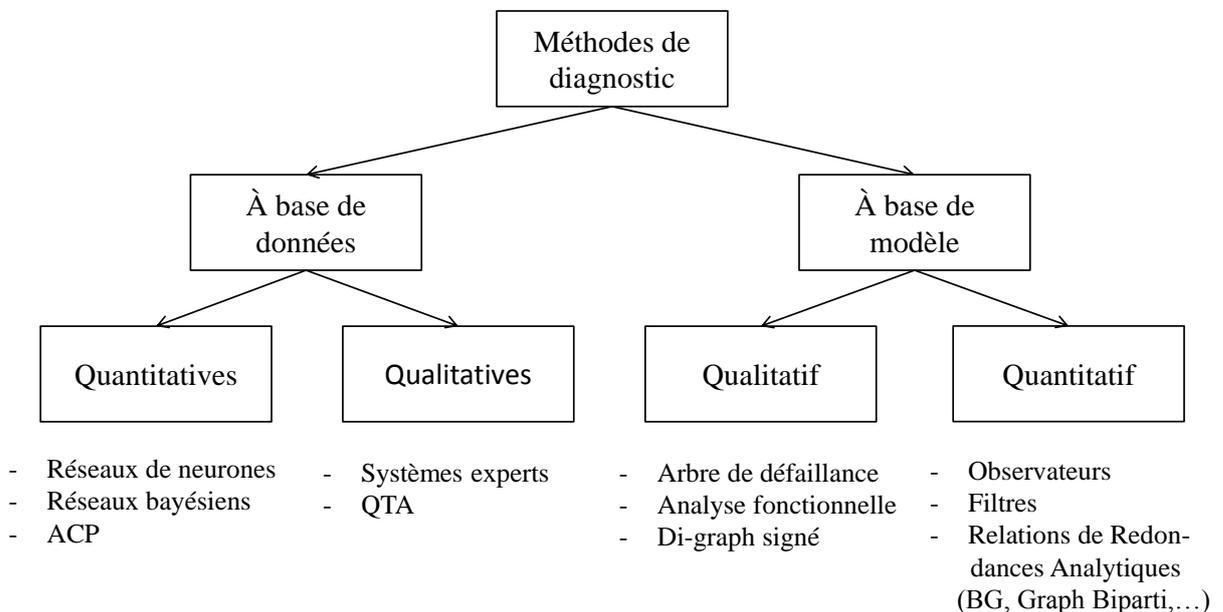


Figure 1.2 – Classification des méthodes de diagnostic

1.2.1 Les méthodes à base de données

Les méthodes basées sur l'historique du système, appelées aussi les méthodes à base de données (Data-based methods) reposent sur la connaissance a priori des observations antérieures et archivées du système. Un traitement est appliqué alors à celles-ci afin d'extraire des caractéristiques qui correspondent au fonctionnement normal et anormal du système. Ces méthodes sont dites *quantitatives* ou *qualitatives*.

- Les méthodes quantitatives s'appuient sur l'intelligence artificielle (IA) comme les réseaux de neurones [Maki 1997],[Frank 1997], les réseaux bayésiens [Srinivas 1994, Yongli 2006] ou bien sur un traitement statistique comme l'analyse en composantes principales (ACP) [Gertler 2004, Wang 2004, Tharrault 2008]. Dans ce cas, le problème de détection et d'isolation de défauts consiste à résoudre un problème de reconnaissance de formes (RDF). Le but de ces méthodes est de créer une base de données sous forme de relations de causes à effets entre les observations classées et les symptômes de défaillances. L'utilisation de classificateurs a pour but la détermination de la classe qui correspond aux observations acquises lorsque le système est en marche, permettant ainsi de détecter et d'isoler un défaut dès son apparition.
- Les méthodes qualitatives sont essentiellement basées sur les systèmes experts ou l'analyse qualitative de la tendance (QTA). Les systèmes experts [Moyes 1995, Qian 2008] sont basés généralement sur la connaissance de l'observation, le choix de la représentation de l'observation et son codage dans une base de connaissances. La procédure de l'inférence est basée sur le raisonnement de l'expert, codé sous forme de règles (if then else). Les méthodes QTA [Maurya 2005, Maurya 2007] sont basées sur l'analyse et la représentation qualitatives des tendances du processus afin d'expliquer les différents événements qui encourent le système, élaborer un diagnostic de dysfonctionnement et prédire les états futurs.

Les méthodes de diagnostic basées sur les données du système ont l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance analytique et structurelle du système physique. Elles reposent seulement sur les données collectées dans la base de données : historique, règles, ou de formes. Cependant, il est très difficile d'obtenir des informations appropriées sur les différents modes opératoires du système physique.

1.2.2 Les méthodes à base de modèle

Les méthodes basées sur le modèle dynamique et sur la structure du système, appelées aussi les méthodes à base de modèle (Model-based methods), s'appuient sur la

connaissance physique du processus à surveiller. Cette connaissance donne naissance à un ou plusieurs modèles (analytiques ou graphiques) qui décrivent le système ainsi que son comportement en fonctionnement normal ou anormal. Les méthodes de diagnostic à base de modèle sont divisées en deux catégories : *les méthodes qualitatives* et *les méthodes quantitatives*

- Les méthodes qualitatives reposent sur une modélisation entrées-sorties en termes de fonctions (connaissances) qualitatives centrées autour de différentes unités de processus. Il existe deux sortes de modèles qualitatifs : modèle causal et modèle hiérarchique. Le diagnostic à base d'un modèle qualitatif causal est fondé sur des relations de causes à effets. Ces relations peuvent être représentées sous forme d'un graphe direct signé (SDG) [Vedam 1997, Maurya 2004, Kelly 2006], ou bien sous forme d'une arbre de défaillance [Bartlett 2005, Hurdle 2009] ; Alors que le diagnostic à base d'un modèle hiérarchique s'appuie sur une décomposition fonctionnelle du système [Larsson 1994, Xiaojun 2009].

Ces méthodes sont faciles à développer et à appliquer car elles ne nécessitent pas de représenter avec précision les relations physiques internes du système considéré. Par contre, la qualité de la méthode dépend fortement des connaissances de l'expert. Enfin, les résultats de diagnostic peuvent fournir un ensemble large de solutions possibles.

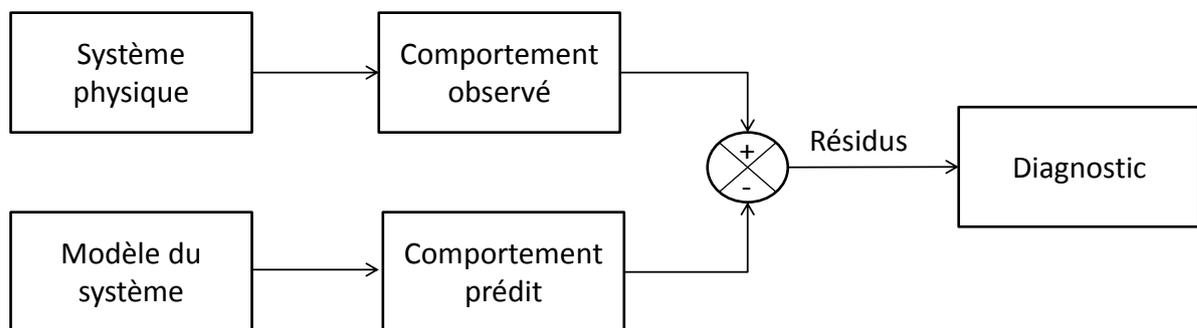


Figure 1.3 – Diagnostic à base de modèle

- Les méthodes quantitatives sont basées sur une modélisation analytique des relations entrées-sorties du processus, généralement sous forme d'une représentation d'état. Le diagnostic à base de ces modèles est basé sur la génération de signaux indicateurs de défaut appelés *les résidus*, obtenus par une comparaison entre le comportement observé et le comportement prédit du système physique, comme le montre la Figure 1.3. Le système est en fonctionnement normal si les résidus sont proches de zéro, sinon il est en fonctionnement défaillant. La classification des différents résidus permet d'isoler le composant défectueux. Il existe différentes méthodes de génération des résidus : les observateurs [Patton 1997, Hammouri 1999], les filtres [Edelmayer 1994, Henry 2001], les relations de redondances analytiques (RRAs) [Chow 1984, Gertler 1997, Staroswiecki 2000, Blanke 2003, Ould-Bouamama 2003, Samantary 2008a].

Les méthodes de diagnostic à base de modèle présentent quelques avantages intéressants tels que : le modèle du système est basé sur des principes physiques, la prise en considération du régime transitoire. L'obtention de différents modes de fonctionnement ne nécessite pas un apprentissage sur le processus réel. Toutefois, un modèle précis du système physique est parfois difficile à obtenir surtout en présence des incertitudes paramétriques et des perturbations qui, quelquefois, mènent aux fausses alarmes. Finalement, les performances du système de diagnostic dépendent fortement de l'architecture de mesures du système et de la précision du modèle.

1.3 Détection et isolation structurelle d'un défaut

La détectabilité structurelle d'un défaut doit être exprimée indépendamment :

- des entrées, des perturbations, et des incertitudes de modélisation,
- du type et de l'amplitude du défaut.

Définition 1.4 : (*Détectabilité structurelle*) un défaut est dit structurellement détectable si son apparition entraîne un changement des sorties du système par rapport au fonctionnement nominal, et cela indépendamment du type et de l'amplitude du défaut.

Quant au problème de l'isolabilité structurelle, il revient à distinguer l'influence de deux défauts. Elle est vérifiée à l'aide de la définition suivante :

Définition 1.5 : *(Isolabilité structurelle) Deux défauts sont dit structurellement isolables, si l'influence de chaque défaut sur les sorties du système est différente.*

Comme illustré par la Figure 2, deux types de méthodes existent pour vérifier la détectabilité et l'isolabilité structurelles d'un défaut : *les méthodes analytiques* et *les méthodes graphiques*.

1.3.1 Méthodes Analytiques

Ces méthodes sont basées sur un modèle analytique du système, généralement mis sous la forme de représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} x(t) = Ax(t) + Bu(t) + LF(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrée, $y \in \mathbb{R}^k$ est le vecteur de sortie. $F \in \mathbb{R}^r$ est le vecteur défaut exprimé en fonction du temps et est supposé inconnu. Les matrices A , B , C et L sont des matrices constantes de dimension appropriée.

Le but est de trouver des conditions mathématiques qui vérifient la détection et l'isolation d'un défaut (F). Parmi les méthodes d'analyse de détection et d'isolation de défaut, on distingue les méthodes géométriques et les méthodes algébriques.

Les méthodes géométriques

Les méthodes géométriques, basées sur le concept des espaces invariants; sont introduites [Basile 1992, Wonham 1985] afin d'étudier les propriétés structurelles des systèmes et la synthèse des lois de commande. Ces méthodes ont été exploitées également pour étudier les conditions de détectabilité et d'isolabilité structurelles d'un défaut [Massoumnia 1989]. Ces dernières sont données en termes d'espaces invariants inobser-

vables, comme démontré ci-dessous. Mais d'abord, nous commencerons par introduire un espace invariant :

Définition 1.6 : *Un sous-espace W est dit un sous-espace (C, A) -invariant (conditionné invariant) si :*

$$A(W \cap \ker C) \subseteq W \quad (1.2)$$

Le problème de détection et d'isolation de défaut est basé principalement sur le concept des sous-espaces invariants inobservables dont la définition est donnée par :

Définition 1.7 : *Un sous-espace S est dit un (C, A) -sous espace inobservable si :*

$$S = \langle \ker HC | A + DC \rangle \quad (1.3)$$

où $D : Y \rightarrow X$ et $H : Y \rightarrow Y$.

Plusieurs algorithmes et théorèmes existent dans la littérature afin de déterminer les sous-espaces inobservables indépendamment des projections : D et X .

Le problème de détection et d'isolation des défauts $F(t)$ de l'équation (1.1) revient à concevoir un générateur de résidus dynamiques ayant en entrées les observations du système (u et y) et en sortie un ensemble de résidus $res_i(t), i \in p$ tel que :

- En absence de défauts, les résidus $res_i(t)$ tendent asymptotiquement vers zéro.
- Les résidus $res_i(t)$ pour $i \in \Omega_j$ sont sensibles aux défauts affectant le composant j du système, alors que les résidus $res_\alpha(t)$ où $\alpha \in p - \Omega_j$ ne le sont pas.

La famille prédéfinie des ensembles de codage $\Omega_j \subseteq p, j \in r$ doit être choisie de telle sorte qu'en ayant distingué les résidus qui sont égales à zéros et ceux qui ne sont pas, le défaut est identifié. Pour la détection de tous les défauts possibles, les ensembles de codage ne doivent pas être vides. Quant à l'isolation, il faut que tous les ensembles de codage soient distincts entre eux. Sur la base du concept des sous-espaces inobservables, une condition pour résoudre le problème fondamental de génération de résidus (Fundamental Problem of Residual Generation, FPRG) ($\Omega_i = \{i\}$) a été proposée, elle est donnée par :

Théorème 1.1 : *Le problème de FPRG a une solution si et seulement si, il existe des sous-espaces (C, A) -inobservables*

$$S_i^* = \inf G(A, C, \sum_{j=1, j \neq i}^k L_j), \quad i \notin r \quad (1.4)$$

Tel que : $S_i^ \cap L_i = 0, i \in r$.*

Une étape importante dans la génération de résidus res_i consiste à intégrer l'image des signatures de défauts qui nécessite de découpler $(L_j, (i \neq j))$ dans les sous-espaces inobservables de res_i et d'extraire les sous-espaces inobservables de telle sorte que dans l'espace restant, ceux des défauts n'apparaissent pas. Autrement dit, l'image de L_i ne doit pas se croiser avec les sous-espaces inobservables de res_i .

Une condition générique de la solvabilité de FPRG est donnée par :

Théorème 1.2 : *Soit A, C , et L des matrices arbitraires de dimension $n \times n, n \times k$ et $n \times r$ respectivement et $v = \sum_{i=1}^r r_i$. Le FPRG a une solution générique si, et seulement si :*

$$v \leq n \quad (1.5)$$

et

$$v - \min \{r_i, i = 1 \dots r\} > k \quad (1.6)$$

Les méthodes géométriques pour la solvabilité du problème fondamental de génération de résidus (FPRG) considèrent les différents types de défauts (capteurs, actionneurs, ou composants). Ainsi, elles sont utilisées aussi bien pour les systèmes linéaires [Massoumnia 1989] que pour quelques classes de systèmes non-linéaires [Meskin 2007]. Cependant, avoir un bon modèle analytique représentatif et robuste aux erreurs de modélisation n'est pas toujours possible, ce qui pourrait nuire à la caractérisation des matrices d'états du système car les conditions de solvabilité ainsi que la qualité de la décision dépendent de ces matrices. En outre, ces méthodes sont basées uniquement sur l'architecture de mesure du système. Donc, la solvabilité du PFGR dépend fortement du nombre de

capteurs installés sur le système. Par ailleurs, ces méthodes ne permettent pas de proposer une stratégie de placement de capteurs optimale, puisqu'elles dépendent des matrices caractéristiques du système. Aussi, la procédure de vérification de détection et d'isolation structurelles est couteuse en terme de temps de calcul.

Les méthodes algébriques

Les méthodes algébriques d'analyse de détection et d'isolation de défauts sont basées principalement sur la théorie du *module* introduite par [Fliess 1989]. Elles permettent d'associer à un système linéaire un $k[\delta]$ -module à gauche dont la définition est donnée par :

Définition 1.8 : Un système linéaire Ω^{pert} est défini comme étant un $k[\delta]$ -module à gauche de type fini libre (chapitre 3.2.1), où $k[\delta]$ est l'anneau des opérateurs différentiels linéaires de la forme $\sum_{\text{finite}} c_v \delta^v$, $c_v \in k$ avec δ l'opérateur de différentiation, et k le corps des nombres réels \mathbb{R} ou complexes \mathbb{C} .

Dans le système linéaire Ω^{pert} , deux sous-ensembles sont distingués, l'ensemble des défauts, noté par " F " et l'ensemble des perturbations, noté par " π ". Ces deux ensembles n'interagissent pas, i.e. $span_{k[\delta]}(F) \cap span_{k[\delta]}(\pi) = \{0\}$ [Fliess 2003]. Le système nominal quant à lui, est défini par $\Omega = \Omega^{pert} / span_{k[\delta]}(\pi)$.

Définition 1.9 : Un système entrée-sortie est un système linéaire Ω^{pert} , équipé par une entrée u et une sortie y [Fliess 2003], tel que :

- Les entrées du système linéaire u sont une séquence finie d'éléments $u = (u_i)_{1 \leq i \leq m}$ tels que $\Omega^{pert} / [u]_{k[\delta]}$. Elles sont supposées indépendantes.
- Les sorties du système linéaire Ω^{pert} sont une séquence finie d'éléments $y = (y_i)_{1 \leq i \leq k}$ de Ω^{pert}

Les approches algébriques traitent le problème de détection et d'isolation de défauts comme un problème d'observation, c'est-à-dire, l'étude de l'observabilité de la variable de défaut (F) par rapport aux variables d'entrées (u) et de sorties (y). La surveillabilité du système est étudiée en utilisant le théorème suivant :

Théorème 1.3 : Si le système Ω^{pert} est dit observable (dans le sens que les états sont observables par rapport aux entrées et sorties), donc il est surveillable si et seulement si, le défaut F est observable par rapport aux entrées u , les sorties y , et états x , [Diop 2001].

La détectabilité du défaut F est basée sur la définition suivante :

Définition 1.10 : (Détectabilité algébrique) Un défaut F est dit détectable, s'il est observable par rapport aux entrées u et sorties y , [Fliess 2003].

Quant à l'isolabilité, elle est basée sur :

Définition 1.11 : (Isolabilité algébrique) : chaque variable de F est dite isolable si et seulement si, il existe un système d'équations de parité [Fliess 2003]

$$M \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_r \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} + S \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

où $M \in k[\delta]^{r \times r}$, $Q \in k[\delta]^{r \times m}$, $S \in k[\delta]^{r \times k}$, $\det M \neq 0$.

Autrement dit, la détectabilité et l'isolabilité algébrique consistent en :

- L'observabilité du système : les états du système pouvant être exprimés en fonction des sorties et leurs dérivées,
- Chaque variable de défauts doit être écrite sous la forme d'une équation polynomiale F_i et un nombre fini de dérivées de u et y avec des coefficients dans $k[\delta]$.

$$\varphi(F_i, u, \dot{u}, \dots, y, \dot{y}, \dots) = 0 \quad (1.8)$$

L'analyse de détectabilité et d'isolabilité structurelles à base de méthodes algébriques repose sur l'observabilité de la variable défaut par rapport aux variables du système, en l'occurrence les entrées et les sorties du système. Cette approche d'analyse est appliquée pour les systèmes linéaires [Fliess 2003, Fliess 2004], comme pour une classe de systèmes non-linéaires [Cruz-Victoria 2008b, Marinez-Guerra 2006]. Cependant, seuls les défauts

sur les actionneurs et les capteurs sont considérés. Une combinaison avec l'outil BG a été envisagée dans [Cruz-Victoria 2008a] : l'outil BG est utilisé comme un moyen de modélisation, et dans [El-Osta 2005] : a étudié la surveillabilité de défauts d'actionneurs sur un modèle BG en utilisant la notion de la platitude. L'approche algébrique repose sur le modèle analytique du système. Par conséquent, il est nécessaire d'avoir un bon modèle représentatif pour la caractérisation de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles d'un défaut. Cette méthode est basée aussi sur l'architecture de mesure du système, donc la détectabilité et l'isolabilité d'un défaut dépendent du nombre de capteurs existants sur le système.

1.3.2 Méthodes Graphiques

Les approches graphiques représentent graphiquement la structure du système et/ou sa dynamique à partir du modèle analytique du système comme le *Digraphe* [Dion 2003] ou *Graphe Bipartite* [Blanke 2003], ou bien à partir des connaissances de la physique du système comme le *Bond Graph* (BG) [Karnopp 1975]. Ces approches sont bien adaptées pour l'analyse des propriétés structurelles du système, parce que la structure du modèle graphique est indépendante des valeurs numériques des paramètres du système.

Les méthodes basées sur le digraphe

Les méthodes d'analyses structurelles basées sur le graphe orienté reposent sur une représentation graphique d'un système linéaire structuré. Ce dernier est décrit par l'équation 1.9 et obtenu en fixant dans les matrices du système les éléments nuls et en remplaçant les éléments non nuls par des paramètres indépendants, notés λ_i , $i = 1 \dots h$.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_\lambda x(t) + B_\lambda u(t) \\ y(t) = C_\lambda x(t) + D_\lambda u(t) \end{cases} \quad (1.9)$$

Une caractéristique intéressante des systèmes structurés est la généricité de leurs propriétés structurelles par rapport aux paramètres λ_i , $i = 1 \dots h$, i.e., vrai pour presque toutes les valeurs des paramètres λ_i . Par conséquent, un graphe représentatif de ce type de systèmes permet d'étudier ses propriétés structurelles, [Hovelaque 1996].

Dans la littérature, un graphe orienté, noté par $G(S, A)$, est l'outil graphique le plus utilisé pour représenter graphiquement un système structuré. L'ensemble S représente l'ensemble de sommets et comprend les diverses variables du système, plus précisément $S = X \cup U \cup Y$, où $X = x_1, \dots, x_n$ est l'ensemble des sommets associé aux variables d'états, $U = u_1, \dots, u_m$ est l'ensemble des sommets associé aux variables d'entrées, et $Y = y_1, \dots, y_k$ est l'ensemble des sommets associé aux variables de sorties. L'ensemble des arcs A représente les relations entre ces variables.

En utilisant le graphe orienté, plusieurs problèmes ont été abordés comme par exemple : l'observabilité, la commandabilité [Dion 2003], le découplage par retour d'état [Dion 1993], la réjection de perturbation [Commault 1991] et l'observabilité des entrées inconnues [Boukhobza 2007]. Ces problèmes ont été résolus graphiquement en utilisant la notion de chemins et de cycles. Quant au problème de détectabilité et d'isolabilité, il a été également étudié en utilisant le graphe orienté. Les conditions nécessaires et suffisantes pour la détectabilité et la diagnosabilité structurelles d'un défaut ont été proposées dans [Commault 2002]. Ces dernières sont basées sur l'observabilité structurelle du système structuré et sont données graphiquement par :

- Tous les sommets d'états sont connectés à au moins un sommet de sortie,
- L'existence d'une union disjointe de cycles et de chemins états-sorties qui couvrent tous les sommets de X .

Une union disjointe de sommets est définie par un ensemble de chemins, où chaque chemin n'a aucun sommet en commun avec les autres chemins. Quant au chemin, il est défini par une séquence d'arcs tous parcourus dans le même sens.

En ce qui concerne l'analyse structurelle de la détection et de l'isolation de défauts, une condition suffisante pour la solvabilité avec stabilité d'un observateur ou d'un banc d'observateurs a été proposée dans [Commault 2002]. Cette condition est la suivante :

$$K = C_k + r \tag{1.10}$$

où K est le nombre maximal de chemins disjoints *perturbation* \cup *défaut - sortie*, C_k est le nombre de chemins disjoints *perturbation-sortie*, et r est le nombre de défauts considérés. Cette condition est valable quand un seul observateur ou un banc d'observateurs est utilisé. L'utilisation d'un banc d'observateurs permet la détection et l'isolation de défauts multiples. Par contre, quand un seul observateur est utilisé, seule la détection de défauts est assurée. Si la condition 1.10 n'est pas satisfaite, l'ajout de nouveaux capteurs devient nécessaire. Toutefois, pour des raisons de coût, l'ajout d'un nombre minimal de capteurs avec un meilleur placement est important afin de détecter et d'isoler un nombre maximal de défauts. En se basant sur l'équation 1.10, [Commault 2007] proposent le nombre maximal de capteurs à ajouter. Cependant, l'ajout d'un nouveau capteur devrait assurer que le nombre de chemins d'entrées-sorties augmente. Une autre approche pour le placement optimal de capteurs, basée sur les séparateurs d'entrées, a été abordée dans [Commault 2008]. Les méthodes d'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles basées sur le digraphe considèrent uniquement les défauts d'actionneurs et les défauts de capteurs puisque le digraphe représente uniquement les variables d'entrées u , de sorties y et d'états x . Les paramètres du modèle ne sont pas représentés.

Les méthodes basées sur le Graphe Biparti

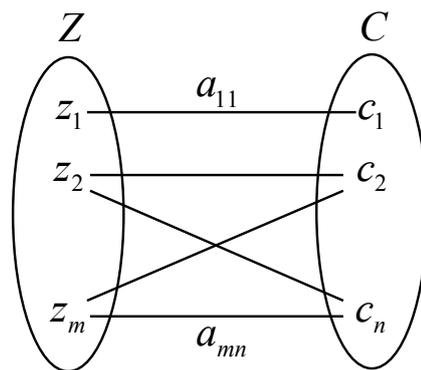


Figure 1.4 – Un graphe biparti

Un graphe biparti $G(S, A)$, donné par la Figure 1.4, est une représentation graphique de la structure du système. Il est composé de deux ensembles de noeuds Z et C et un

ensemble d'arcs A . L'ensemble Z comprend les variables qui définissent le comportement dynamique du système. Ces variables peuvent être quantitatives, qualitatives, ou floues, et sont divisées en deux sous-ensembles : l'ensemble des variables connues K et l'ensemble des variables inconnues X . Les variables d'entrées u et de sorties y sont considérées comme des variables connues.

$$K = U \cup Y \quad (1.11)$$

L'ensemble C représente les relations analytiques entre les variables de l'ensemble $Z = K \cup X$. L'influence mutuelle entre les variables Z et les contraintes C est représentée sur le graphe par des arcs A tel que : $a_{ij} \in A$ si une variable $z_i \in Z$ apparaît dans l'équation $c_j \in C$.

L'analyse structurelle à base du graphe biparti est basée sur la notion de *couplage* entre les variables et les contraintes. Le couplage consiste en un ensemble de paires (x_i, c_j) tel qu'une variable x_j puisse être calculée en résolvant la contrainte c_j sous l'hypothèse que toutes les autres variables sont connues. Du couplage, il en résulte deux situations :

- une variable qui ne peut pas être couplée,
- une variable couplée de différentes façons, autrement dit, elle peut être calculée à partir de différents sous-ensembles d'équations.

Le couplage entre les variables peut décomposer canoniquement un graphe biparti de dimension finie en trois sous-graphes uniques :

- un sous-système *sur-déterminé* : couplage *complet* par rapport aux variables inconnues (X) mais *incomplet* par rapport aux contraintes (C) : système observable et redondant.
- un sous-système *juste-déterminé* : couplage *complet* par rapport aux variables inconnues (X) et aux contraintes (C) : système observable mais pas redondant.
- un sous-système *sous-déterminé* : couplage *incomplet* par rapport aux variables inconnues (X) mais *complet* par rapport aux contraintes (C) : système non observable et non redondant.

Il a été montré [Declerck 1991, Staroswiecki 1989] que le sous-système *sur-déterminé* est la partie surveillable du système car il est le seul à présenter une certaine redondance, ce qui peut être exprimé par des relations de redondances analytiques (RRAs). En résumé, l'analyse structurelle de détection et d'isolation de défauts en utilisant le graphe biparti consiste à identifier le sous-graphe surdéterminé du système. [Krysander 2002] et [Krysander 2005] propose des algorithmes pour déterminer les sous-graphes surdéterminés en analysant les différents couplages en fonction de l'architecture d'instrumentation utilisée. Les algorithmes proposés sont complexes en terme de calcul et ne sont pas utilisés pour les systèmes à grande échelle. Pour contourner ce problème, [Krysander 2008] propose un algorithme basé sur la décomposition canonique de Dulmage-Mendelson du graphe biparti. Bien que ce dernier algorithme présente quelques améliorations par rapport au [Krysander 2002] et [Krysander 2005] au niveau de la complexité du calcul, quelques limites sont à souligner telles que la mise en oeuvre en pratique (utilisation de la dérivée d'ordre élevé source de problème de l'évaluation numérique du résidu).

Les méthodes basées sur le Bond Graph

Un modèle BG, introduit par [Paynter 1961] et formalisé par [Karnopp 1975, Breedveld 1984] est une représentation graphique des phénomènes d'échange de puissances dans un système. Ces puissances sont décrites par des couples effort-flux (e, f) , liés par l'intermédiaire de jonctions.

Définition 1.12 : *BG est une structure graphique, notée par $G(S, A)$, où les noeuds S représentent les composants, les sous-systèmes, et autres éléments de bases. Ces derniers sont liés par des liens A , appelés aussi liens de puissance, qui représentent le transfert de puissance mutuelle instantanée.*

En exploitant l'aspect multi-physique de l'outil BG, une représentation graphique indépendante du système physique étudié est obtenue. A partir de cette dernière et en utilisant les propriétés structurelles et causales de l'outil, plusieurs problèmes ont été étudiés structurellement : comme l'observabilité, la contrôlabilité [Sueur 1991], les zéros

invariants [Chalh 2007], l'inversibilité du système [Ngwompo 1996], et aussi la détection et l'isolation de défauts [Samantary 2008b, Samantary 2008a, El-Osta 2006].

Il existe deux approches basées sur le BG pour l'analyse structurelle de la détectabilité et de l'isolabilité de défauts comme il le montre la Figure 2 : une approche basée sur l'analyse des propriétés causales et structurelles du modèle anneau BG du système défaillant (méthode proposée dans ce travail de thèse) et une approche basée sur l'analyse de la matrice de signature de défauts obtenue à partir des relations de redondances analytiques (RRAs).

Définition 1.13 : Une relation de redondance analytique (RRA) est une contrainte dérivée d'un sous-système surdéterminé et observable, et exprimée en termes de variables connues du processus. Une RRA générée à partir d'un modèle BG a la forme symbolique suivante :

$$RRA : \phi(Se, Sf, De, Df, \theta) = 0 \quad (1.12)$$

où θ est l'ensemble des paramètres associés aux éléments de base du BG qui sont $\theta = \{R, I, C, TF, GY, J\}$. L'évaluation numérique d'une RRA conduit à un résidu $r = eval(RRA) \approx 0$ dont la valeur numérique en l'absence de la défaillance et de bruits doit être nulle.

Ce résidu ou indicateur de défaut exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle qui est supposé être correct. A partir de l'ensemble des expressions des RRAs, une matrice booléenne (M_{ij}) , appelée, la matrice de signature de défaut (Fault Signature Matrix, FSM) est déduite. Les éléments de cette matrice (composée en ligne par les résidus r et en colonne pour les défauts F) sont obtenus comme suit :

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le résidu } r_i \text{ contient le paramètre associé au défaut } F_j, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (1.13)$$

La détectabilité et l'isolabilité structurelle d'un défaut sur un élément constituant le système se fait à l'aide de la logique booléenne. Un défaut sur un composant est dit structurellement détectable si au moins un des résidus est sensible au paramètre lié au composant. Quant à l'isolabilité structurelle, elle est vérifiée si la signature associée à ce défaut est unique.

L'algorithme de génération des RRAs à partir du modèle BG est sommairement réalisé selon les étapes suivantes :

1. Mettre le modèle BG en causalité dérivée en inversant les causalités des capteurs. Ainsi les capteurs deviennent des sources d'information notées SSf ou SSe (source de signal).
2. Ecrire l'équation de jonction de structure 0 et 1 (représentant la conservation de puissance) contenant au moins un détecteur :
 - éliminer les variables inconnues (e_i ou f_i) en parcourant les chemins causaux sur le BG de la variable inconnue vers une variable connue (capteur ou source),
 - pour tout détecteur dont la causalité est inversée une RRA est déduite,
 - pour tout détecteur dont la causalité ne peut pas être inversée, une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature (redondance matérielle) situé dans la même jonction.

La signature du résidu est ensuite aisément déduite. En effet, la RRA est sensible aux défauts associés aux paramètres et capteurs contenus dans son expression et au défaut physique lié à l'équation de conservation. Une RRA déduite par exemple de l'équation de conservation de masse ou d'énergie sera sensible à une fuite de la matière ou d'énergie. De plus les paramètres ont un sens physique plus explicite que les équations déduites par le premier principe ou d'état.

3. Si la seconde RRA est indépendante (signature différente) de la première, alors elle est gardée sinon elle est rejetée.

Pour automatiser la procédure d'obtention des RRAs, une méthodologie est élaborée dans [Ould-Bouamama 2006]. Elle est basée sur les propriétés structurelles et causales de

l'outil BG. [Samantary 2006, Djeziri 2007, Samantary 2008a] ont montré que la surveillabilité d'un système physique est assuré quand son modèle BG est surdéterminé. Dans le cas où le système est sous-déterminé, un placement de capteur devient nécessaire pour améliorer la surveillabilité du système globale. [Khemliche 2006] propose un placement de capteur combinatoire pour la détectabilité de défauts composants.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept de l'analyse structurelle de détection et d'isolation de défauts. Pour l'analyse structurelle de détection et d'isolation de défauts, deux grandes familles existent : les méthodes analytiques et les méthodes graphiques. Les méthodes analytiques sont basées sur le modèle mathématique du système, généralement sous forme d'équations d'états. L'analyse de détectabilité et d'isolabilité structurelles des défauts en utilisant ces méthodes apparait complexe et couteuse surtout pour les systèmes à grande échelle. En outre, seuls les défauts actionneurs et capteurs sont considérés. Tandis que les méthodes graphiques consistent à représenter la structure du système graphiquement en se basant sur le modèle mathématique du système à l'exclusion des BGs, dont la représentation est basée sur l'interprétation graphique de différents phénomènes physiques au sein du système dynamique. Sur la base de la littérature consultée, il apparaît que les conditions de détectabilité et d'isolabilité de défauts sont basées sur l'identification des sous-systèmes déterminés (Graphe Biparti, BG) ou de chemins disjoints entre les défauts et les sorties (Digraphe). Pour un modèle BG, les relations de redondances analytiques générées à partir du graphe sont utilisées pour former la matrice de signature de panne servant à l'analyse des conditions de surveillabilité.

Dans ce travail, nous présentons une nouvelle méthode pour l'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles de défauts. Basées sur la théorie du module et les propriétés causales et structurelles de l'outil BG, de simples conditions graphiques sont présentées afin de vérifier la détectabilité et l'isolabilité structurelles de défauts composants et cela sans avoir recours à la génération analytique des relations de redondance analytiques ni

à la matrice de signature de défauts. Ainsi, un placement de capteur optimal est proposé pour recouvrir la surveillabilité du système en présence de défauts composants.

Chapitre 2

Modélisation de défaut composant par Bond Graph

Sommaire

2.1 Introduction	33
2.2 La méthodologie Bond Graph	34
2.2.1 Les liens de puissances	35
2.2.2 La notion de causalité	35
2.2.3 Eléments de base de BG	36
2.3 Modélisation de défauts composants	40
2.3.1 Types de défauts	40
2.3.2 Modélisation mathématique d'un défaut composant	42
2.3.3 Défaut composant par BG	43
2.3.4 Exemple de modélisation	50
2.4 Conclusion	53

2.1 Introduction

La première étape pour la conception d'un système de diagnostic et/ou de l'analyse structurelle de détection et d'isolation de défauts est l'obtention d'un modèle représentatif

du système physique défectueux. Ce dernier est une représentation abstraite du système et prend en considération ses propriétés physiques, statiques, dynamiques et technologiques. Il existe plusieurs types de modèles : analytique et graphique. Un modèle analytique, consiste à exprimer le fonctionnement du système en fonction des équations différentielles algébriques et algébro-différentielles, généralement mis sous forme d'équations d'états. Quant à un modèle graphique, il consiste à représenter graphiquement le modèle mathématique et la structure du système (le graphe biparti, le graphe orienté). Un modèle BG se distingue par rapport aux autres modèles graphiques puisqu'il ne représente pas seulement la structure du système mais aussi les différents phénomènes physiques et de l'information au sein du système dynamique. Dans ce chapitre, nous introduisons la modélisation des défauts composants par l'outil BG. Par la suite, Le modèle BG obtenu du système physique défectueux sera utilisé dans l'étape de l'analyse de détectabilité et d'isolabilité structurelles de défauts.

2.2 La méthodologie Bond Graph

L'outil BG fondé par [Paynter 1961] et formalisé par [Karnopp 1975, Breedveld 1984] est un langage graphique de modélisation de systèmes physiques dynamiques. Le modèle BG peut être considéré comme étant une interface entre le système physique et le modèle mathématique qui lui est associé. La modélisation par BG se distingue par rapport à d'autres outils graphiques par des propriétés particulières telles que :

- Un outil unifié à tous les domaines de la physique,
- Une approche de modélisation structurée et modulaire pour des systèmes pluridisciplinaires.
- De propriétés causales et structurelles permettant l'analyse et la synthèse des systèmes de pilotage.

2.2.1 Les liens de puissances

Supposons qu'un système physique soit composé de deux sous-systèmes Σ_A et Σ_B . Entre ces deux sous-systèmes, il y a échange de puissance représentée par une demi flèche (Figure 2.1). Le flux de puissance échangée entre les sous-systèmes Σ_A et Σ_B est représenté par un lien (bond) et sa direction par la demi-flèche.

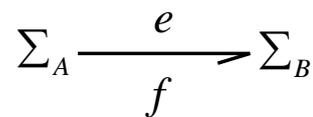


Figure 2.1 – Représentation BG du transfert de puissance

La puissance instantanée échangée entre Σ_A et Σ_B est le produit effort-flux ($p(t) = e(t).f(t)$).

2.2.2 La notion de causalité

La notion de causalité est très importante, elle permet de mettre en évidence les relations de cause à effet au sein d'un système ainsi que sa structure de calcul. Elle représente l'avantage de l'outil BG par rapport aux autres méthodes graphiques. Codé par un trait causal perpendiculaire au lien de puissance, il indique par convention le sens dans lequel l'effort est connu (le flux est alors connu dans le sens opposé). Reprenons le système physique de la Figure 2.1, deux situations peuvent être imposées. Elles sont illustrées par la Figure 2.2 :

- Le sous-système Σ_A applique un effort e sur le sous-système Σ_B , Figure 2.2-(a)
- Le sous-système Σ_B applique un effort e sur le sous-système Σ_A , Figure 2.2-(b)

Grâce à la notion de causalité, plusieurs problèmes de l'automatique tels que l'étude des propriétés d'un système comme l'observabilité et la commandabilité [Sueur 1991] ont été résolus graphiquement.

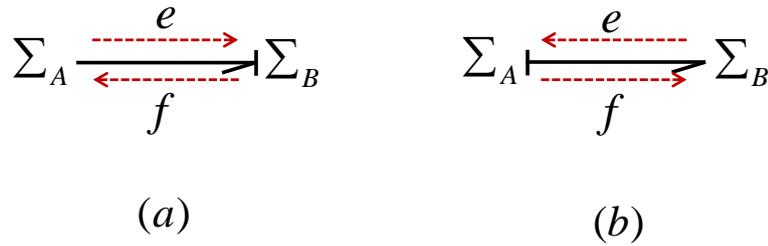


Figure 2.2 – Les différentes configurations de la causalité

2.2.3 Eléments de base de BG

Les éléments de base de l’outil BG peuvent être classés en trois catégories :

- Les éléments passifs : R, C , et I
- Les éléments actifs : Se et Sf
- Les éléments de jonction : $0, 1, TF$ et GY

Les éléments passifs

Les éléments passifs, illustrés par la Figure 2.3 reçoivent de la puissance et la transforment en puissance dissipée (R) ou stockée (I et C). L’élément R est utilisé pour représenter les phénomènes de dissipation d’énergie. Quant aux éléments C et I , ce sont des éléments de stockage d’énergie et sont utilisés pour représenter les phénomènes physiques liant le flux au déplacement (intégrale de flux) pour l’élément C , et l’effort au moment (intégrale de l’effort) pour l’élément I .

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} R, C, I$$

Figure 2.3 – Représentation des éléments passifs

L’élément R (Figure 2.3-(a)) est utilisé pour représenter les phénomènes de dissipation d’énergie. En fonction du domaine considéré, il peut représenter une résistance électrique, une valve hydraulique, un amortisseur, ... etc. L’équation caractéristique correspondante

d'un élément R est une relation statique $\phi_R(e(t), f(t)) = 0$, elle prend une des formes suivantes $e(t) = \phi_R(f(t))$, $f(t) = \phi_R^{-1}(e(t))$ en fonction de la causalité qui est attribuée à l'élément R : résistance ou conductance, respectivement.

L'élément I (Figure 2.3-(b)) est utilisé pour modéliser les phénomènes de stockage d'énergie dont l'équation caractéristique reliant l'effort à l'intégrale de flux est donnée par $\phi_I(e(t), \int f(t)) = 0$. Suivant la causalité, elle peut prendre une de formes suivantes : $f(t) = \phi_I^{-1} \int (e(t))dt$ si l'élément est en causalité intégrale ou $e(t) = \phi_I \frac{d}{dt}(f(t))$ s'il est en causalité dérivée. L'élément I peut représenter un des composants suivants : une inductance électrique, une masse, inertie mécanique ... etc.

L'élément C (Figure 2.3-(b)) est l'élément *dual* de l'élément I . Il est utilisé pour représenter les phénomènes de stockage d'énergie dont l'équation caractéristique reliant le flux à l'intégrale de l'effort est décrit par $e(t) = \phi_C^{-1} \int (f(t))dt$, $e(t) = \phi_C \frac{d}{dt}(f(t))$ suivant que l'élément est en causalité intégrale ou dérivée, respectivement. L'élément C peut représenter un des composants suivants : une capacité, un ressort, un réservoir, ... etc.

Les éléments actifs : les sources

Ces éléments sont qualifiés d'actifs car ils fournissent de l'énergie au système et représentent l'interaction du système avec son environnement (e.g., source de tension ou de courant, force, source de vitesse, ... etc.). Selon la variable imposée (flux ou effort), deux types de sources sont distinguées : source de flux Sf , ou source d'effort Se , Figure 2.4-(a). Dans chacun des cas, une des variables est supposée connue (le flux ou l'effort).

Quand une partie du système est excitée par un phénomène extérieur (signal de commande, perturbation, défaut, ...etc.), une source modulée d'effort (MSe) ou de flux (MSf) est alors utilisée, comme la montre la Figure 2.4-(b).

Les éléments de jonction

Les éléments de jonction (Figure 2.5), notés TF et GY , 0 et 1; sont des éléments conservateurs de puissance, ils servent à coupler les différents éléments (passifs et actifs) et composent le modèle de jonction correspondant à l'architecture du système étudié.

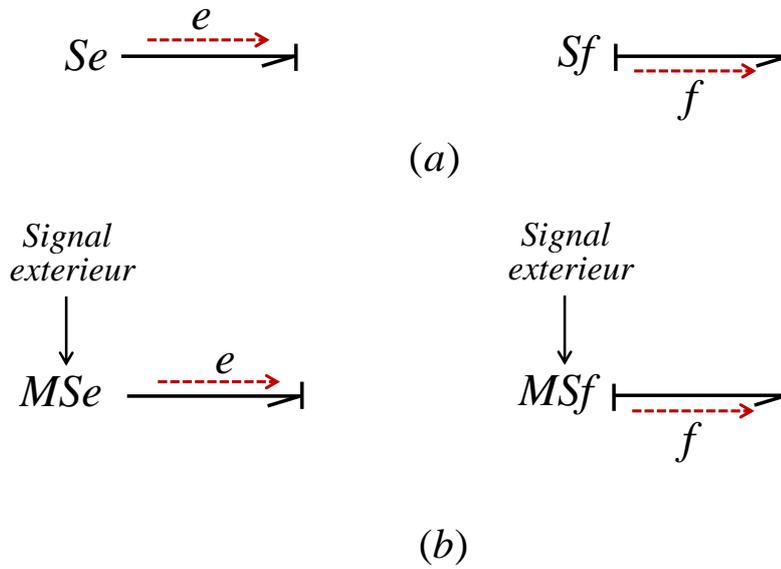


Figure 2.4 – (a) : source d’effort ou de flux, (b) : source d’effort ou de flux contrôlée

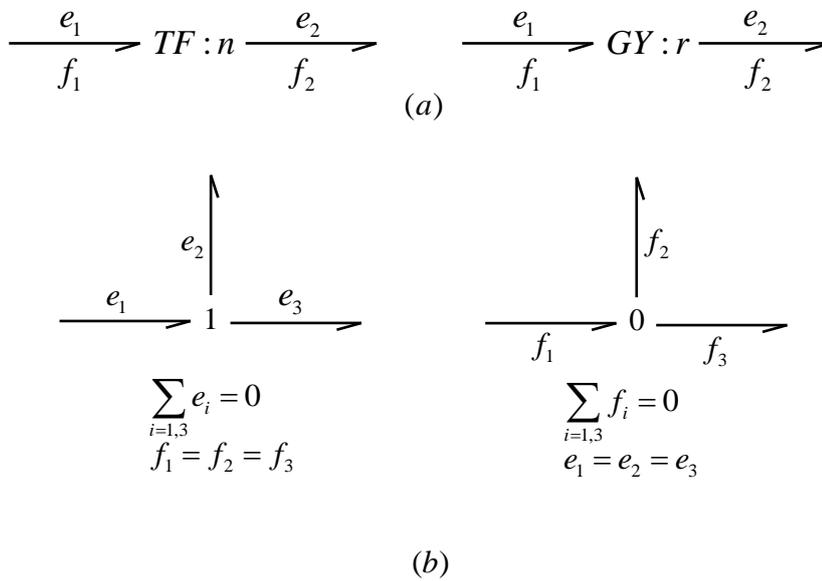


Figure 2.5 – Les éléments de jonction

Les éléments TF et GY sont utilisés pour représenter les phénomènes de transformation d’énergie. Ils sont utilisés pour connecter deux sous-systèmes avec des variables

différentes. Par exemple, les engrenages dans un moteur mécanique sont représentés par un élément TF . Pour un élément TF , les équations caractéristiques associées sont $e_1 = ne_2$, et $f_2 = nf_1$. Quant à l'élément GY , elles sont données par $e_1 = rf_2$ et $e_2 = rf_1$.

Pour les éléments de jonctions 0 et 1, ils sont utilisés pour connecter les différents éléments du système. La jonction 0 connecte des éléments soumis au même effort e , alors que la jonction 1 relie les éléments ayant le même flux f . Les équations tirées à partir des éléments de jonctions sont appelées *les équations constitutives*.

Les détecteurs

Les détecteurs, appelés aussi les sources d'information, sont utilisés pour représenter l'architecture de mesure du système. Ils sont représentés sur le modèle BG par des flèches (Figure 2.6) au lieu de liens de puissance puisque il n'y a pas de transfert de puissance mais un transfert d'information.

$$De \xleftarrow[f=0]{e}$$

(a)

$$Df \xleftarrow[f]{e=0}$$

(b)

Figure 2.6 – Les différents détecteurs (a) : d'effort, (b) : de flux

Comme précédemment mentionné, les éléments connectés à la jonction 1 partagent le même flux, dans ce cas, un détecteur de flux, noté par Df est utilisé pour mesurer ce flux (Figure 2.6-(b)). Ce dernier est utilisé pour représenter un capteur de courant, de vitesse, ... etc. Les éléments connectés à la jonction 0 partagent le même effort, pour le mesurer,

un détecteur d'effort est utilisé. Il est noté par De (Figure 2.6-(a)). Ce dernier est utilisé pour représenter un capteur de tension, de pression, ... etc.

2.3 Modélisation de défauts composants

L'analyse structurelle de détectabilité et isolabilité d'un défaut ainsi que le système de diagnostic est basée essentiellement sur le modèle mathématique et/ou graphique du système physique en mode normal et défaillant. Par conséquent, un modèle approprié au défaut doit être considéré. Une modélisation adéquate du défaut est basée sur la connaissance précise de l'effet du défaut physique sur le système. Suivant la nature du défaut, qu'il soit additif ou multiplicatif, un modèle mathématique correspondant au système physique défectueux est élaboré. Dans cette partie, nous présenterons un modèle graphique basé sur l'outil BG du défaut composant.

2.3.1 Types de défauts

Un défaut est défini dans le premier chapitre comme étant une déviation non autorisée et imprévue d'une propriété caractéristique d'au moins un paramètre du système par rapport à la condition standard. Cette déviation peut être située au niveau des signaux de mesure, de commande, ou une variation sur les paramètres des composants constituant le système. Dans la littérature [Isermann 2006, Ding 2008, Chen 1999], deux types de défauts sont distingués : un défaut additif et un défaut multiplicatif.

Définition 2.1 : (Défaut additif) *Un défaut additif est une déviation de signal $y(t)$ d'une quantité $F(t)$.*

Une représentation graphique d'un défaut additif est illustrée par la Figure. 2.7. Notons dans ce cas, que la mesure acquise par le capteur est déviée de sa valeur standard par le signal additif $F(t)$, qui est le défaut. La détection de cette variation est indépendante des autres signaux et elle est donnée par :

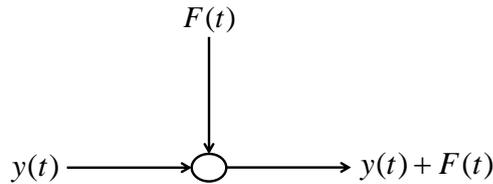


Figure 2.7 – Représentation graphique d'un défaut additif

$$\Delta y(t) = F(t) \quad (2.1)$$

Définition 2.2 : (*Défaut multiplicatif*) Un défaut multiplicatif est une variation sur un paramètre a , puisque une autre variable $u(t)$ est multipliée par $F(t)$.

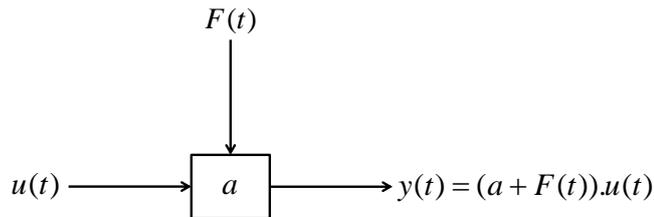


Figure 2.8 – Représentation graphique d'un défaut multiplicatif

La Figure 2.8 montre une représentation graphique d'un défaut multiplicatif. Dans ce cas, le défaut affecte le paramètre a constituant le système. La détection de la variation sur le signal de mesure (Δy) dépend fortement du signal $u(t)$ (2.2). Cette variation n'est pas détectée si le signal de la commande est égal à zéro.

$$\Delta y(t) = F(t)u(t). \quad (2.2)$$

Typiquement, un offset sur la mesure fournie par un capteur ou une déviation sur le signal de commande est considéré comme étant un défaut additif. Par contre un mauvais fonctionnement d'un composant du système, de capteur, ou bien d'un actionneur peut parfois causer un changement sur les paramètres du système physique. Ce dernier est considéré alors comme un défaut multiplicatif, et est représenté généralement par une

variation sur les paramètres du système.

Remarque 2.1 : *La distinction entre un défaut additif et un défaut multiplicatif est faite par rapport à la détection du changement de la variation du défaut. Si elle est indépendante d'autres signaux, le défaut est qualifié d'additif, sinon il est multiplicatif.*

2.3.2 Modélisation mathématique d'un défaut composant

Dans cette partie, nous nous intéressons à la présentation du modèle mathématique qui décrit le système physique soumis à un défaut multiplicatif. Nous nous pencherons uniquement sur le cas de variation des éléments constituant le système physique. Le modèle analytique du système dans le cas d'un défaut multiplicatif affectant les actionneurs ou les capteurs est obtenu de la même façon.

Considérons un système dynamique multi-entrées multi-sorties (MIMO), le modèle mathématique sous forme d'équations d'états décrivant le système est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

où $x \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur d'entrée, et $y \in \mathbb{R}^k$ est le vecteur de sortie. Les matrices A , B , C , et D sont connues et sont de dimensions appropriées.

Quand un défaut affecte un composant du système, par exemple un changement sur l'élément a_{ij} de la matrice d'état A . L'équation dynamique du système est alors donnée par :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + I_i \Delta a_{ij} x_j(t) \quad (2.4)$$

où $x_j(t)$ est l'élément j du vecteur d'état x , et I_i est un vecteur de dimension n avec des éléments nuls sauf 1 à l' $i^{\text{ème}}$ élément.

Par la suite, les défauts multiplicatifs sont considérés comme des entrées inconnues au système. Par exemple, si on considère que le nombre de défauts composants à surveiller est " r ", alors le modèle mathématique du système prend la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + MF(t) \quad (2.5)$$

où $F \in \mathbb{R}^r$ est le vecteur de défaut multiplicatif. Il est inconnu, et est fonction de la variable d'état x . M est une matrice connue de dimension $n \times r$.

Dans le paragraphe suivant, nous proposons une modélisation de défauts composants basée sur l'outil BG. Un défaut affectant le système se traduit par une variation sur un des éléments constituant le système. Par conséquent, avoir un seul modèle pour le système physique défaillant est important pour l'étape d'analyse. Aussi, un défaut modélisé par l'outil BG prend un sens physique plutôt que mathématique. Ainsi, nous présenterons une procédure de modélisation de défaut composant par l'outil BG.

2.3.3 Défaut composant par BG

La modélisation par BG repose sur l'échange d'énergie entre les différents composants constituant le système. Un défaut sur un des composants du système va provoquer, du point de vue BG, une variation des variables d'énergie (e/f) par rapport aux conditions nominales.

Rappelons que, sur un modèle BG, la connexion entre les différents éléments du système se fait en utilisant les éléments de jonction 1 ou 0, qui sont définis par les équations mathématiques suivantes :

$$\begin{aligned} 1 - \text{jonction} : \sum e_i(t) &= 0 \\ 0 - \text{jonction} : \sum f_i(t) &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

L'apparition d'un défaut sur un des sous-systèmes connecté à la jonction 1 (resp, la jonction 0) peut apporter un effort (resp, un flux) supplémentaire à la jonction 1 (resp, 0). Notons par e_F et f_F respectivement l'effort et le flux apportés par le défaut. Une modélisation BG directe du système défectueux est l'ajout d'un lien de puissance, comme

il est illustré par la Figure.(2.9). Dans ce cas, les équations de conservations d'énergie obtenues à partir des jonctions de la Figure 2.10 sont :

$$\begin{aligned} 1 - \text{jonction} : \sum e_i(t) - e_F(t) &= 0 \\ 0 - \text{jonction} : \sum f_i(t) - f_F(t) &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Les variables d'énergie e_F et f_F sont des variables inconnues, en fonction de défauts multiplicatifs sur les paramètres du système et les variables d'énergie (e/f). Prenons l'exemple de la jonction 1. Si $\Delta\theta$ représente la variation sur un des composants du système. La variable e_F dans ce cas peut être exprimée par :

$$e_F = h(\Delta\theta, f) \quad (2.8)$$

Sur un modèle BG, un défaut multiplicatif sur un paramètre apporte une énergie supplémentaire au système, Eq.(2.8). Cette dernière peut être considérée comme étant une entrée inconnue au système et elle sera représentée sur le modèle BG par une source d'effort modulé MSe pour la jonction 1, ou une source de flux modulée MSf pour la jonction 0. La Figure.2.10 illustre cette modélisation. Dans un modèle BG, un défaut composant est associé à une variation non autorisée sur un des éléments de base R , I , C , TF , et GY . La modélisation d'un défaut sur un des éléments BG cités précédemment repose sur la séparation de l'effet du défaut à la valeur nominale de l'élément. Donc, transformer un élément défectueux en deux composantes distinctes.

Défaut composant sur un élément passif

- **Défaut sur un élément dissipatif R :**

Un défaut sur un élément passif R est caractérisé dans le cas linéaire par l'impédance suivante :

$$Z_R = \frac{e_1}{f_1} = R_n + F_R \quad (2.9)$$

où R_n est la valeur nominale et F_R est le défaut. Le modèle BG acausal qui découle de (2.9) est illustré par par la Figure 2.11-(a). En considérant le défaut comme

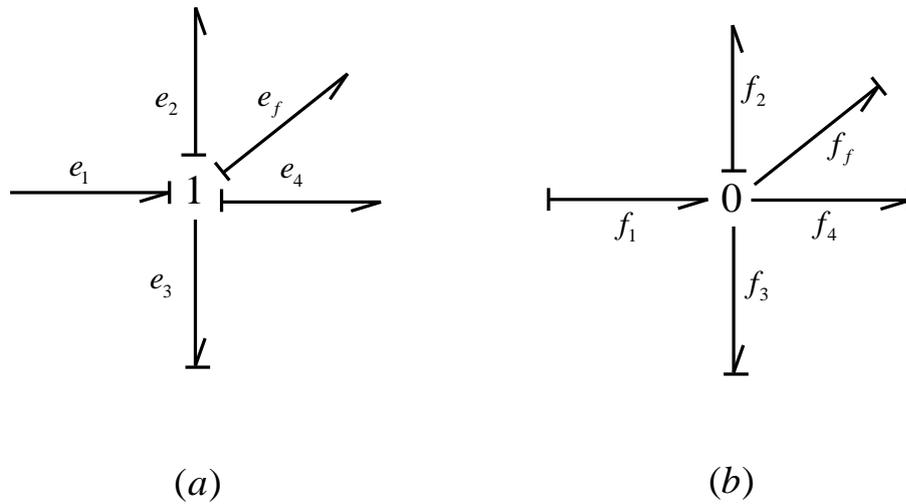


Figure 2.9 – Representation BG de l'Eq.2.7.

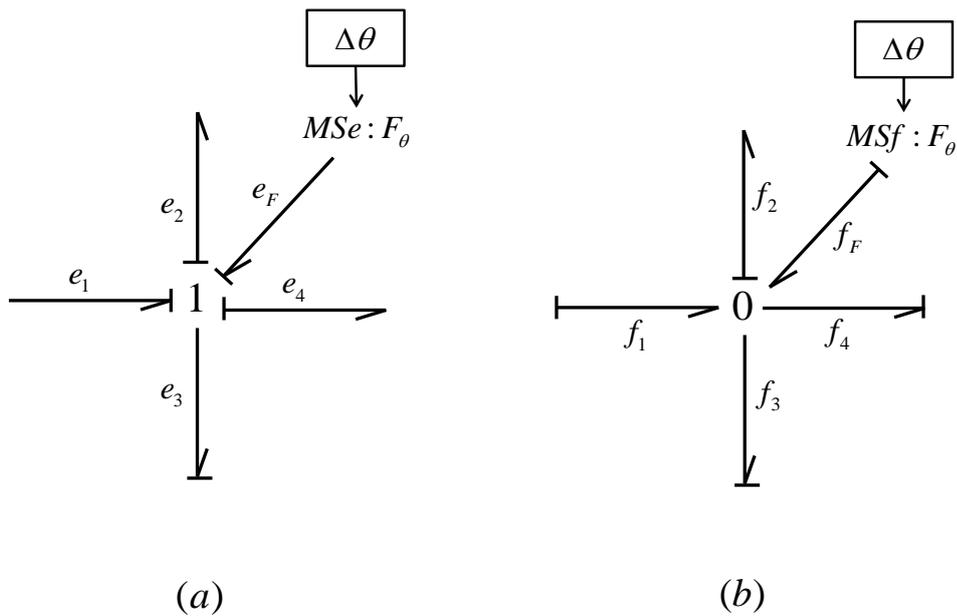


Figure 2.10 – Modélisation BG d'un défaut multiplicatif.

étant une entrée inconnue au système, l'élément $R : F_R$ est remplacé par une source d'effort modulée ($MSe : F$) comme illustré par la Figure 2.11-(b). Deux causalités peuvent être appliquées à l'élément R en fonction de la variable (effort ou flux) connue. La Figure 2.12-(a) représente le modèle BG d'un défaut sur un élément

R en causalité résistance. Quant au modèle BG d'un défaut sur un élément R en causalité conductance, il est illustré par la Figure 2.12-(b).

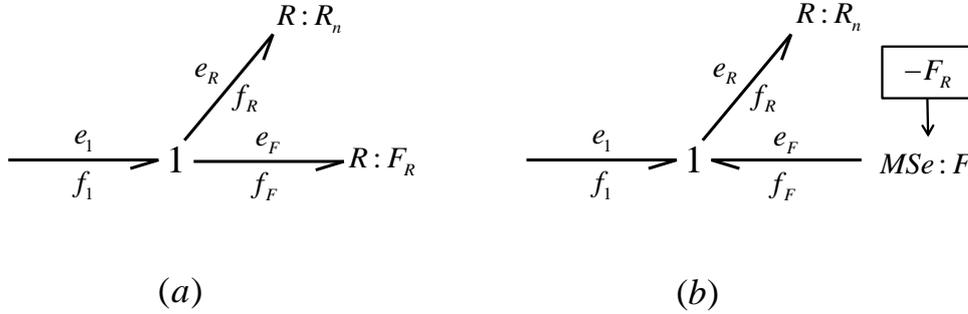


Figure 2.11 – Modèle BG acausal d'un défaut sur un élément R

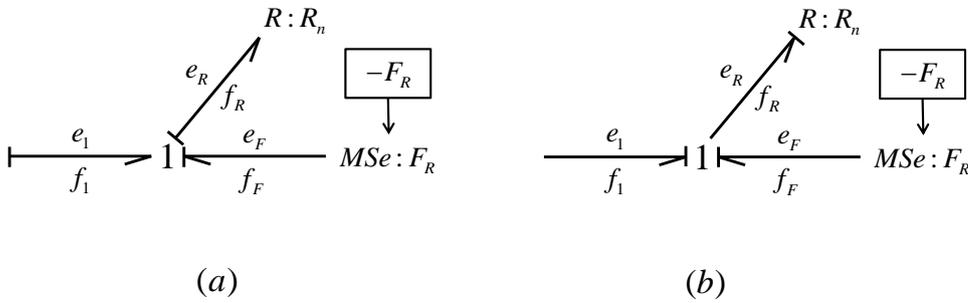


Figure 2.12 – Modèle BG de l'élément R en présence de défaut : (a) causalité résistance, (b) causalité conductance

- à partir du modèle BG de la Figure 2.12-(a) : $e_1 = R_n f_1 - e_F$;
 - à partir du modèle BG de la Figure 2.12-(b) : $f_1 = \frac{1}{R_n} e_1 + \frac{1}{R_n} e_F$.
- où e_F est l'effort apporté par le défaut F_R sur l'élément R .

- **Défaut sur un élément de stockage C :**

L'impédance de l'élément C en présence d'un défaut F_C est caractérisée par l'équation suivante :

$$Z_C = \frac{e_1}{f_1} = \frac{1}{(C_n + F_C) s} \quad (2.10)$$

Le modèle BG acausal représentant l'équation 2.10 est donné par la Figure 2.13-(a). En considérant le défaut comme étant une entrée inconnue au système, l'élément $C : F_C$ est remplacé par une source de flux modulée ($MSf : F$) comme illustré

par la Figure 2.13-(b). Deux causalités peuvent être attribuées à l'élément C : la causalité intégrale et la causalité dérivée. Dans le cas d'un élément C en causalité intégrale, le modèle BG correspondant est illustré par la Figure 2.14-(a). Tandis que dans le cas d'un élément C en causalité dérivée est donnée par la Figure 2.14-(b).

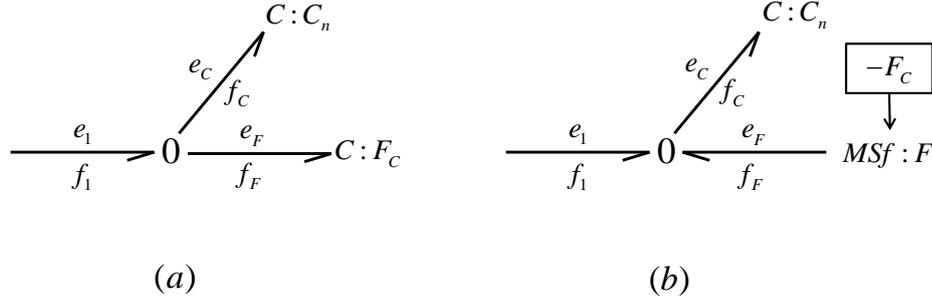


Figure 2.13 – Modèle BG acausal d'un défaut sur un élément C

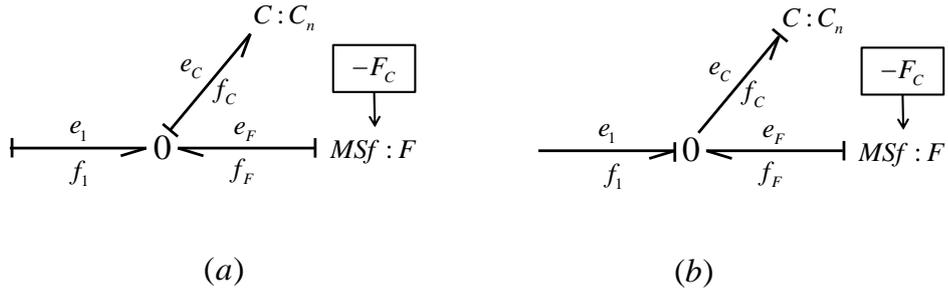


Figure 2.14 – Modèle BG de l'élément C en présence de défaut : (a) causalité intégrale, (b) causalité dérivée

- à partir du modèle BG de la Figure 2.14-(a) : $e_1 = \frac{1}{C_n} \int f_1 dt + \frac{1}{C_n} \int f_F dt$;
 - à partir du modèle BG de la Figure 2.14-(b) : $f_1 = C_n \frac{d}{dt} e_1 - f_F$.
- où f_F est le flux apporté par le défaut F_C sur l'élément C .

- **Défaut sur un élément de stockage I :**

De même, l'impédance d'un élément I en présence d'un défaut F_I est caractérisée par l'équation suivante :

$$Z_I = \frac{e_1}{f_1} = I_n s + F_I s \quad (2.11)$$

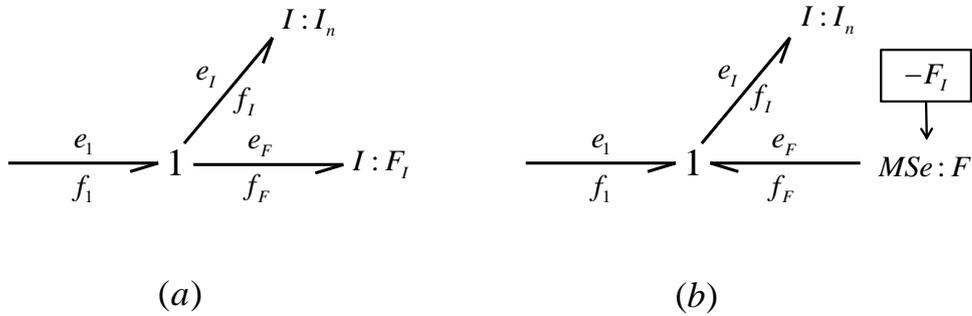


Figure 2.15 – Modèle BG acausal d'un défaut sur un élément I

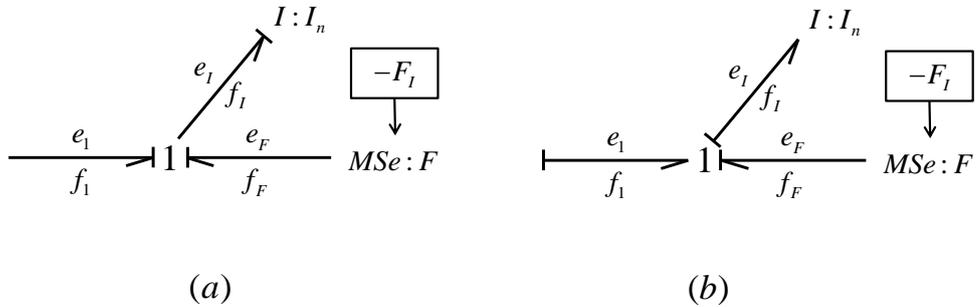


Figure 2.16 – Modèle BG de l'élément I en présence de défaut : (a) causalité intégrale, (b) causalité dérivée

Cela se traduit en BG par deux éléments de stockage I reliés par une jonction 1 dont le modèle est donné par la Figure 2.15-(a). Etant donné que le défaut F_I est une variable inconnue, donc l'élément $I : F_I$ est remplacé par une source d'effort modulée comme le montre la Figure 2.15-(b). Deux causalités peuvent être affectées à l'élément I . Dans le cas d'un élément I en causalité intégrale, le modèle BG correspondant est illustré par la Figure 2.16-(a). Dans le cas d'un élément I en causalité dérivée, il est donné par la Figure 2.16-(b).

- à partir du modèle BG de la Figure 2.16-(a) : $f_1 = \frac{1}{I_n} \int e_1 dt + \frac{1}{I_n} \int e_F dt$;
 - à partir du modèle BG de la Figure 2.16-(b) : $e_1 = I_n \frac{d}{dt} f_1 + e_F$.
- où e_F est l'effort apporté par le défaut F_I sur l'élément I .

Eléments de jonction (TF, GY) :

A la différence de la modélisation d'un défaut composant sur les éléments passifs, un défaut sur les éléments TF ou GY dépend de la causalité de ces éléments et se caractérise par l'ajout de deux sources d'énergie. Cela est dû à la caractéristique principale de ces derniers qui est la transformation d'énergie et le couplage de deux sous-systèmes avec des variables différentes. Les Figures 2.17 et 2.18 illustrent la modélisation d'un défaut sur ces éléments. A partir de ces figures, les équations suivantes sont déduites :

$$\begin{array}{l}
 \text{Figure 2.17 - (a) : } \left\{ \begin{array}{l} e_2 = ne_1 + e_F \\ f_1 = \frac{1}{n}f_2 - f_F \end{array} \right. \\
 \text{Figure 2.17 - (b) : } \left\{ \begin{array}{l} e_1 = \frac{1}{n}e_2 - e_F \\ f_2 = nf_1 + f_F \end{array} \right. \\
 \text{Figure 2.18 - (a) : } \left\{ \begin{array}{l} e_1 = \frac{1}{r}f_2 - e_F \\ e_2 = rf_1 + e_F \end{array} \right. \\
 \text{Figure 2.18 - (b) : } \left\{ \begin{array}{l} f_1 = \frac{1}{r}e_2 - f_F \\ f_2 = re_1 + f_F \end{array} \right.
 \end{array} \quad (2.12)$$

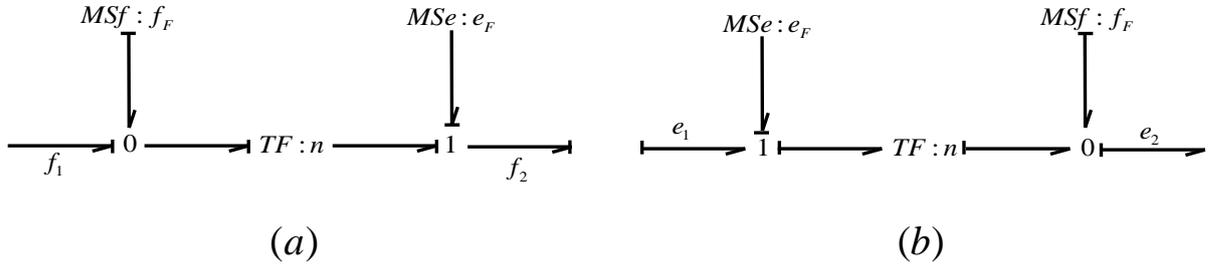


Figure 2.17 – Modèle BG d'un défaut sur un élément TF.

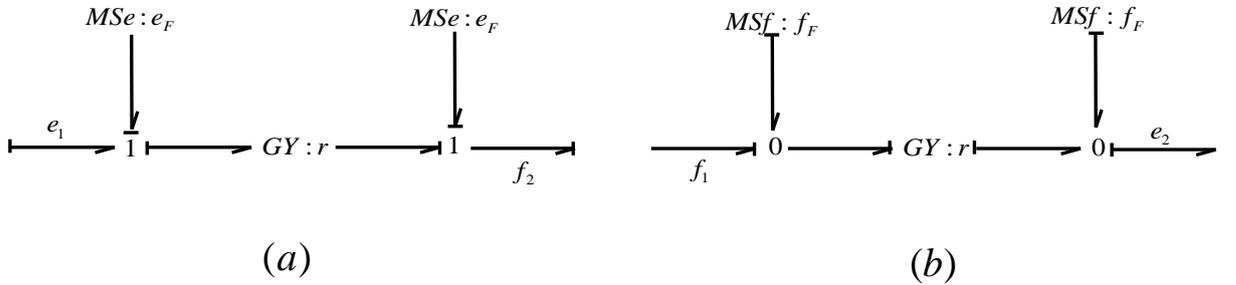


Figure 2.18 – Modèle BG d'un défaut sur un élément GY.

2.3.4 Exemple de modélisation

Dans cette partie, nous illustrons par un exemple simple la procédure de modélisation par l'outil BG d'un système physique. Pour cette fin, nous considérons un moteur électrique à courant continu donné par la Figure 2.19-(a). Ce dernier est composé de deux sous-systèmes : électrique et mécanique. Le sous-système électrique est constitué d'une source de tension U_v , d'une résistance électrique R_e , et une inductance L . Ces éléments sont représentés respectivement par des éléments source d'effort Se , un élément R et un élément de stockage I . Quant au sous-système mécanique, il est modélisé par un élément de stockage d'énergie $I : J_e$ qui représente l'inertie du rotor et un élément $R : f_e$ pour représenter le phénomène de frottement visqueux. Le transfert d'énergie entre les deux sous-systèmes est représenté par un gyrateur (GY) dont la constante m représente la force contre-électromotrice. Le modèle BG résultant est donné par la Figure 2.19-(b).

Un défaut multiplicatif peut affecter l'ensemble des éléments S_F suivant :

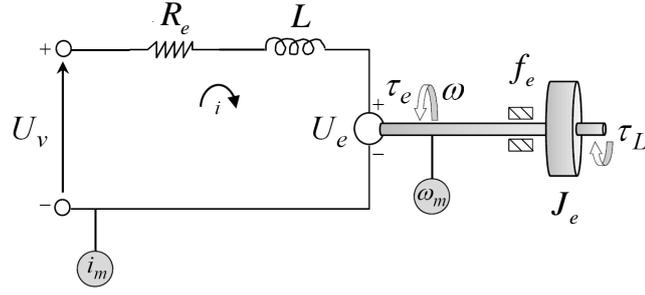
$$S_F = \{R : R_1, L : L_1, GY : m, R : f_2, I : J_2\} \quad (2.13)$$

En se basant sur la procédure présentée ci-dessus, un modèle BG représentant le système défaillant est obtenu et est donné par la Figure 2.20. A partir de ce dernier, une représentation analytique sous forme d'équations d'état peut être générée, et cela en utilisant les équations caractéristiques et constitutives des éléments comme suit :

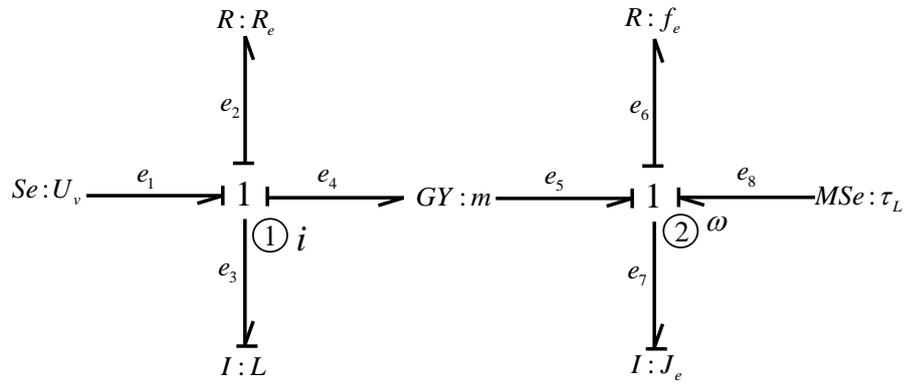
Les équations constitutives :

Jonction 1 $\textcircled{1}$:

$$\begin{cases} e_3 = e_1 - e_2 - e_4 \\ e_2 = e'_2 - e_{F_{R_e}} \\ e'_3 = e_3 + e_{F_L} \\ f_2 = f_3 = f_4 \end{cases} \quad (2.14)$$



(a)



(b)

Figure 2.19 – (a) : Moteur à courant continu, (b) : Modèle BG correspondant

 Jonction 1_② :

$$\begin{cases} e_7 = e_5 - e_6 + e_8 \\ e_6 = e'_6 - e_{F_{f_e}} \\ e'_7 = e_7 + e_{F_{J_e}} \\ f_5 = f_6 = f_7 \end{cases} \quad (2.15)$$

 Gyrateur $GY : m$

$$\begin{cases} e_4 = m f_5 - e_{F_m}; & f_5 = f'_5 \\ e_5 = m f_4 + e_{F_m}; & f_4 = f'_4 \end{cases} \quad (2.16)$$

Les équations caractéristiques :

donnée par la Figure 2.20 est :

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = e_3' = -\frac{R_e}{L}p_1 - \frac{m}{J_e}p_2 + U_v + F_1 + F_2 + F_3 \\ \dot{p}_2 = e_7' = \frac{m}{L}p_1 - \frac{f_e}{J_e}p_2 + \tau_L + F_3 + F_4 + F_5 \end{cases} \quad (2.19)$$

Cette dernière prend la représentation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L} & -\frac{m}{J_e} \\ \frac{m}{L} & -\frac{f_e}{J_e} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} U_v \\ \tau_L \end{bmatrix}}_u + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \end{bmatrix}}_F \quad (2.20)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la procédure de modélisation mathématique et graphique d'un défaut multiplicatif sur un paramètre du système. L'avantage de modéliser un défaut composant par l'outil BG est que le défaut a un sens physique plutôt que mathématique. En outre, un défaut multiplicatif sur un paramètre se traduit sur le modèle BG par une variation sur les paramètres des éléments de base de l'outil BG. La procédure de modélisation de défaut par BG est systématique, et comme il a été montré, un modèle mathématique sous forme d'équations d'état peut être obtenu. La représentation d'un défaut par BG sera utilisée par la suite dans l'analyse structurelle de détectabilité et d'isolabilité de défauts.

Chapitre 3

Détection et isolation de défauts composants par BG

Sommaire

3.1	Introduction	56
3.2	Théorie de module et propriétés des BGs	56
3.2.1	Théorie du module	57
3.2.2	Quelques propriétés de l'outil Bond Graph	61
3.2.3	Anneau Bond Graph	63
3.2.4	La bicausalité	64
3.2.5	Observabilité	66
3.3	Détectabilité et isolabilité structurelles de défauts composants	70
3.3.1	Modèle Anneau BG de diagnostic	71
3.3.2	Détectabilité structurelle de défauts composants	75
3.3.3	Isolabilité structurelle de défauts composants	78
3.4	Placement de capteur pour le recouvrement de la surveilla- bilité du système	84
3.5	Paramétrisation différentielle de défauts	88
3.5.1	Expression du gain	88
3.5.2	Gains des éléments	89

3.5.3 Paramétrisation différentielle du défaut	92
3.6 Conclusion	94

3.1 Introduction

Bien qu'il existe une panoplie de méthodes pour la détection et l'isolation de défauts, l'analyse structurelle de système du point de vue FDI peut apporter une contribution et des avantages significatifs grâce en particulier à la définition de cahier des charges (avant conception industrielle) du système physique et aussi dans la conception intégrée du système de diagnostic. L'analyse structurelle d'un système du point de vue FDI consiste à déterminer sous quelles conditions ce dernier peut détecter et isoler un défaut en considérant une architecture d'instrumentation donnée. L'outil BG, et grâce à ses propriétés causales et structurelles est le plus adéquat pour l'étude des propriétés structurelles d'un système. Aussi, l'analyse structurelle d'un système physique en utilisant la théorie du module est plus commode à partir de leur modèle BG. A titre d'exemple, la paramétrisation différentielle de la variable défaut en fonction des variables du système se fait directement sur un modèle BG sans avoir recours aux équations d'état du système, une réduction considérable des calculs et enfin un cadre de travail plus proche de la physique du système.

Dans ce chapitre, nous présentons des conditions graphiques de détectabilité et d'isolabilité structurelles de défauts composants. Si un défaut n'est pas structurellement détectable et isolable, un placement de capteur est proposé afin de recouvrir la non-surveillabilité du système en présence de ce défaut. Finalement, une procédure immédiate et directe pour la paramétrisation des défauts est proposée.

3.2 Théorie de module et propriétés des BGs

Dans cette partie, on va exposer la théorie du module ainsi que quelques propriétés intéressantes qui sont utilisées pour présenter les conditions graphiques de détectabilité et d'isolabilité structurelles de défauts composants.

3.2.1 Théorie du module

L'algèbre différentielle non commutative est la généralisation des méthodes de l'algèbre classique. Introduite en automatique par [Fliess 1989], elle permet principalement de résoudre plusieurs problèmes concernant les systèmes linéaires et une classe de systèmes non linéaires. Dans cette partie, nous présenterons de façon succincte les différentes notions de la théorie de module qui vont être utilisées dans ce manuscrit. Pour plus de détails, les références bibliographiques [Fliess 1990], [Bourles 2005], [Fliess 2003], [Cruz-Victoria 2008b] peuvent être consultées.

Corps et anneaux différentiels

Un corps différentiel ordinaire k est un corps commutatif muni d'une dérivation simple $\frac{d}{dt} : k \rightarrow k$ (i.e., contenant une seule dérivation, dans le cas contraire, il est dit partial), vérifiant les règles usuelles (3.1), pour tout $a; b \in k$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{da}{dt} \in k \\ \frac{d(a+b)}{dt} = \frac{da}{dt} + \frac{db}{dt} \in k \\ \frac{d(a.b)}{dt} = \frac{da}{dt}b + \frac{db}{dt}a \in k \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Un sous-corps différentiel C de k dont les éléments sont des constantes, i.e., $c \in C$ et $\dot{c} = 0$, est un corps des constantes.

De la même façon, un anneau différentiel est un anneau muni de la dérivation $\frac{d}{dt} = \delta$, par exemple l'anneau des opérateurs différentiels linéaires à coefficients dans k noté $k[\delta]$. Cet anneau possède deux types de polynômes : à gauche et à droite.

- Les polynômes à gauche en l'indéterminée δ sont de la forme (3.2), avec $a_i \in k$.

$$\sum_{i=0}^n a_i \delta^i \quad (3.2)$$

- Les polynômes à droite en l'indéterminée δ sont de la forme (3.3), avec $a_i \in k$.

$$\sum_{i=0}^n \delta^i a_i \quad (3.3)$$

Si $a_n \neq 0$, alors n est le degré du polynôme de $k[\delta]$ à gauche (resp, à droite) [Bourles 2005].

Cet anneau est en général non commutatif. La multiplication dans $k[\delta]$ est définie par la règle de Leibniz (3.4).

$$\delta a = a\delta + \dot{a} \quad a \in k \quad (3.4)$$

En effet, la relation (3.4) est commutative si et seulement si k est un corps de constantes ($\dot{a} = 0$)

Modules différentiels

Soit k un corps différentiel muni de la dérivation $\frac{d}{dt} = \delta$. Un Module différentiel sur k (ou k -module différentiel) M est un $k[\delta]$ -module à gauche. Dans un tel module, les propriétés suivantes sont vérifiées :

1. $\forall m \in M, \forall \pi \in k[\delta] : \quad \pi m \in M ;$
2. $\forall m_1, m_2 \in M, \forall \pi \in k[\delta] : \quad \pi (m_1 + m_2) = \pi m_1 + \pi m_2 ;$
3. $\forall m \in M, \forall \pi_1, \pi_2 \in k[\delta] : \quad (\pi_1 + \pi_2) m = \pi_1 m + \pi_2 m ;$

Remarque 3.1 : Le $k[\delta]$ -module M est qualifié de gauche car les coefficients dans k de l'indéterminée $\frac{d}{dt}$ et ses puissances n'apparaissent qu'à gauche de n'importe quelle relation polynomiale.

Remarque 3.2 : L'opérateur de dérivation $\frac{d}{dt}$ est différent de l'opérateur de Laplace.

Soit $\xi = (\xi_i)_{i \in I}$ une famille d'éléments d'un k -module M . Le k -module différentiel noté $[\xi]$ engendré par la famille ξ est le plus petit sous-module différentiel sur k de M contenant ξ . Si $M = [\xi]$, la famille ξ est appelée système générateurs du module M .

Propriété 3.1 : Un module M est dit de type fini ou finiment engendré s'il admet un système fini de générateurs.

Module libre

Un $k[\delta]$ -module ϕ finiment engendré est dit *libre* si et seulement si, il admet une base, i.e., il existe un ensemble fini $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ d'éléments de ϕ tels que :

- tout élément w de ϕ est $k[\delta]$ - linéairement dépendant de z . En d'autres termes, w est une combinaison linéaire de z et ses dérivées à coefficients dans k .
- les composantes de z sont $k[\delta]$ - linéairement indépendantes, i.e., les composantes de z ainsi que leurs dérivées sont k -linéairement indépendantes.

Le rang d'un module libre est égal à $m = \text{card}(z)$

Module de torsion

Un module différentiel T est dit de torsion si pour tout $v \in T$ il existe $a \in k[\delta]$, $a \neq 0$ tel que $av = 0$. Nous notons que le rang d'un module de torsion est nul.

Remarque 3.3 : *Un module différentiel ne contenant pas un module de torsion est dit un module libre.*

Quelques propriétés :

- Un $k[\delta]$ - module M finiment engendré peut s'écrire sous la forme suivante :

$$M = T \oplus \phi \tag{3.5}$$

où $\phi = M/T$ est le sous-module libre et T est le sous-module de torsion.

Par définition, le rang de M est égal au rang de ϕ . Ainsi, M est de rang zéro si, et seulement si, il est de torsion. Par contre, si $T = 0$, alors M est dit de torsion libre.

- Pour un $k[\delta]$ - module M finiment engendré, les deux propriétés suivantes sont équivalentes :
 - M est de torsion,
 - la dimension de M considéré comme un k -espace vectoriel est finie.
- Tout sous-module d'un $k[\delta]$ -module finiment engendré est finiment engendré.
- Tout module quotient d'un $k[\delta]$ -module finiment engendré est aussi finiment engendré.
- Pour un $k[\delta]$ -module M finiment engendré, les deux propriétés suivantes sont équivalentes :
 - M est de torsion libre,
 - M est libre

Ces notions sont très importantes et permettent de reformuler les notions classiques de commandabilité, d'observabilité, zéros invariants, etc., à l'aide de la théorie du module qui est beaucoup plus générale.

Définition algébrique d'un système linéaire

Un système linéaire est par définition un $k \left[\frac{d}{dt} \right]$ -module à gauche finiment engendré Ω , [Fliess 1990]. Une dynamique linéaire avec une entrée $u = (u_i)_{1 \leq i \leq m}$ est un système linéaire Ω qui contient u , tel que le module quotient $\Omega/[u]$ est de torsion [Fliess 1990]. L'entrée u est considérée indépendante, i.e., le sous-module $[u]$ est libre et de rang m . Le rang de Ω est égal à m . La représentation de *Kalman* correspondante est :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + B \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

où :

- n est la dimension du vecteur d'état $x = (x_1, \dots, x_n)^T$, appelée la dimension de la dynamique, et elle est égale à la dimension du module de torsion $\Omega/[u]$
- A et B sont des matrices de dimension appropriées dont les éléments sont en k

La sortie $y = (y_1, \dots, y_k)^T$ est un ensemble d'éléments de Ω . Elle est donnée par :

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \sum_{finite} D_v \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Dans la suite, la notion du module est associée avec le modèle BG. Mais d'abord, nous commencerons par présenter quelques propriétés de cet outil graphique.

3.2.2 Quelques propriétés du l'outil Bond Graph

Un chemin causal

Une propriété intéressante pour l'analyse structurelle des systèmes modélisés par BG est le concept du chemin causal.

Définition 3.1 :

Un chemin causal est une alternance de liens et d'éléments de base appelés noeuds [Rahmani 1996], tel que :

- Tous les liens de la séquence ont une causalité complète et correcte ;
- Deux liens du chemin causal en un même noeud ont des affectations causales opposées.

Un chemin causal est dit simple s'il est parcouru en suivant toujours la même variable ; mixte s'il change de variable (présence de l'élément GY dans le chemin) ou indirect s'il passe par les éléments I , C et R . Par exemple, à partir de la Figure 3.1, le chemin causal entre l'élément Se et l'élément R est donné par :

$$Se \xrightarrow{e_1} J_1 \xrightarrow{e_2} I \xrightarrow{f_2} J_1 \xrightarrow{f_3} GY \xrightarrow{e_4} J_1 \xrightarrow{e_5} R \quad (3.8)$$

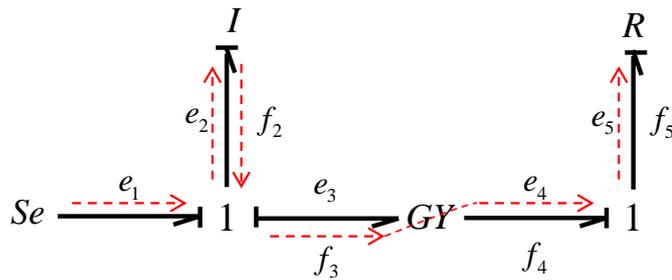


Figure 3.1 – Exemple d'un chemin causal

Un chemin causal a une longueur l qui est déterminée par :

Définition 3.2 :

- Dans un modèle BG ne comportant que des éléments en causalité intégrale, la longueur l d'un chemin causal allant d'un ensemble d'éléments $S_1 = \{Se, Sf, I, C, R\}$ vers un ensemble d'éléments $S_2 = \{De, Df, I, C, R\}$ est égal au nombre d'éléments I et C traversés $+1$ si le point d'arrivée est un élément I ou C .
- Dans un modèle BG en causalité intégrale préférentielle comportant des éléments I et C en causalité intégrale et dérivée, la longueur du chemin causal est égal à :
 $l = \text{nombre d'éléments (I et C en causalité intégrale)} - \text{nombre d'éléments (I et C en causalité dérivée)} + 1$ si le point d'arrivée est un élément I ou C en causalité intégrale.

Par exemple, le chemin causal exprimé par (3.8) a une longueur l qui est égal à 1 puisqu'il existe seulement un élément de stockage (I) en causalité intégrale.

Boucle causale

Une boucle causale est un chemin causal fermé, c'est à dire qu'il part de la sortie d'un élément et il rejoint son entrée sans parcourir le même lien, et cela en suivant la même variable plus d'une seule fois. Une boucle causale est principalement utilisée dans le calcul des fonctions de transfert des systèmes physiques. La Figure 3.2 illustre une boucle causale entre un élément de stockage I et un élément de résistance R . Cette dernière est exprimée par le chemin suivant :

$$I \xrightarrow{f_2} J_1 \xrightarrow{f_3} GY \xrightarrow{e_4} J_1 \xrightarrow{e_5} R \xrightarrow{f_5} J_1 \xrightarrow{f_4} GY \xrightarrow{e_3} J_1 \xrightarrow{e_2} I \quad (3.9)$$

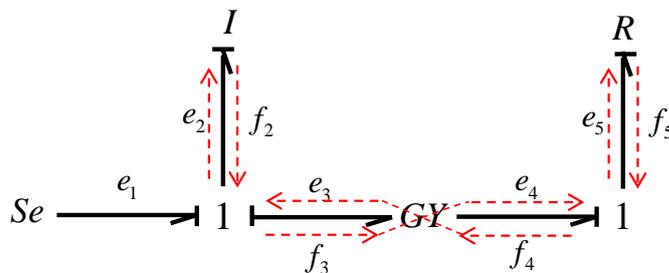


Figure 3.2 – Exemple d'une boucle causale

3.2.3 Anneau Bond Graph

Représentation d'état à partir d'un modèle Bond Graph

A partir d'un modèle BG en causalité intégrale préférentielle, une représentation d'état peut être déduite en utilisant les équations caractéristiques associées aux sous-systèmes et en exploitant les équations de contraintes imposées par les éléments de jonctions (0 et/ou 1). Ainsi, les équations d'état sont exprimées par :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (3.10)$$

Où la variable d'état $x \in \mathbb{R}^n$ est associée aux variables d'énergies généralisées (q et p), $y \in \mathbb{R}^k$ est le vecteur de sortie du système, et $u \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de la variable d'entrée du système. Les matrices A , B , et C sont les matrices système associées aux éléments constituant le modèle BG du système physique.

En effet, sur un modèle BG, les variables d'énergies généralisées sont associées aux éléments de stockage (I , C) en causalité intégrale. Par conséquent, l'ordre du système n n'est que le nombre d'éléments dynamiques (I , C) en causalité intégrale. Quant aux vecteurs d'entrée u et de sortie y , ils sont représentés respectivement sur le modèle BG par l'ensemble des éléments sources $S_u = \{Se, Sf, Mse, Msf\}$ et l'ensemble des détecteurs $S_y = \{De, Df\}$, avec $m = \text{card}\{S_u\}$ et $k = \text{card}\{S_y\}$ respectivement. Les matrices système A , B , et C sont calculées à partir du modèle BG directement en utilisant les gains des chemins causaux entre les éléments BG. Le système décrit par l'équation 3.10 est considéré comme étant un module $k[\delta]$ -module à gauche finiment engendré, où k est un anneau non-commutatif. Cette propriété est étendue à un modèle BG par [Achir 2004]. De même le modèle BG associé à un $k[\delta]$ -module à gauche est appelé *anneau BG*.

Définition 3.3 (*Anneau BG*) : un anneau BG sur un anneau ou sur un corps non commutatif k est un k -module Ω décrit par un ensemble d'équations linéaires de la forme :

$$z_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j}x_j + \sum_{k=1}^m b_{i,k}u_k \quad 0 \leq i \leq n \quad (3.11)$$

Où $a_{i,j}$, $b_{i,j}$ sont dans k . Les variables z_i , x_j et u_k sont dans Ω .

Les z_i , x_j et u_k représentent les variables du BG classique (f, e) , associées aux éléments dynamiques en causalité intégrale, ainsi que les variables (f, e) associées aux sources d'entrées et sources d'information. Dans le cas où z représente une variable d'énergie associée à un élément dynamique en causalité intégrale, δz est alors une variable d'effort (élément I) ou de flux (élément C).

Remarque 3.4 : Dans la suite de ce travail, k représente le corps réel des constantes \mathbb{R} .

Le but d'associer un module à un modèle BG est d'utiliser les propriétés développées dans le cadre algébrique sur un modèle BG.

3.2.4 La bicausalité

Le concept de la bicausalité est introduit par [Gawthrop 1995]. L'utilisation de la bicausalité dans les bonds graphs permis de résoudre certains problèmes en automatique notamment le problème d'inversion, estimation d'états du système, suivi de trajectoire, et de dimensionnement des systèmes dynamiques.

La notion de la bicausalité est intéressante pour la construction des modèles anneaux BG inverses, ainsi que pour l'analyse de propriétés de détectabilité et d'isolabilité structurelles de défauts. Avec la causalité conventionnelle, il existe seulement deux possibilités d'affectation de la causalité : l'effort ou le flux est connu (Figure 3.3-(a),(b)). La bicausalité permet d'étendre le concept de la causalité pour ajouter deux autres possibilités : l'effort et le flux sont connus (Figure 3.3-(c),(d)). Ces deux dernières situations sont exprimées respectivement par (3.12)-(c),(d). L'idée principale de la bicausalité est donc de supposer que les deux variables de puissance dans la même direction sont connues : par exemple l'effort e_1 et le flux f_1 de la Figure 3.3-(d) sont connues.

$$(a) \begin{cases} e_1 = e_2 \\ f_2 = f_1 \end{cases} \quad (b) \begin{cases} e_2 = e_1 \\ f_1 = f_2 \end{cases} \quad (c) \begin{cases} e_1 = e_2 \\ f_1 = f_2 \end{cases} \quad (d) \begin{cases} e_2 = e_1 \\ f_2 = f_1 \end{cases} \quad (3.12)$$

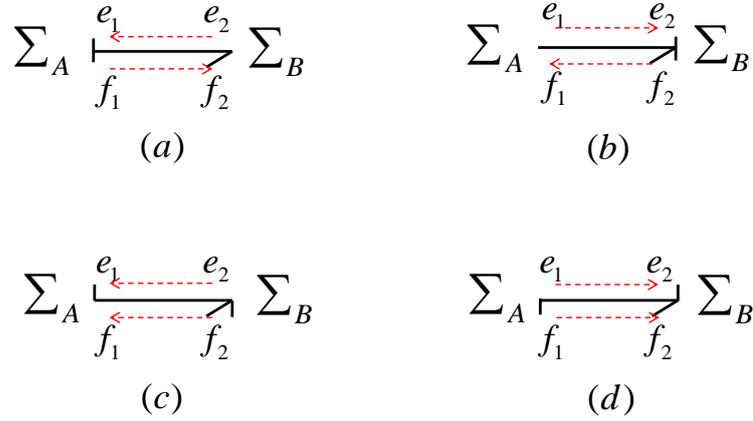


Figure 3.3 – Les différentes possibilités d’affectation de la causalité

Dans un modèle BG mis en causalité conventionnelle (intégrale ou dérivée), les éléments sources (Se, Sf) et détecteurs (De, Df) sont des éléments à causalité fixée dite obligatoire. Les autres causalités sont soit préférentielles (intégrale ou dérivée) pour les éléments de stockage (I, C) soit quelconques pour l’élément R . En revanche, dans le contexte de la bicausalité, de nouveaux éléments sont introduits (Figure 3.4) :

- (a) : Source d’effort, Détecteur de flux,
- (b) : Source de flux, Détecteur d’effort,
- (c) : Détecteur d’effort, Détecteur de flux,
- (d) : Source d’effort, Source de flux.

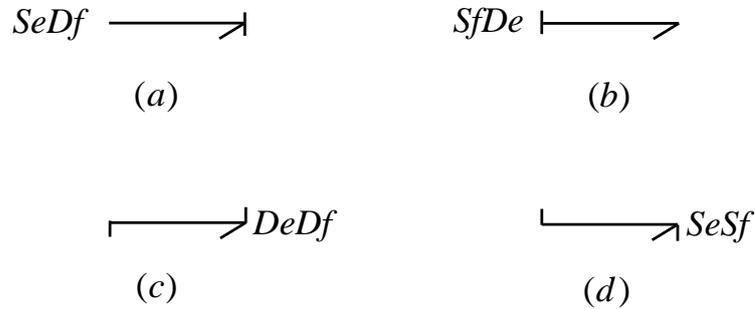


Figure 3.4 – Différentes configurations des éléments bicausaux

3.2.5 Observabilité

L'*observabilité* d'un système linéaire peut être vérifiée à l'aide du rang de la matrice d'observabilité (3.13). Cette propriété peut être vérifiée sur un modèle BG en utilisant le *Rang-BG* proposé par [Sueur 1991]. L'observabilité des systèmes est aussi étudiée en utilisant la théorie du module [Bourles 2005, Fliess 1990]. Elle est basée sur l'extraction de sous-module $\Omega/[u, y]$ relié à la partie non-observable du système. Sur un modèle BG, ce sous-module est difficile à obtenir directement. Raison pour laquelle, la notion de dualité entre l'observabilité et la contrôlabilité est utilisée [Bourles 2005, Rudolph 1996].

Pour le système linéaire (3.10), la matrice d'observabilité (O) est donnée par :

$$O = \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & \dots & A^{(n-1)T} C^T \end{bmatrix}^T \quad (3.13)$$

Le système est dit observable si et seulement si le

$$\text{Rang}(O) = n \quad (3.14)$$

où n est le nombre d'états du système.

Sur un modèle BG, l'observabilité du système est vérifiée structurellement en utilisant le théorème suivant :

Théorème 3.1 [Sueur 1991] :

Un système linéaire modélisé par BG est structurellement observable si et seulement si :

- Tous les éléments dynamiques (I, C) sont connectés causalement par une source d'information,
- $\text{Rang-BG}(A|C) = n$.

$\text{Rang-BG}(A|C) = n-l$, où n est le nombre d'éléments de stockage en causalité intégrale dans le modèle BG en causalité intégrale préférentielle. l est le nombre d'éléments de stockage gardant leur causalité intégrale quand les insertions suivantes sont appliquées :

- (1) : la causalité dérivée est affectée au modèle BG,

- (2) : la dualisation du nombre maximal de sources de sorties est effectuée, et ce afin d'éliminer les causalités intégrales restantes sans créer de conflits de causalité ou de boucles de causalité non solvables.

La dualisation des détecteurs consiste à les transformer en source d'effort (jonction 1) ou de flux (jonction 0) comme cela est illustré par la Figure 3.5.

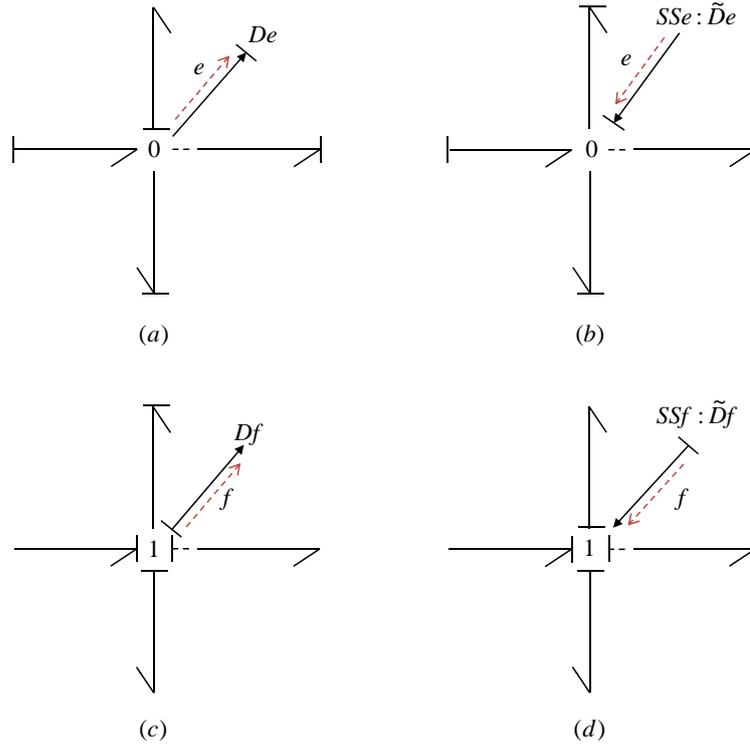


Figure 3.5 – (a) détecteur d'effort, (b) détecteur d'effort dualisé, (c) détecteur de flux, (d) détecteur de flux dualisé

Dans le domaine algébrique, l'observabilité d'un système linéaire est reliée par le module quotient $\Omega/[u, y]$ qui est un module de torsion

Théorème 3.2 : *Un système linéaire est dit observable si les deux module Ω et $[u, y]$ coïncident. Autrement dit, chaque élément de Ω peut s'exprimer en combinaisons linéaires d'éléments d'entrées u_i avec $i = 1 \dots m$ et de sorties y_j avec $j = 1 \dots k$, [Fliess 1990]*

La dynamique engendrée par $[u, y]$ est appelée la dynamique observable de Ω . L'observabilité algébrique consiste à exprimer toutes les variables du système, en l'occurrence

les variables d'états, en fonction des variables d'entrées et de sorties ainsi que de leurs dérivées. Sur un modèle BG, il est difficile d'obtenir la partie BG associée au module $[u, y]$. Une solution est apportée par [Lichiardopol 2010]. Elle est basée sur la propriété de dualité des systèmes linéaires du point de vue de la théorie du module. En effet, un système est vu par la théorie du module comme un module à gauche. Son système dual correspondant est défini quant à lui par le module à droite. L'observabilité (resp, la contrôlabilité) est étudiée par la propriété suivante :

Propriété 3.2 : *Un système linéaire est dit observable (resp, contrôlable) si et seulement si, son système dual est contrôlable (resp, observable) [Fliess 1990].*

La contrôlabilité dans le domaine algébrique est associée aux modules de torsions. Ces derniers peuvent être obtenus à partir des équations des éléments dynamiques I et C en causalité intégrale dans le modèle BG en causalité dérivée préférentielle. La partie non-contrôlable dans un modèle BG est associée à ces éléments. En conséquence, l'étude de la propriété de l'observabilité du modèle BG initiale est équivalente à la propriété de contrôlabilité du modèle BG dual.

Exemple :

Afin de clarifier l'étude d'observabilité d'un système physique modélisé par BG, nous considérons le modèle BG donné par la Figure 3.6. Ce système est dit observable, parce que :

- Tous les éléments de stockage sont reliés par un chemin causal avec les détecteurs $(Df : y_1)$ et $(De : y_2)$,
- Les éléments de stockage acceptent la causalité dérivée lorsqu'elle leur est appliquée, comme le montre la Figure 3.7, donc le Rang-BG($A|C$) = 6.

L'observabilité du système à l'aide de la notion de la dualité repose sur l'obtention du modèle BG dual. Une procédure a été développée dans [Lichiardopol 2010], elle est résumée comme suit :

- Remplacer les sources par des détecteurs, avec une valeur négative, i.e. $\bar{y} = -y$;
- Remplacer les détecteurs par des sources ;

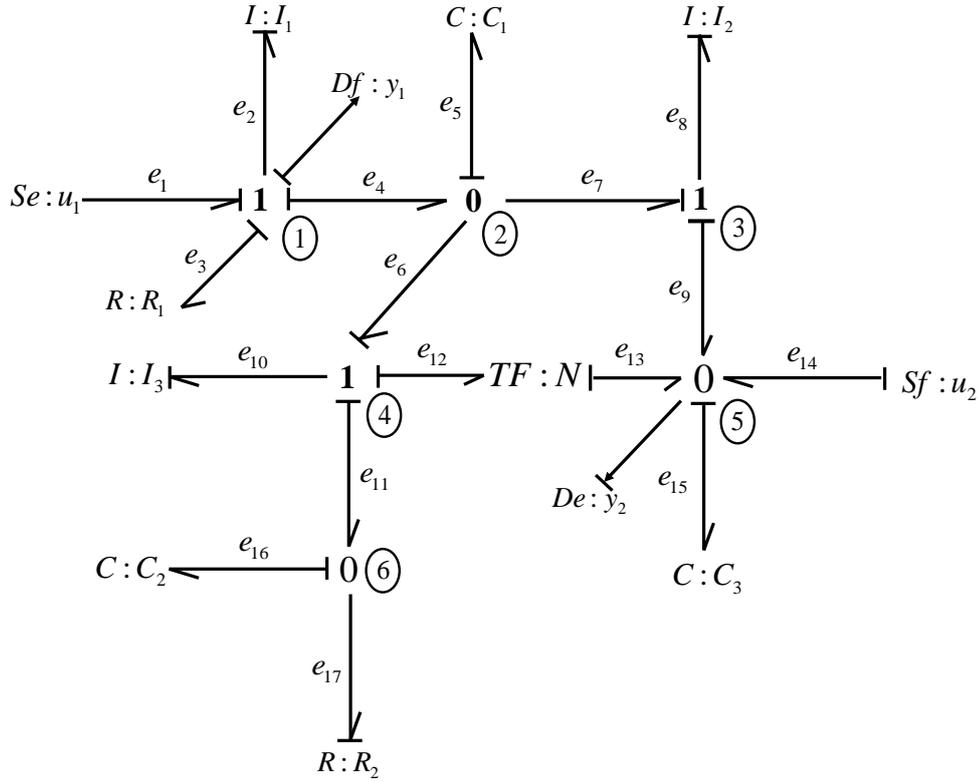


Figure 3.6 – Un exemple pédagogique d'un modèle BG

- Donner une valeur négative à chaque élément R .

Le modèle dual du modèle BG donné par la Figure 3.6 est présenté dans la Figure 3.8. Si le modèle dual est contrôlable, cela veut dire que le modèle BG initial est observable. La procédure de vérification de la contrôlabilité du modèle BG est faite par des manipulations causales semblables à celle de l'observabilité (l'affectation de la causalité dérivée et la dualisation de sources d'entrées). Le modèle BG est dit contrôlable [Sueur 1991] si, et seulement si :

- Chaque élément dynamique en causalité intégrale du modèle BG en causalité intégrale différentielle est causalement lié à au moins une source d'entrée.
- Rang-BG $(A|B) = n$

Après avoir vérifié que le modèle BG dual de la Figure 3.8 est contrôlable, le modèle BG initial est observable. Nous ne présentons pas de manière plus précise les différentes phases d'étude car elles sont très proches de celles exploitées dans le cas de la vérification

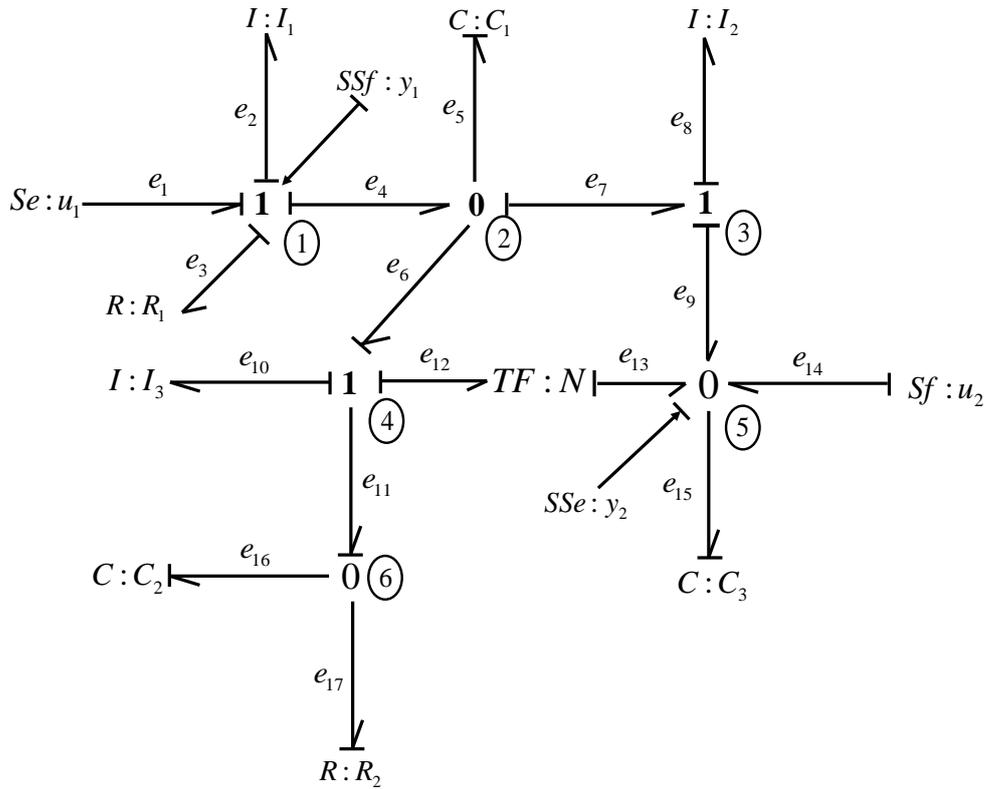


Figure 3.7 – Modèle BG de la Figure 3.6 en causalité dérivée

de la propriété d'observabilité.

3.3 Détectabilité et isolabilité structurelles de défauts composants

Dans cette partie, nous présentons les conditions graphiques nécessaires et suffisantes de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles de défauts composants sur un modèle BG. L'analyse des conditions de détectabilité et d'isolabilité structurelles de défauts est basée sur la notion de la bicausalité, les propriétés causales et structurelles du modèle BG, et le concept des chemins causaux disjoints. Nous présentons dans un premier temps la procédure de construction du modèle anneau BG de diagnostic. Par la suite, les conditions de détectabilité et d'isolabilité sont exposées. Mais avant de commencer, nous soulignons l'hypothèse suivante :

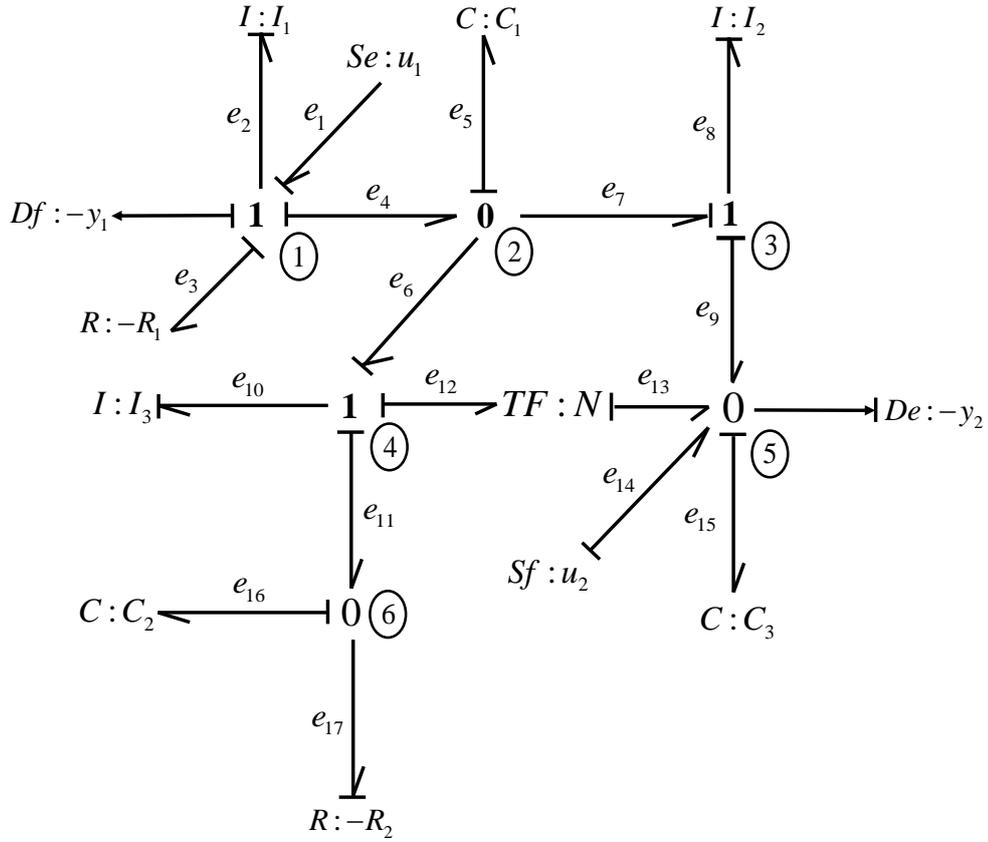


Figure 3.8 – Modèle BG dual du modèle BG de la Figure 3.6.

Hypothèse 1 : *Uniquement un seul défaut composant est considéré au sein de la même jonction.*

3.3.1 Modèle Anneau BG de diagnostic

La déteçtabilité et l'isolabilité structurelles de défauts reposent sur le principe d'inversion défaut - sortie. Pour cela, l'idée d'utiliser la notion de bicausalité pour l'étude de la déteçtabilité et de l'isolabilité de défauts est motivée par les possibilités de calculs offertes par la bicausalité. En effet, la bicausalité permet d'imposer deux variables de puissances aux ports des éléments $DeDf$, $SeSf$ comme illustré par les Figures 3.9, 3.10.

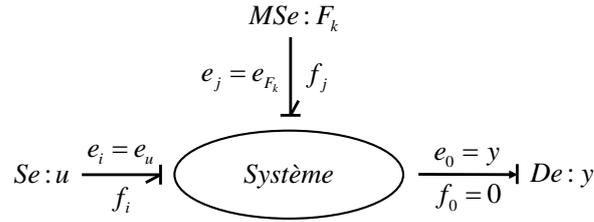


Figure 3.9 – Modèle anneau BG à mot d'un système défectueux.

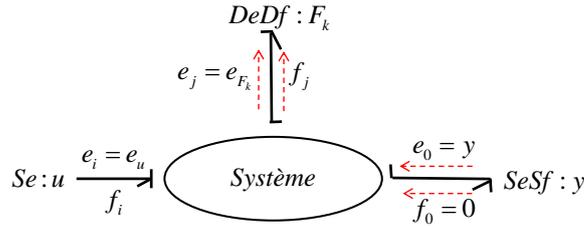


Figure 3.10 – Modèle anneau BG à mot de diagnostic.

Le système (Figure 3.9) a une entrée $u = e_i$ et une sortie $y = e_0$. Un défaut composant est considéré comme une entrée inconnue et est modélisé par une source modulée. Dans le cas du système de la Figure 3.9, le défaut est modélisé par une source d'effort modulée $e_{F_k} = e_j$. L'inversion défaut-sortie revient à imposer la variable $y = e_0$ au système, la variable conjuguée $f_j = 0$ doit être aussi imposée. Cependant elle doit être nulle puisque au départ elle ne fournit pas de puissance au système. Pour cela une $SeSf$ avec $f = 0$ est alors utilisée. Quant au défaut, il est remplacé par un élément $DeDf$, Figure 3.10. En propageant la bicausalité tout au long du chemin causal sortie - défaut, on va remonter à la variable du défaut e_{F_k} .

Pour un modèle anneau BG ayant r défauts et k sorties avec $r \leq k$, la propagation de la bicausalité se fait par rapport à un ensemble de chemins causaux disjoints.

Définition 3.4 : Deux chemins causaux sont qualifiés de disjoints si et seulement si, ils n'ont pas une variable en commun, [Ngwompo 2001].

Autrement dit, supposons que S_1 est l'ensemble des éléments parcourus par le chemin causal ϕ_1 , et S_2 l'ensemble des éléments parcourus par le chemin causal ϕ_2 . Les deux chemins causaux ϕ_1 et ϕ_2 sont disjoints si : $S_1 \cap S_2 = \{0\}$.

Notons par $G_i(F_z, y_j)$ un chemin causal entre la variable défaut F_z avec $z = 1..r$ et la variable sortie y_j avec $j = 1..k$. Le chemin causal G_i a une longueur l_i , elle est notée par $n_i(G_i) = l_i$

La procédure de construction du modèle anneau BG de diagnostic est basée sur les définitions suivantes

Définition 3.5 : Nous désignerons par un ensemble bijectif de r chemins causaux défauts - sorties tout ensemble Φ constitué de r chemins causaux défauts - sorties tel que chaque variable de défaut F_i (resp, variable de sortie y_i) est le point de départ (resp, d'arrivée) d'un seul chemin causal de l'ensemble Φ .

Autrement dit, un ensemble bijectif Φ définira une bijection de l'ensemble des variables de défaut vers l'ensemble des variables de sortie du système défectueux.

Définition 3.6 : La longueur $n(\Phi)$ d'un ensemble bijectif Φ est égal à la somme des longueurs de r chemins causaux G_i constituant l'ensemble :

$$n(\Phi) = \sum_{i=1}^r n_i(G_i) \quad (3.15)$$

Par conséquent, la procédure est comme suit :

1. A partir du modèle anneau BG en causalité intégrale, déterminer un ensemble Φ_1 des ensembles bijectifs Φ de r chemins causaux $G(F, y)$ disjoints.
 - Si : $\Phi_1 = \{0\}$, alors il n'y a pas une inversion défaut - sortie, et la procédure s'arrête.
 - Sinon déterminer un ensemble Φ_0 tel que $n(\Phi_0) = \min_{\Phi \in \Phi_1} \{n(\Phi)\}$
2. Sur le modèle anneau BG acausal, remplacer les sources modulées (associées aux défauts) par des éléments $DeDf$ et les détecteurs (associés aux sorties) par des éléments $SeSf$,

3. Choisir un chemin k_i de Φ_0 , $i = 1, \dots, r$ et propager la bicausalité tout au long du chemin causal k_i .

Répéter l'étape 3 pour tous les chemins k_i de Φ_0 .

– Si le modèle possède un conflit de causalité ou des boucles causales non résolubles, alors le système n'est pas surveillable et la procédure s'arrête.

4. Choisir un élément dynamique I ou C sans causalité et lui affecter une causalité intégrale. Propager la bicausalité le plus loin possible.

Répéter cette étape jusqu'à ce que tous les éléments dynamiques aient une causalité.

5. Choisir un élément R sans causalité et lui affecter une causalité arbitraire. Propager la bicausalité le plus loin possible.

Répéter cette étape jusqu'à ce que tous éléments du modèle BG aient une causalité.

Fin de la procédure.

Les remarques suivantes sont tirées à partir de cette procédure :

- Dans le cas où il n'existe aucun ensemble de chemins causaux défauts-sorties disjoints, le modèle BG n'est donc pas surveillable en présence de défauts.
- Si par contre, il existe plusieurs choix de chemins causaux défauts-sorties disjoints, la procédure peut s'appliquer indifféremment sur l'un de ces ensembles.

Exemple :

Afin d'expliquer davantage la procédure de construction du modèle anneau BG de diagnostic, nous considérons le modèle BG de la Figure 3.6 à titre d'exemple. Sur ce modèle, deux éléments seront surveillés : l'élément $I : I_1$ et l'élément $C : C_2$. Le modèle BG en présence de défauts considérés est représenté par la Figure 3.11. A partir de ce modèle, l'ensemble bijectif Φ de deux ($r = 2$) chemins causaux défauts-sorties sont les suivants :

$$\begin{array}{l}
 \Phi_1 \left\{ \begin{array}{ll}
 MSe : F_1 \xrightarrow{e_{F_1}, e'_2} I : I_1 \xrightarrow{f'_2, f_2} Df : y_1 & l = 1 \\
 Msf : F_2 \xrightarrow{f_{F_2}, f_{16}} C : C_2 \xrightarrow{e'_{16}, e_{16}, e_{11}, e_{10}} I : I_3 \xrightarrow{f_{10}, f_{12}} TF : N \xrightarrow{f_{13}, f_{15}} C : C_3 \xrightarrow{e_{15}} De : y_2 & l = 3
 \end{array} \right. \\
 \Phi_2 \left\{ \begin{array}{ll}
 MSe : F_1 \xrightarrow{e_{F_1}, e'_2} I : I_1 \xrightarrow{f'_2, f_2, f_4, f_5} C : C_1 \xrightarrow{e_5, e_7, e_8} I : I_2 \xrightarrow{f_8, f_9, f_{15}} C : C_3 \xrightarrow{e_{15}} De : y_2 & l = 4 \\
 Msf : F_2 \xrightarrow{f_{F_2}, f_{16}} C : C_2 \xrightarrow{e'_{16}, e_{16}, e_{11}, e_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, f_8, f_5} C : C_1 \xrightarrow{e_5, e_4, e_2, e'_2} I : I_1 \xrightarrow{f'_2, f_2} Df : y_1 & l = 4
 \end{array} \right. \quad (3.16)
 \end{array}$$

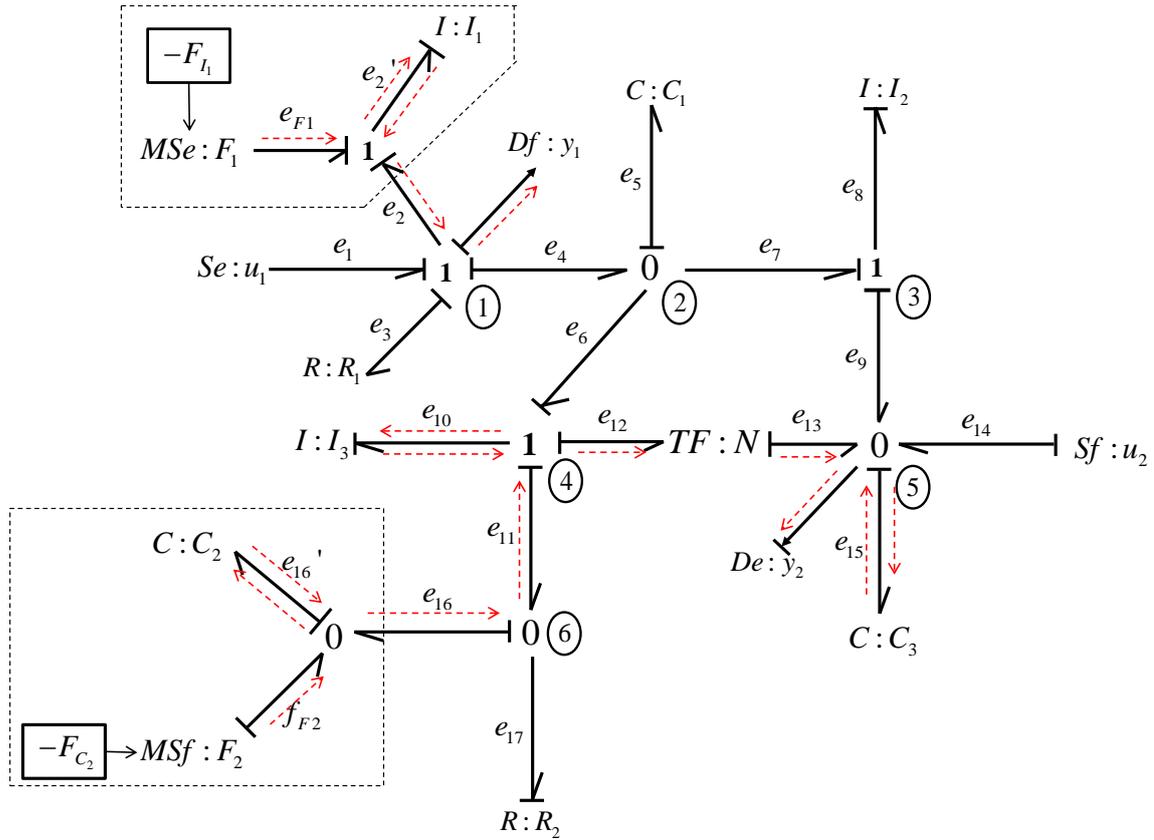


Figure 3.11 – Modèle BG du système défectueux.

L'ensemble de deux chemins causaux défauts- sorties disjoints est l'ensemble Φ_1 . Par conséquent, comme il est unique, la procédure d'obtention du modèle anneau BG de diagnostic est alors appliquée sur les chemins causaux constituant cet ensemble. Pour cela, les sources modulées représentant les défauts ($MSe : F_1$ et $MSf : F_2$) sont remplacées par des éléments $DeDf$ et les détecteurs $De : y_1$ et $Df : y_2$ sont remplacées par des éléments $SeSf$. La Figure 3.12 illustre le modèle anneau BG de diagnostic résultant. Ce modèle va être utilisé par la suite pour l'analyse structurelle de la déteçtabilité et l'isolabilité de défaut.

3.3.2 Déteçtabilité structurelle de défauts composants

La déteçtabilité d'un défaut repose fortement sur l'observabilité du système. Un défaut est dit déteçtable si et seulement si, son effet sur le système physique est observable sur

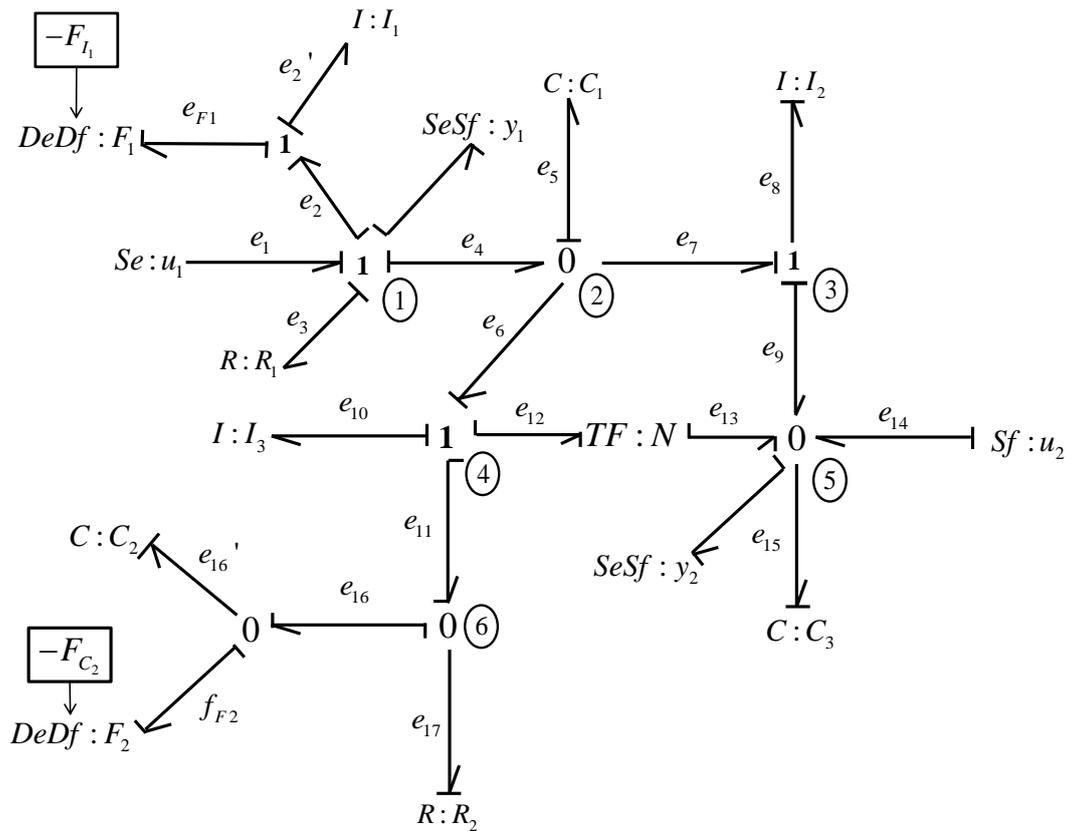


Figure 3.12 – Modèle anneau BG de diagnostic du système défectueux.

les sorties du système. Dans cette partie, nous présentons une procédure graphique qui permet de vérifier l'observabilité structurelle d'un défaut. Elle est basée sur le concept de la bicausalité et l'étude des propriétés causales et structurelles du modèle BG du système. Après avoir modélisé les défauts composants à surveiller par des sources d'efforts ou de flux modulées (Mse, Msf) respectivement (comme il est montré dans le chapitre 2) et appliqué la procédure d'obtention du modèle anneau BG de diagnostic, un défaut composant est dit structurellement observable (détectable) si et seulement si :

Théorème 3.3 : *Si tous les éléments dynamiques acceptent la causalité dérivée sur le modèle anneau BG de diagnostic ; le système en présence de défauts est dit surveillable et les défauts modélisés par des entrées modulées sont dit observables par rapport aux entrées u et les sorties y , [Benmoussa 2011].*

La preuve de ce théorème est basée sur la notion d'inversibilité défaut-sortie et le module des zéros invariants dont la définition est donnée par :

Définition 3.7 : *Le module des zéros invariants est définie comme le module Ω quotienté par le sous module généré par $[y]$, et il est noté par $T(\Omega/[y])$. Le module des zéros invariants est dit trivial, si il est réduit à $\{0\}$, [Fliess 2004].*

Preuve 1 : *Considérons "n" le nombre d'éléments dynamiques en causalité intégrale dans le modèle BG en causalité intégrale préférentielle et "a" le nombre d'éléments dynamiques qui acceptent la causalité dérivée quand la procédure pour l'obtention du modèle anneau BG de diagnostic est appliquée. Si $n - a = 0$, c'est-à-dire, aucun élément dynamique ne garde la causalité intégrale, cela implique que les n éléments dynamiques sont causalement reliés à au moins une sortie (SeSf). Dans le cadre algébrique, l'inversion tout au long de l'ensemble des chemins causaux disjoints (défauts-sorties) correspond à créer le module de quotient $[y_r]$. Si $T(\Omega/[y_r])$ est trivial, c'est à dire Ω est un module de torsion libre, alors les défauts sont structurellement déteçtables. Dans ce cas, les variables du défaut F sont algébriquement différentielles sur $[y_r]$: les variables F sont exprimées en fonction de la variable de sortie et de leurs dérivées.*

Dans le cas où il reste des éléments dynamiques qui gardent leurs causalités intégrales, s'ils ne sont pas causalement reliés par une source d'information (déteçteur), alors ils appartiennent au module de torsion $T(\Omega/[y_r])$. En effet, le modèle anneau BG du système défectueux est vu dans le cadre algébrique comme :

$$\Omega = \Omega/[y_r] \oplus T(\Omega/[y_r]) \quad (3.17)$$

La surveillabilité du système en présence de défauts repose sur l'observabilité du module de quotient $T(\Omega/[y_r])$: si il est observable ([Sueur 1991]), le système en présence de défauts est dit surveillable et les défauts sont déteçtables. La déteçtabilité des défauts implique que les variables d'énergie généralisées (p et q) associées aux éléments de stockage (I, C) sont exprimées en fonction de la variable de sortie y et de leurs dérivées et que les

variables de défauts seront exprimées en fonction des variables d'entrées u et de sorties y et de leurs dérivées respectives (3.18).

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \psi_1(y, \dots, y^{(w_1)}) \\
 &\vdots \\
 x_n &= \psi_n(y, \dots, y^{(w_n)}) \\
 F_1 &= \zeta_1(u, \dots, u^{(v_1)}, y, \dots, y^{(h_1)}) \\
 &\vdots \\
 F_r &= \zeta_r(u, \dots, u^{(v_r)}, y, \dots, y^{(h_r)})
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

avec $x = p \vee q$.

3.3.3 Isolabilité structurelle de défauts composants

Le problème de l'isolabilité structurelle nous renvoie à la distinction de l'influence de deux défauts. Il repose sur le principe que deux défauts différents ont une influence différente sur les sorties du système physique. Sur un modèle BG, l'isolabilité structurelle d'un défaut composant est basée sur l'analyse du chemin causal entre l'élément $DeDf$ associé au défaut et l'élément $SeSf$ associé au détecteur. Elle est donnée par le théorème suivant :

Théorème 3.4 : *"r" défauts composants sont dit structurellement isolables si et seulement s'il existe "r" chemins causaux disjoints reliant les sources d'information aux défauts passant par les éléments de stockage (I et C) qui existent dans ce chemin causal, [Benmoussa 2011].*

Preuve 2 : *Considérons "k" le nombre de sources d'informations (détecteurs) et "r" le nombre de défauts composants, tels que : $r < k$. Le i^{eme} chemin causal $\tilde{G}_i(y_i, F_i)$, où $i = 1 \dots r$, reliant la source d'information y_i représentée par un élément $SeSf$ sur le modèle anneau BG de diagnostic au défaut composant F_i représenté par l'élément $DeDf$, couvre 'd' éléments de stockage ($C_{l,i}$, et $I_{l,i}$) où $i = 1 \dots d$. Notons par S_1, S_2, \dots, S_r l'ensemble de tous les éléments qui existent dans le $i^{me} / i = 1 \dots r$ chemin causal $\tilde{G}_i(y_i, F_i)$*

respectivement. L'ensemble des chemins causaux (sortie - défaut) donne naissance au graphe orienté suivant :

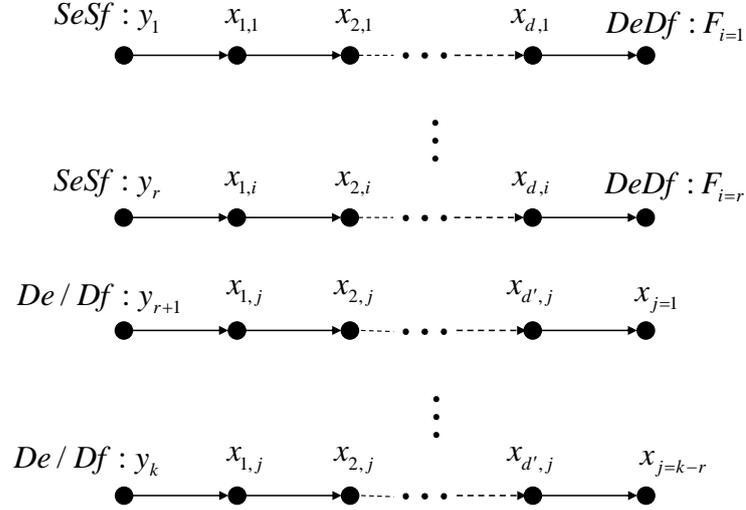


Figure 3.13 – Un graphe orienté sorties - défauts représentant le théorème 3.4

La variable $x_{l,i}$ est la variable d'état qui correspond aux variables d'énergies associées aux éléments dynamiques dans le modèle BG, où $i = 1 \dots r$ représente le nombre de chemins causaux existants et $l = 1 \dots d$ le nombre d'éléments dynamiques parcourus par le chemin causal. Les r défauts composants sont dit structurellement isolables si et seulement si $S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_r = \{\emptyset\}$. Autrement dit, deux défauts composants sont structurellement isolables si les composants surveillés n'existent pas dans deux chemins causaux différents.

L'équivalent du théorème 3.4 dans le cadre algébrique est l'existence d'un système d'équation de parité tel que :

$$M \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_r \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} + S \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

où $M \in k[\delta]^{r \times r}$, $Q \in k[\delta]^{r \times m}$, $S \in k[\delta]^{r \times k}$, $\det M \neq 0$.

Remarque 3.5 : Dans le cas où il existe un élément de stockage en causalité intégrale

sur le modèle anneau BG de diagnostic, les "r" défauts composants ne sont pas structurellement isolables même s'il existe 'r' chemins causaux. Et cela parce le système n'est pas surveillable en présence des r défauts.

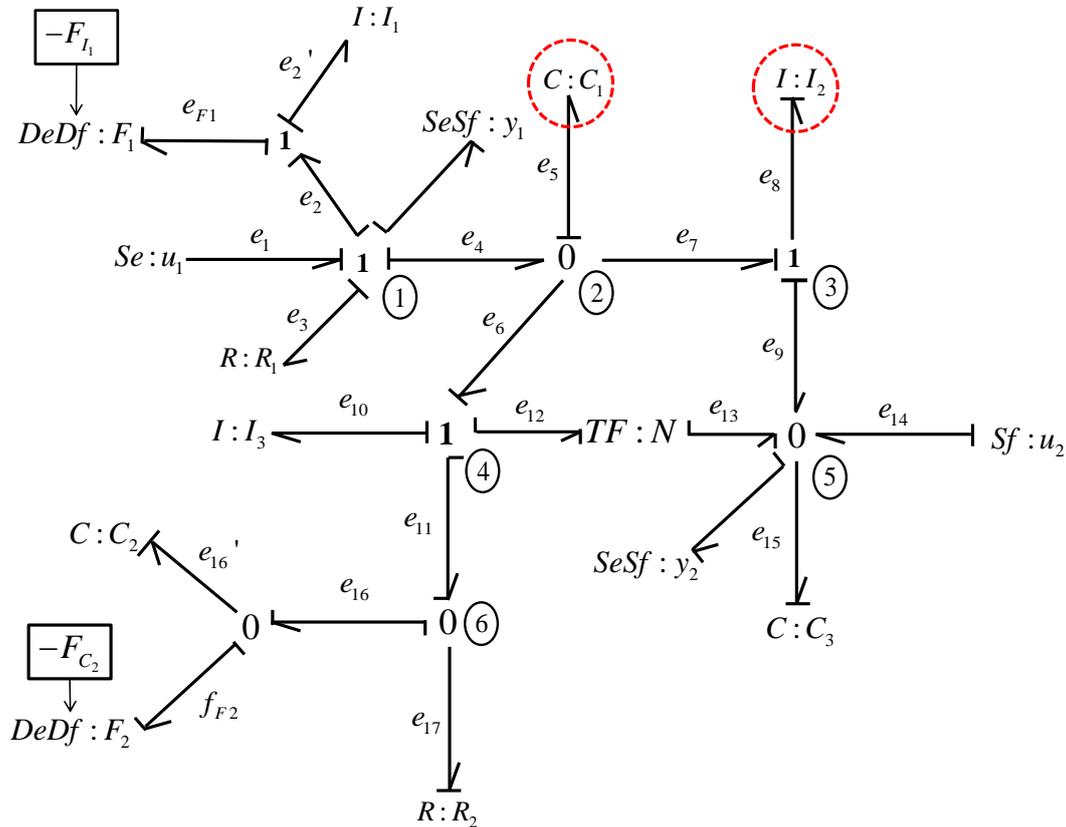


Figure 3.14 – modèle anneau BG de diagnostic pour la détectabilité structurelle de défauts.

Exemple :

Afin de montrer la procédure de vérification graphique de la détectabilité et de l'isolabilité structurelle proposée ci-dessus, nous reprenons le modèle BG de la Figure. 3.14. Sur ce dernier, deux éléments gardent leurs causalité intégrale (C_1 et I_2). Donc, et d'après le théorème 3.3, le système n'est pas surveillable en présence de défauts sur les éléments $I : I_1$ et $C : C_2$. Autrement dit, les défauts ainsi que les états du système ne sont pas exprimés en fonction des entrées u et les sorties y du système et leurs dérivées. L'étude des chemins causaux disjoints sur le modèle BG de la Figure 3.15, montre qu'il existe deux chemins causaux disjoints qui sont :

$$\begin{cases} SeSf : y_1 \xrightarrow{f_2, f'_2} I : I_1 \xrightarrow{e'_2, e_{F1}} DeDf : F_1 \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{e_{15}} C : C_3 \xrightarrow{f_{15}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{16}, e'_{16}} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F2}} DeDf : F_2 \end{cases} \quad (3.20)$$

tant que la déteçtabilité de défaut n'est pas assurée (le système en présence de défaut n'est pas surveillable), et l'isolabilité des deux défauts n'est pas vérifiée.

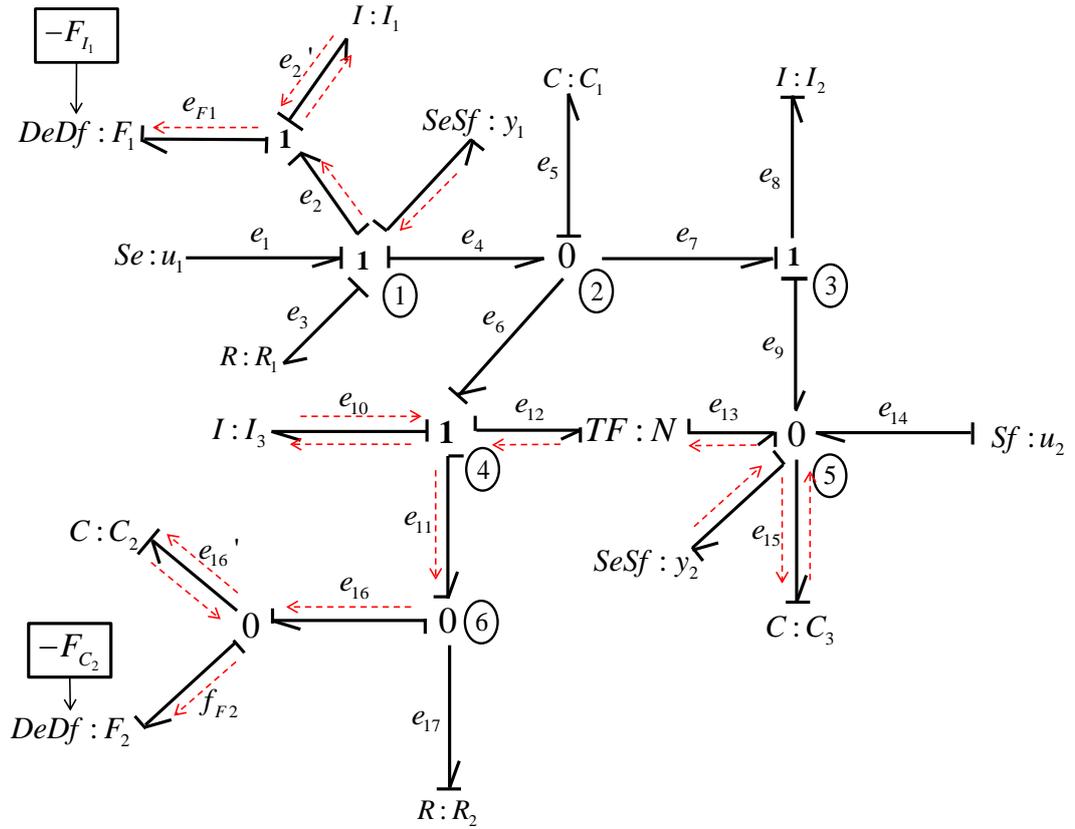


Figure 3.15 – Modèle anneau BG de diagnostic pour l'isolabilité structurelle de défauts.

A partir du modèle anneau BG de la Figure 3.15, et en utilisant les équations de conservation d'énergie et les équations caractéristiques des éléments BG, les équations différentielles qui expriment la relation des variables de défauts avec les variables du système peuvent être obtenues. En effet, à partir des équations de conservation d'énergie des jonctions 1_① et 0_⑥, les deux défauts F_1 et F_2 sont exprimés en fonction des variables d'énergie (e/f) respectivement par :

$$\begin{cases} e_{F_1} = -e_1 + e'_2 + e_3 + e_4 \\ e_{F_2} = -f_{11} + f'_{16} + f_{17} \end{cases} \quad (3.21)$$

Le but est d'exprimer les variables inconnues (e, f) de (3.21) en fonction des variables connues, en l'occurrence les variables d'entrée (u_1, u_2) et les variables de sortie (y_1, y_2) . En parcourant les chemins causaux entre les variables inconnues et les variables connues, nous obtenons les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} F_1 = -u_1 + \dot{y}_1 + \frac{R_1}{T_1}y_1 + \frac{1}{C_1}q_1 \\ F_2 = -\dot{y}_2 + \frac{1}{R_2C_2}y_2 + \frac{1}{I_3}p_3 \end{cases} \quad (3.22)$$

où q_1, p_3 sont des variables d'énergie généralisées associées aux éléments de stockage C_1, I_3 respectivement. Ces dernières sont données par :

$$\begin{cases} q_1 = \int f_5 dt \\ p_3 = \int e_{10} dt \end{cases} \quad (3.23)$$

Les variables $(f_5$ et $e_{10})$ sont inconnues. En effet, à partir de la jonction $0_{\textcircled{2}}$ et l'équation caractéristique de l'élément $C : C1$ en causalité intégrale, les équations suivantes sont obtenues :

$$\begin{cases} f_5 = C \frac{d}{dt} e_5 \\ e_5 = e_4 = e_6 = e_7 \\ f_5 = f_4 + f_6 + f_7 \end{cases} \quad (3.24)$$

A partir de (3.24), la connaissance de la variable f_5 repose soit sur la connaissance de la variable e_5 soit sur la connaissance des variables f_4, f_6, f_7 . Examinons ces deux cas :

1. La détermination de la variable e_5 est basée sur la connaissance d'une de ces variables e_4, e_6 ou e_7 . En parcourant les chemins causaux entre les sources d'informations y_1 et y_2 représentées par les éléments $SeSf$ sur le BG de la Figure 3.15, nous remarquons qu'il n'existe aucun chemin causal reliant les sources $SeSf$ avec une de ces variables. Par conséquent, les variables d'effort associées à la jonction $0_{\textcircled{2}}$ ne

sont pas observées par une source d'information, donc la variable e_5 ne peut pas être exprimée en fonction des variables connues ainsi que de leurs dérivées.

2. f_4, f_6, f_7 sont des variables connues s'il existe un chemin causal entre ces variables et les sources d'information :

– la variable f_4 est reliée par la source d'information y_1 par :

$$SeSf : y_1 \rightarrow f_4 \quad (3.25)$$

– la variable f_6 est connectée causalement à une source d'information par :

$$SeSf : y_1 \rightarrow e_{15} \rightarrow f_{15} \rightarrow f_{13} \rightarrow f_{12} \rightarrow f_6 \quad (3.26)$$

– Quant à f_7 , c'est une variable inconnue puisqu'il n'existe aucun chemin causal entre cette variable et une source d'information.

Vu qu'il existe une variable inconnue, en l'occurrence f_7 , la variable f_5 n'est pas exprimée en fonction des sources d'information existant dans le système.

Nous tenons à remarquer que même si la variable f_7 est une variable connue, et que la variable f_5 est algébriquement observable sur les sources d'information, le défaut F_1 n'est pas détectable puisque la connaissance de la variable d'énergie q_1 repose sur l'intégration de la variable f_5 ce qui nécessite que les conditions initiales soient connues. Autrement dit, la variable F_1 n'est pas algébrique par rapport aux sorties du système et leurs dérivées.

La procédure de raisonnement est identique pour le défaut F_2 . En effet, pour que le défaut soit décrit par une relation polynomiale en fonction des entrées et sorties du système ainsi que de leurs dérivées, il faut que toutes les variables de puissances (e/f) soient observables par une source d'information. Cependant, la variable d'effort e_6 qui rentre dans la composition de l'équation de conservation de l'énergie de la jonction 1_④ donnée par (3.27) n'est pas connue car elle n'est pas causalement connectée à une source d'information.

$$e_{11} = e_{10} + e_{12} + e_6 \quad (3.27)$$

Dans le paragraphe suivant, une méthodologie de placement de capteurs pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts sera présentée.

3.4 Placement de capteur pour le recouvrement de la surveillabilité du système

Le placement de capteurs est une étape importante dans la conception des systèmes de diagnostic intégrés, puisque la surveillabilité d'un système industriel dépend fortement du nombre de capteurs et de leur placement. Le placement de capteurs peut être de nature "combinatoire" comme cela est proposé dans [Blanke 2003] ou de façon graphique "manuelle" directement sur le modèle BG [Samantary 2008a, Djeziri 2009, Khemliche 2006]. L'outil BG permet un placement explicite de capteurs, et cela grâce à son architecture graphique.

Dans cette partie, nous étudierons le recouvrement de l'observabilité d'états et de défauts sur le modèle BG. En effet, l'observabilité de la partie BG correspondante au module $T(\Omega/[y_r])$ entraîne la surveillabilité du système en présence de défauts. Un placement de capteurs optimal et non-exhaustif est proposé en utilisant la propriété de la longueur du chemin causal. Ce placement de capteur est dit optimal dans le sens où il permet un recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts. L'idée est de placer des détecteur d'effort De^* ou de flux Df^* fictif dans chaque jonction contenant un élément de stockage en causalité intégrale sur le modèle anneau BG de diagnostic, et d'identifier les chemins causaux reliant les éléments dynamiques aux sorties fictives (détecteurs d'effort ou de flux).

Notons par $G(x, y)$ un chemin causal qui relie un élément dynamique (I ou C) au détecteur associé à une sortie fictive y^* . Soit $\Phi = \{G_i(x, y)/i = 1..λ\}$, l'ensemble de che-

mins causaux $G(x, y)$ identifiés sur la partie BG correspondante au module $T(\Omega/[y_r])$ avec $\lambda = \text{card}(\Phi)$ le nombre total de chemins identifiés.

La procédure de placement de capteurs pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts est comme suit :

1. Déterminer un ensemble Φ_1 des ensembles Φ de chemins causaux G_i disjoints :
 - Si Φ_1 est constitué d'un seul ensemble Φ_0 , passer à l'étape 2,
 - Sinon, déterminer un ensemble Φ_0 tel que :

$$n(\Phi_0) = \max_{\Phi \in \Phi_1} \{n(\Phi)\} \quad \wedge \quad \mu = \min\{\text{card}(\Phi)\}. \quad (3.28)$$

2. Choisir un chemin i de Φ_0 avec $i = 1 \dots \mu_0$ et remplacer le détecteur fictif associé à ce chemin par un élément $SeDf$ (resp, $SfDe$) si le détecteur fictif est connecté à la jonction 1 (resp, jonction 0),
3. Propager la causalité tout au long du chemin causal i jusqu'à ce que tous les éléments dynamiques existant sur ce chemin acceptent une causalité dérivée.
Revenir à l'étape 2, et répéter pour tous les chemins i de Φ_0
Si le modèle possède un conflit de causalité, la procédure s'arrête.

Remarque 3.6 : Le nombre de détecteurs à ajouter au modèle anneau BG de diagnostic est égal à μ_0 qui est le nombre de chemins causaux constituant l'ensemble Φ_0 .

Exemple :

Considérons le modèle BG de la Figure. 3.16. Nous constatons sur ce modèle que deux éléments dynamiques (C_1 et I_2) sont en causalité intégrale, ce qui correspond au module de torsion $T(\Omega/[y_r])$. L'observabilité de cette partie du modèle va permettre la surveillabilité du système en présence de défauts. L'ensemble Φ de chemins causaux $G(x, y)$ déterminés à partir de ce modèle est :

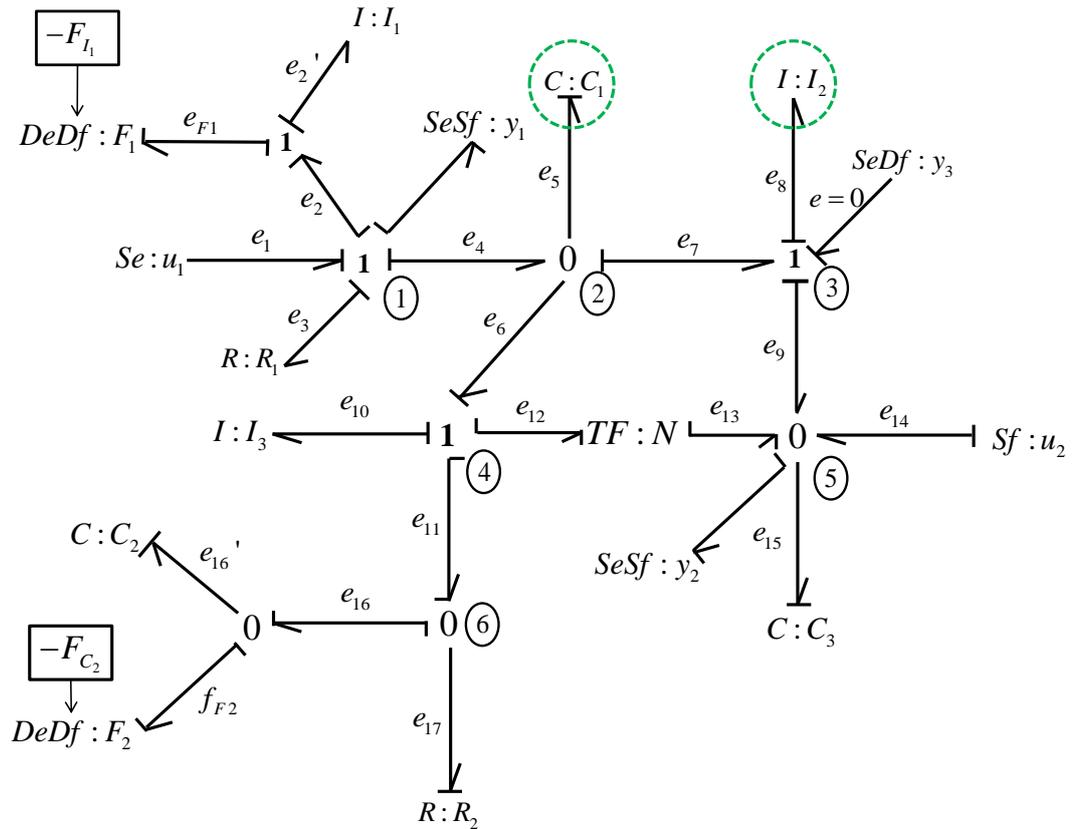


Figure 3.17 – Modèle anneau BG de diagnostic après le placement de capteurs.

$\{G_4\}$. Donc, il suffit juste de choisir un de ces deux ensembles et appliquer la procédure de placement de capteurs. Par exemple, si le choix porte sur l'ensemble $\Phi_0 = \{G_4\}$, le capteur fictif Df^* associé au chemin causal G_4 est remplacé par un élément $SeDf$. Ensuite la propagation de causalité est appliquée tout au long de ce chemin jusqu'à ce que la causalité dérivée soit attribuée aux éléments de stockage $C : C_1$ et $I : I_2$. Le modèle BG résultant est illustré par la Figure 3.17. De même, sur ce modèle anneau BG de diagnostic, les conditions graphiques de la détectabilité et de l'isolabilité structurelle de défauts composants sont vérifiées :

- Tous les éléments dynamiques (I et C) sont en causalité dérivée,
- Il existe deux chemins causaux disjoints qui relient les défauts aux sources d'information.

Une fois que les défauts composants sont structurellement détectables et isolables, il

est primordial d'avoir des équations algébriques des variables de défauts en fonction des variables du système. On appelle cette étape *la paramétrisation différentielle*. Dans la section suivante, nous proposons une procédure de paramétrisation directe à partir du modèle anneau BG de diagnostic.

3.5 Paramétrisation différentielle de défauts

Dans cette partie, nous proposons une méthode directe pour la paramétrisation différentielle des variables de défauts en fonction des variables d'entrées et de sorties et de leurs dérivées respectives, c'est à dire générer des expressions algébriques des indicateurs de défauts de la forme :

$$F_i = \psi_i(u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots, y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots) \quad (3.31)$$

La méthode proposée est basée sur l'utilisation de la règle de *Mason* (Annexe .B.3) sur le modèle anneau BG de diagnostic. Grâce à la notion de la bicausalité, la paramétrisation différentielle peut être obtenue directement à partir de ce modèle. En effet, l'application de la règle de Mason sur le modèle anneau BG de diagnostic permet d'obtenir les relations de transfert entre les entrées et les sorties du système. Cette propriété est étendue dans ce travail à la paramétrisation des variables de défauts. Cette procédure est immédiate et obtenue directement à partir du Modèle BG. Aussi, elle nécessite peu de calcul.

3.5.1 Expression du gain

La paramétrisation différentielle du défaut en fonction des variables du système est exprimée en fonction des gains des chemins causaux. Le gain d'un chemin causal est calculé à partir des gains des éléments qu'il traverse.

Définition 3.8 : *L'expression du gain symbolique (resp, temporel) d'un élément traversé est la relation symbolique (resp, temporelle) entre les variables e et f à ses bornes.*

L'expression du gain d'un chemin causal entre les variables e_i et f_i , est calculée conformément à l'équation (3.32) en parcourant le chemin causal de la fin vers le début, et en respectant l'ordre des gains symboliques des éléments traversés.

$$T_i = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i^k, r_i^j, g_i(\cdot)) \quad (3.32)$$

où :

- n_0 et n_1 représentent respectivement le nombre total de changements d'orientation des liens aux jonctions 0 quand on suit la variable flux, et aux jonctions 1 quand on suit la variable effort.
- m_i^k et r_i^j sont les modules des éléments TF et GY intervenant dans le chemin causal avec :
 - $k = +1$ ou -1 suivant la causalité de l'élément TF .
 - $j = +1$ ou -1 suivant la causalité de l'élément GY .
- $g_i(\cdot)$ est la transmittance symbolique des éléments (R, I, C) traversés.

Remarque 3.7 : La transmittance est en fonction de δ dans l'anneau différentiel $k[\delta]$.

Pour une boucle causale, l'expression du gain est la suivante :

$$B_i = (-1)^{n_0+n_1} \prod_j (m_j^2)^{k_j} \prod_p (r_p^2)^{l_p} \prod_e g_e(\cdot) \quad (3.33)$$

Où les entiers n_0, n_1, k, l et les gains m, r, g sont définis comme précédemment.

3.5.2 Gains des éléments

Dans cette partie, nous présentons l'expression des gains des éléments BG en utilisant les notions de la théorie du module. A ce stade, nous admettons que :

- Les variables bond graph e, f, Se, Sf, Df, De, p , et q sont des éléments d'un $k[\delta]$ - module à gauche Ω , engendré par les éléments dynamiques et les sources de commande, ainsi que les détecteurs de sortie.

- Les valeurs des éléments R , I et C et les modules des transformateurs TF et des gyrateurs GY , sont des éléments d'un corps commutatif k

L'objectif de cette section est de présenter les expressions des gains des éléments R , I et C dans l'anneau k . Nous rappelons que la transmittance d'un élément est donnée par la définition suivante :

Définition 3.9 : (*Transmittance*) La transmittance (ou gain) d'un élément (R, I, C) est le rapport entre sa variable de sortie et sa variable d'entrée.

La transmittance d'un élément R

Le gain T_R de l'élément R dépend si ce dernier est en causalité résistance ou causalité conductance. Il est donné par :

- Causalité résistance :

$$T_R = R \quad (3.34)$$

- Causalité conductance :

$$T_R = \frac{1}{R} \quad (3.35)$$

La transmittance d'un élément I et C

L'expression du gain d'un élément de stockage (I, C) dépend fortement de sa causalité : intégrale ou dérivée. Dans le cas de la causalité intégrale, la transmittance d'un élément de stockage X (I, C) est exprimée dans un corps $k[\delta^{-1}]$ et elle est donnée par :

$$T_X = \frac{1}{X} \delta^{-1} \quad (3.36)$$

Pour expliquer davantage, nous prenons à titre d'exemple l'élément de stockage $I : L$ en causalité intégrale. L'équation caractéristique dans ce cas est donnée par :

$$f(t) = \frac{1}{L} \int e(t) dt \quad (3.37)$$

La transformation de *Laplace* en utilisant la théorie des modules (voir annexe A) de (3.37) est :

$$\hat{f}(t, \delta) = \frac{1}{L} \delta^{-1} \hat{e}(t, \delta) \quad (3.38)$$

Par conséquent, la transmittance de l'élément I est donnée par :

$$T_I = \frac{\hat{f}(t, \delta)}{\hat{e}(t, \delta)} = \frac{1}{L} \delta^{-1} \quad (3.39)$$

où T_I est dans un corps $k[\delta^{-1}]$.

Quand l'élément de stockage est en causalité dérivée, la transmittance de ce dernier est exprimée comme suit :

Considérons un élément de stockage $I : L$ en causalité dérivée dont l'équation caractéristique est :

$$e(t) = L \frac{d}{dt} f(t) \quad (3.40)$$

Cette équation aura la forme de (3.41) dans le domaine symbolique.

$$\hat{e}(t) = L \delta \hat{f}(t) \quad (3.41)$$

La transmittance de l'élément I en causalité dérivée est alors exprimée par :

$$T_I = \frac{\hat{e}(t)}{\hat{f}(t)} = L \delta \quad (3.42)$$

D'une manière générale, le gain d'un élément de stockage $X (I, C)$ en causalité dérivée est exprimé dans un corps commutatif $k[\delta]$ et est donné par

$$T_X = X \delta \quad (3.43)$$

Remarque 3.8 : La transmittance d'un élément de stockage en causalité intégrale (resp, en dérivée) est exprimée dans un corps $k[\delta^{-1}]$ (resp, $k[\delta]$).

Pour la paramétrisation du défaut en fonction des variables d'entrée et de sortie du système et de leurs dérivées, le corps commutatif $k[\delta]$ est utilisé.

3.5.3 Paramétrisation différentielle du défaut

Une fois que les conclusions structurelles de détectabilité et isolabilité de défauts composants sont vérifiées et satisfaits, il est alors judicieux d'avoir une relation analytique exprimant la relation du défaut en fonction des variables d'entrées (u) et de sorties (y) du système. Cette relation est appelée *indicateur de défaut*. Dans ce paragraphe, nous présentons une procédure simple et directe d'obtention de ce dernier à partir du modèle anneau BG de diagnostic. Cela en utilisant les expressions de gains des chemins causaux et des éléments BG dans l'anneau BG.

L'expression algébrique de l'indicateur de défaut F est obtenue en identifiant tous les chemins causaux reliant les sources d'information (resp, les sources de commande) aux sources de défauts. La somme de tous leurs gains exprime l'indicateur de défaut qui est donnée par :

$$F = \sum_i T_i u + \sum_j T_j y \quad (3.44)$$

où T_i est le gain du i^{eme} chemin causal reliant la source de commande (u) à la source du défaut (F) et T_j est le gain du j^{eme} chemin causal reliant la source de l'information (y) à la source du défaut (F).

Exemple :

Pour illustrer davantage la procédure d'obtention de l'indicateur de défaut à partir du modèle anneau BG de diagnostic, nous reprenons le modèle BG de la Figure 3.17. Pour le défaut F_1 sur l'élément $I : I_1$, les chemins causaux suivants peuvent être identifiés :

$$\left\{ \begin{array}{ll} Se : u_1 \xrightarrow{e_1, e_2, e_{F_1}} DeDf : F_1 & T = -1 \\ SeSf : y_1 \xrightarrow{f_3} R : R_1 \xrightarrow{e_3, e_2, e_{F_1}} DeDf : F_1 & T = R_1 \\ SeSf : y_1 \xrightarrow{f_2, f'_2} I : I_1 \xrightarrow{e'_2, e_{F_1}} DeDf : F_1 & T = I_1\delta \\ SeDf : y_3 \xrightarrow{f_8} I : I_2 \xrightarrow{e_8, e_7, e_4, e_2, e_{F_1}} DeDf : F_1 & T = I_2\delta \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{e_9, e_7, e_4, e_2, e_{F_1}} DeDf : F_1 & T = 1 \end{array} \right. \quad (3.45)$$

La somme des gains de ces chemins donne :

$$F_1 = -u_1 + (I_1\delta + R_1)y_1 + (I_2\delta)y_3 + y_2 \quad (3.46)$$

i.e.,

$$F_1 = -u_1 + I_1\dot{y}_1 + R_1y_1 + I_2\dot{y}_3 + y_2 \quad (3.47)$$

Pour le défaut F_2 , l'ensemble des chemins causaux reliant les sources de commande (resp, d'information) aux sources de défauts est donnée par 3.48. La somme des gains de ces chemins donne l'expression algébrique du défaut F_2

$$\left\{ \begin{array}{ll} SeSf : y_2 \xrightarrow{e_{15}} C : C_3 \xrightarrow{f_{15}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{16}, e'_{16}} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -NC_3\delta I_3\delta C_2\delta \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{e_{15}} C : C_3 \xrightarrow{f_{15}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{17}} R : R_2 \xrightarrow{f_{17}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -NC_3\delta I_3\delta/R_2 \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{e_{13}} TF : 1/N \xrightarrow{e_{12}, e_{11}, e_{16}, e'_{16}} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -C_2\delta/N \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{e_{13}} TF : 1/N \xrightarrow{e_{12}, e_{11}, e_{17}} R : R_2 \xrightarrow{f_{17}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -1/R_2N \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{e_{15}} C : C_3 \xrightarrow{f_{15}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{11}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -NC_3\delta \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{w_1} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -C_2\delta \\ SeSf : y_2 \xrightarrow{w_2} R : R_2 \xrightarrow{f_{17}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -1/R_2 \\ SeDf : y_3 \xrightarrow{f_9, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{16}, e'_{16}} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = NI_3\delta C_2\delta \\ SeDf : y_3 \xrightarrow{f_8} I : I_2 \xrightarrow{w_3} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = I_2\delta C_2\delta \\ SeDf : y_3 \xrightarrow{f_8} I : I_2 \xrightarrow{w_4} R : R_2 \xrightarrow{f_{17}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = -I_2\delta/R_2 \\ SeDf : y_3 \xrightarrow{f_9, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{17}} R : R_2 \xrightarrow{f_{17}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = NI_3\delta/R_2 \\ SeDf : y_3 \xrightarrow{f_9, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{11}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = N \\ Sf : u_2 \xrightarrow{f_{14}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{16}, e'_{16}} C : C_2 \xrightarrow{f'_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = NI_3\delta C_2\delta \\ Sf : u_2 \xrightarrow{f_{14}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{10}} I : I_3 \xrightarrow{e_{10}, e_{11}, e_{17}} R : R_2 \xrightarrow{f_{17}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = NI_3\delta/R_2 \\ Sf : u_2 \xrightarrow{f_{14}, f_{13}} TF : N \xrightarrow{f_{12}, f_{11}, f_{16}, f_{F_2}} DeDf : F_2 & T = N \end{array} \right. \quad (3.48)$$

où les liens w_i , $i = 1...4$ sont données respectivement par $(e_9, e_7, e_6, e_{11}, e_{16}, e'_{16})$,

$(e_9, e_7, e_6, e_{11}, e_{17})$ $(e_8, e_7, e_6, e_{11}, e_{16}, e'_{16})$, et $(e_8, e_7, e_6, e_{11}, e_{17})$.

$$\begin{aligned}
 F_2 = & (-NC_3\delta I_3\delta C_2\delta - NC_3\delta I_3\delta/R_2 + C_2\delta/N + 1/(R_2N) + NC_3\delta + C_2\delta + 1/R_2) y_2 + \\
 & (-NI_3\delta C_2\delta - I_2\delta C_2\delta - I_2\delta/R_2 + NI_3\delta/R_2 + N) y_3 \\
 & + (-NI_3\delta C_2\delta - NI_3\delta/R_2 - N) u_2
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

i.e.,

$$\begin{aligned}
 F_2 = & -(NC_3I_3C_2)\ddot{y}_2 + (NC_3I_3/R_2)\ddot{y}_2 + (C_2/N + NC_3 + C_2)\dot{y}_2 + (1/R_2 + 1/R_2N)y_2 \\
 & -(NI_3C_2 + I_2C_2)\dot{y}_3 + (-I_2/R_2 + NI_3/R_2)y_3 + Ny_3 \\
 & -(NI_3C_2)\ddot{u}_2 + (NI_3/R_2)\dot{u}_2 - Nu_2
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Comme le montrent (3.47) et (3.50), les défauts F_1 et F_2 sont exprimés en fonction des variables d'entrées (u) et de sorties (y) du système, et de leurs dérivées respectives. Ce résultat peut être obtenu en utilisant les équations de conservation et de caractéristique du modèle BG. Cependant, il apparaît que cette procédure de paramétrisation est immédiate et plus directe.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé des conditions graphiques pour vérifier la détectabilité et l'isolabilité structurelles de défauts composants sur un modèle BG. Ces conditions sont basées sur les propriétés causales et structurelles de cet outil et la théorie du module. Grâce à ces conditions, la détectabilité et l'isolabilité structurelles de défauts sont simples et ne demandent ni la génération des relations de redondances analytiques ni la déduction de la matrice de signature de défaut. Ensuite, le problème de placement de capteurs pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défaut a été étudié et résolu en utilisant la notion de la longueur du chemin causal. Ce placement de capteur est optimal dans le sens où il permet de rendre les défauts composants considérés détectables et isolables et cela grâce aux capteurs ajoutés au système. Finalement, nous

avons abordé le problème de génération des indicateurs de défauts où nous avons proposé une procédure directe de paramétrisation des variables de défauts en fonction des entrées et sorties du système et leurs dérivées respectives. Cette procédure graphique est immédiate et moins coûteuse en terme de complexité de calcul et elle montre bien l'intérêt de l'approche BG par rapport aux approches analytiques.

Dans le chapitre suivant, nous allons mettre en oeuvre les résultats obtenus dans ce chapitre sur un système électromécanique de traction d'un quart de véhicule autonome intelligent, appelé *RobuTAINeR*.

Chapitre 4

Etude de cas : Application au véhicule autonome intelligent

Sommaire

4.1 Introduction	97
4.2 Description et modélisation du véhicule intelligent autonome RobuTAINeR	98
4.3 Analyse structurelle de la détectabilité et l'isolabilité de défauts	112
4.3.1 Modèle BG du système de la traction en présence de défauts composants.	112
4.3.2 Détection et isolabilité structurelles de défauts composants	114
4.4 Résultats de Co-simulations	119
4.4.1 Calcul de résidus	120
4.4.2 Résultats de co-simulations	123
4.5 Conclusion	129

4.1 Introduction

Ce chapitre est réservé à la validation de la méthodologie de surveillabilité développée dans ce travail de thèse sur un système de type multi-entrées/multi-sorties (MIMO),

décrivant un véhicule autonome intelligent (Intelligent Autonomous Vehicle, IAV), appelé RobuTAINeR.

Ce véhicule a été conçu dans le cadre du projet européen *InTraDE* (Intelligent Transportation for Dynamic Environment [InTraDE 2012]), et il est dans sa phase de test d'usine. Les systèmes de transport intelligent (Intelligent Transportation systems, ITS) combinent à la fois les nouvelles technologies de l'information et de la communication installées sur des véhicules et les infrastructures, ceci afin d'accroître la sécurité, la fiabilité dans le transport. Une des composantes principales des ITS sont des véhicules autonomes intelligents. Ces derniers peuvent être utilisés pour le transport du fret ou des personnes. L'objectif majeur du développement des IAVs est leur adaptation aux espaces confinés tels que les terminaux portuaires (Figure 4.1), ou sur un réseau routier privé, sans aucune intervention humaine. Par conséquent, les infrastructures routières ne sont pas adaptées à ces véhicules, mais plutôt ce sont ces derniers qui s'adaptent aux infrastructures. L'utilisation des IAVs présentent de nombreux avantages par rapport aux besoins économiques, environnementaux et sociétaux.

Dans ce chapitre, nous allons développer la procédure d'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité de défauts composants sur un système réel. Des résultats de co-simulation ont été réalisés en utilisant un simulateur professionnel de la dynamique du véhicule nommé SCANeR Studio. Ce dernier est utilisé dans la supervision du véhicule autonome intelligent d'InTraDE.

4.2 Description et modélisation du véhicule autonome RobuTAINeR

RobuTAINeR illustré par la Figure 4.2 est un IAV conçu pour transporter des conteneurs de 20 pieds à 40 pieds. Il est composé des sous-systèmes suivants : le châssis, la suspension pneumatique, quatre systèmes de traction décentralisés et quatre systèmes de direction découplés. Chaque j^{eme} quart du véhicule où $j = [1..4]$ (Figure 4.3, 4.4) est combiné d'un j^{eme} système de traction et d'un système de direction (j). L'ensemble est

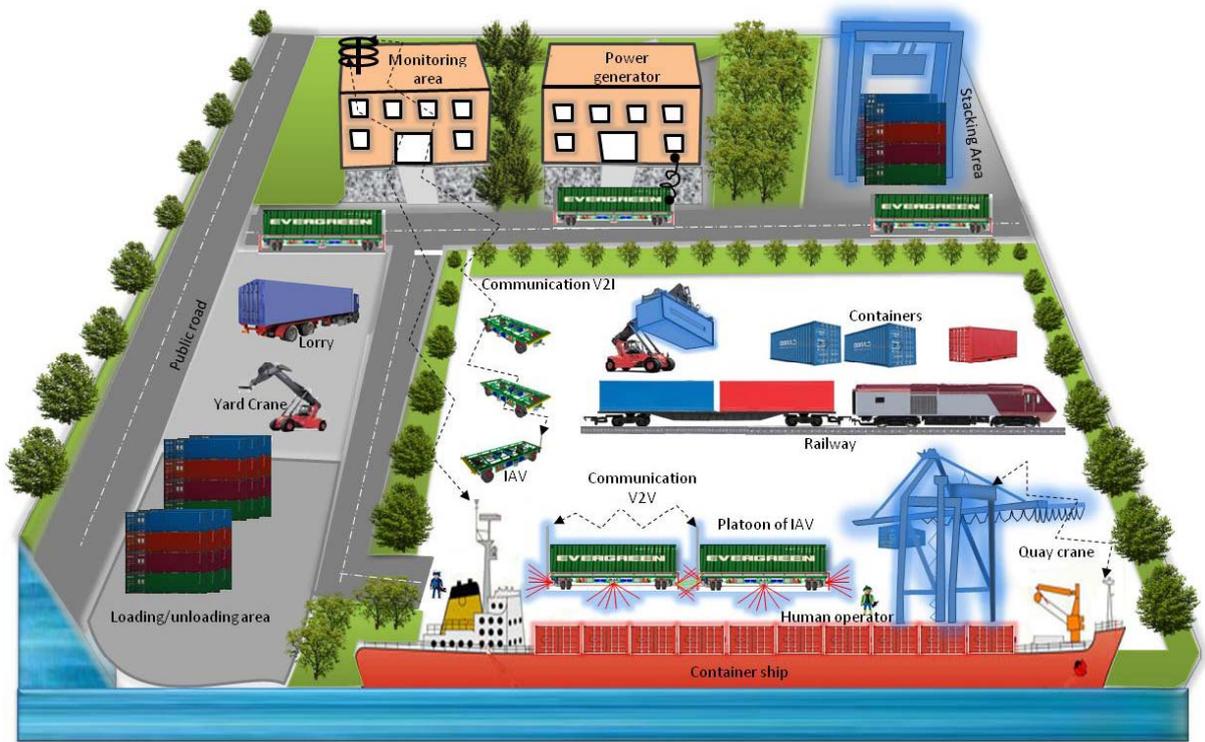
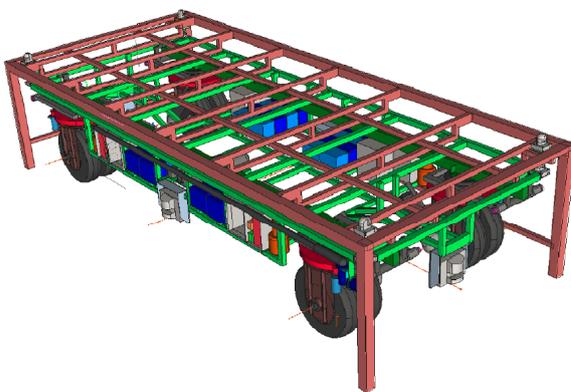


Figure 4.1 – Un terminal portuaire doté d'un système de transport intelligent.



(a)



(b)

Figure 4.2 – (a) : CAD du RobuTAINeR, (b) : Image réelle frontale du véhicule RobuTAINeR.

relié au châssis du véhicule par l'intermédiaire d'un système de suspension pneumatique. $j = 1$ et $j = 2$ sont associés aux sous-systèmes de l'avant gauche (AvG) et de l'avant droite (AvD) respectivement. $j = 3$ et $j = 4$ sont associés aux sous-systèmes de l'arrière

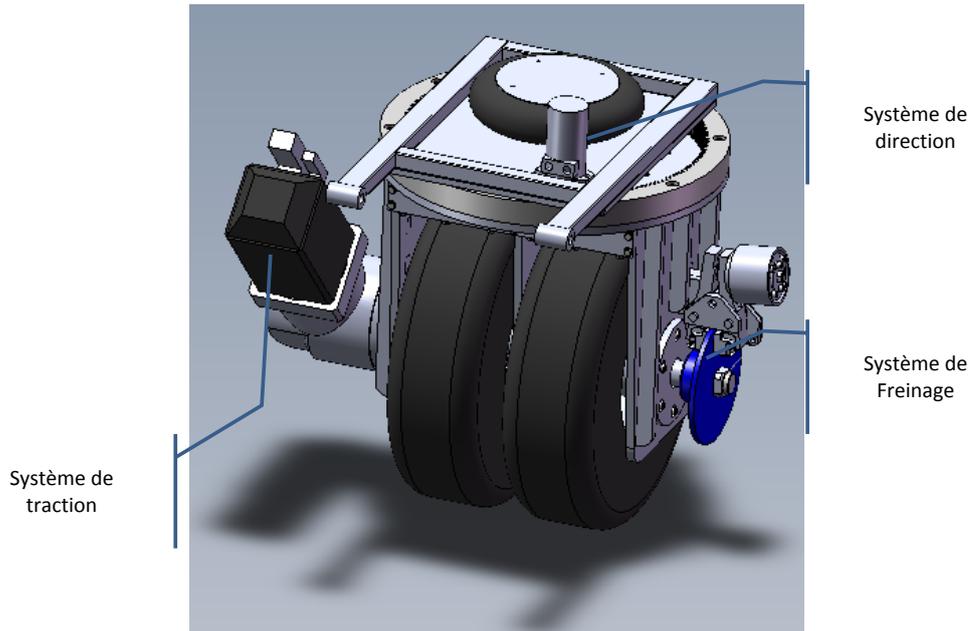


Figure 4.3 – CAD d'un quart de véhicule RobuTAINeR.

gauche (ArG) et de l'arrière droite (ArD) respectivement. Le véhicule est piloté grâce aux quatre moteurs de traction à courant continu (CC) décentralisés et orientés par quatre moteurs de direction de type électrohydraulique. Le système de freinage est exercé indépendamment sur chaque roue jumelée. Ainsi, dans ce travail, les dynamiques suivantes sont considérées :

- La dynamique du système de traction,
- la dynamique verticale du châssis,
- la dynamique longitudinale,
- la dynamique latérale,
- la dynamique du lacet.

La suspension hydraulique placée sous le châssis est utilisée principalement pour soulever les charges à partir d'une cassette (table) de la Figure 4.2. Il n'existe pas de suspension en dehors du pneumatique. Les conditions de réalisation des co-simulations dans le cadre de ce chapitre sont :

1. La pression constante sur les différents pneumatiques ;



Figure 4.4 – Image réelle d'un quart de RobuTAINeR

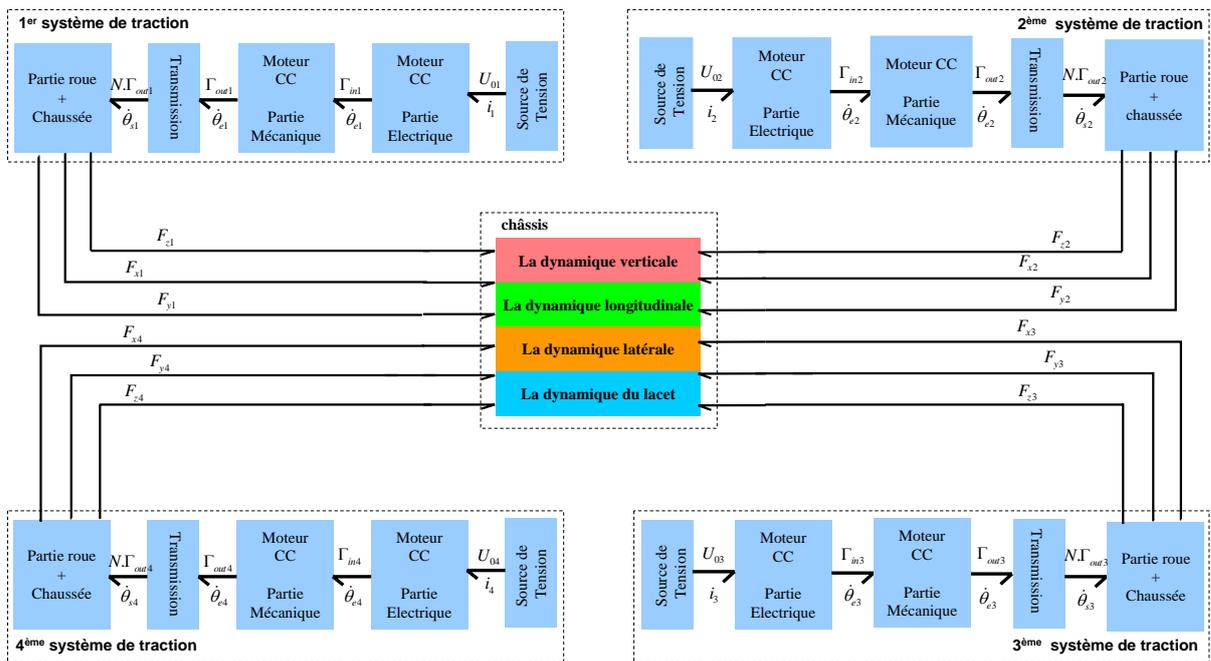


Figure 4.5 – Modèle BG à mot du RobuTAINeR.

2. L'état de la chaussée est identique et les efforts de contacts sont répartis équitablement sur les huit roues jumelées ;

3. La vitesse longitudinale maximale est de $25km.h^{-1}$, tolérée par le fonctionnement en régime établi des moteurs de traction avec une charge totale de 10 tonnes ;
4. La détection des obstacles statiques et mobiles se fait à une distance de sécurité permettant d'éviter un freinage brusque et accidentogène ;
5. L'orientation de véhicule est assurée par une différenciation de vitesse et un guidage par odométrie.

Avec ces conditions, les dynamiques du tangage, du roulis, de la direction ainsi que la suspension hydraulique pour le levage de la charge ne sont pas considérées dans cette modélisation. Pour la dynamique verticale du châssis, uniquement les forces exercées sur le châssis (F_{zj}) $j = 1..4$ sont considérées. Le modèle BG à mot du RobuTAINeR est illustré par la Figure 4.5

Le j^{eme} système de traction du quart de véhicule est décomposé en trois parties : la partie moteur à courant continu, la partie de transmission, la partie roue en interaction avec la chaussée. L'architecture technologique de ce système est représentée par le BG à mot de la Figure 4.6. Cette représentation est différente de celle du bloc diagramme, du fait que les entrées-sorties dans le modèle BG à mot sont les variables de puissance et non des variables d'informations.

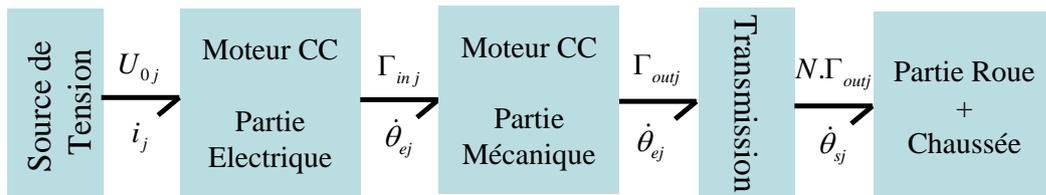


Figure 4.6 – BG à mot du j^{eme} système électromécanique de la traction.

- Le moteur est composé de deux parties distinctes : électrique et mécanique. La partie électrique correspond à un circuit RL composé d'une source d'entrée U_{0j} , une résistance électrique R_{ej} , et une inductance L_j . Elles sont représentées respectivement par les éléments Se , R , I . Quant à la partie mécanique, elle est modélisée par un élément de stockage d'énergie $I : J_{ej}$ qui représente l'inertie du rotor, un élément $R : f_{ej}$ pour représenter le phénomène du frottement visqueux, et un arbre

de transmission de rigidité K_j représenté par un élément de stockage C . Sur cette partie, le phénomène du jeu mécanique (*backlash*) est représenté par un couple perturbateur w_j et modélisé par une source d'effort modulée ($MSe : \omega_j$). Le transfert d'énergie entre les parties électrique et mécanique du moteur à CC est représenté par un gyrateur (GY) dont la constante ke_j décrit la force contre électromotrice.

- La partie de la transmission mécanique relie la partie mécanique du moteur à la charge suivant une constante de réduction N_j . Cette partie est représentée sur le modèle BG par un élément TF .
- La partie roue représente la charge en fonction de son inertie et son frottement de fixation. Elle décrit aussi l'interaction entre la roue et la chaussée. Le modèle BG de cette partie est composé donc d'un élément $I : J_{sj}$ qui représente l'inertie de la roue, un élément résistance $R : f_{sj}$ qui modélise le frottement visqueux, $MSe : N.\omega_j$ qui représente le couple perturbateur dû au jeu mécanique, et une source d'effort modulée par la force de contact longitudinale. Enfin le rayon de la roue est défini par le paramètre r_j , considéré statique dans notre analyse.

L'architecture de mesure de ce système est composée d'un capteur de courant (i_j), un capteur de position angulaire du rotor (θ_{ej}), et un capteur de position angulaire de la roue (θ_{sj}). Ce dernier n'étant pas disponible physiquement sur le système, il est déduit par une estimation suivant une relation non-linéaire avec l'axe du moteur [Merzouki 2007a]. Ces capteurs sont représentés sur le modèle BG par les éléments Df . Notons que sur un modèle BG, la position n'est pas une variable de puissance, c'est pour cela que les sources d'information utilisées $Df : \dot{\theta}_{ej}$ et $Df : \dot{\theta}_{sj}$ sont respectivement des capteurs de vitesse et non de position. Les vitesses peuvent être obtenus sous certaines conditions d'une vitesse longitudinale faible grâce à un observateur non-linéaire décrit dans [Merzouki 2007a]. Ainsi, le modèle BG du système de traction est illustré par Figure 4.7.

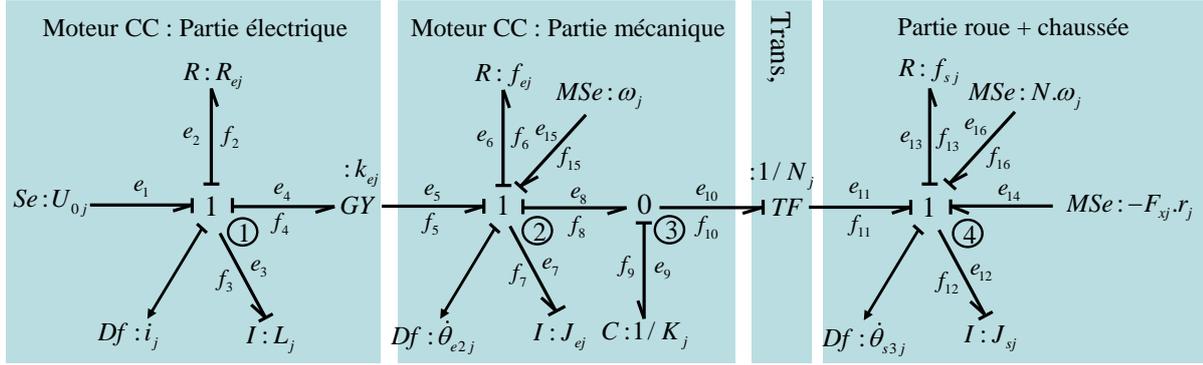


Figure 4.7 – Modèle BG du j^{eme} système électromécanique de la traction en causalité intégrale.

A partir du modèle BG de la Figure 4.7, un modèle analytique sous la forme d'une représentation d'état peut être déduit comme suit :

Contraintes de structure C_S

Jonction - 1 $\textcircled{1}$:

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = i_j,$$

$$e_1 - e_2 - e_3 - e_4 = 0. \quad (4.1)$$

Jonction - 1 $\textcircled{2}$:

$$f_5 = f_6 = f_7 = f_8 = \dot{\theta}_{ej},$$

$$e_5 - e_6 - e_7 - e_8 + e_{15} = 0. \quad (4.2)$$

Jonction - 0 $\textcircled{3}$:

$$e_8 = e_9 = e_{10},$$

$$f_8 - f_9 - f_{10} = 0. \quad (4.3)$$

Jonction – 1④ :

$$\begin{aligned} f_{11} &= f_{12} = f_{13} = f_{14} = \dot{\theta}_{sj}, \\ e_{11} - e_{12} - e_{13} + e_{14} + e_{16} &= 0. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Gyrateur GY : k_e

$$\begin{aligned} e_5 &= k_{ej} f_4, \\ e_4 &= k_{ej} f_5. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Transformateur TF : $1/N_j$

$$\begin{aligned} f_{10} &= N_j f_{11}, \\ e_{11} &= N_j e_{10}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Les équations de comportements C_B

$$I : L_j \quad f_3 = \frac{1}{L_j} \int e_3 dt, \quad (4.7)$$

$$I : J_{ej} \quad f_7 = \frac{1}{J_{ej}} \int e_7 dt, \quad (4.8)$$

$$C : K_j \quad e_9 = K_j \int f_9 dt, \quad (4.9)$$

$$I : J_{sj} \quad f_{12} = \frac{1}{J_{sj}} \int e_{12} dt. \quad (4.10)$$

$$R : R_{ej} \quad e_2 = R_{ej} f_2, \quad (4.11)$$

$$R : f_{ej} \quad e_6 = f_{ej} f_6, \quad (4.12)$$

$$R : f_{sj} \quad e_{13} = f_{sj} f_{13}, \quad (4.13)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} p_{L_j} &= \int e_3 dt, & p_{J_{ej}} &= \int e_7 dt, \\ q_{K_j} &= \int f_9 dt, & p_{J_{sj}} &= \int e_{12} dt. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Les équations d'état suivantes sont obtenues :

$$\dot{p}_{L_j} = e_3 = -\frac{R_{ej}}{L_j}p_{L_j} - \frac{k_{ej}}{J_{ej}}p_{J_{ej}} + U_{0j}, \quad (4.15)$$

$$\dot{p}_{J_{ej}} = e_7 = \frac{k_{ej}}{L_j}p_{L_j} - \frac{f_{ej}}{J_{ej}}p_{J_e} - K_j q_{K_j} + \omega_j, \quad (4.16)$$

$$\dot{q}_{K_j} = f_9 = \frac{1}{J_{ej}}p_{J_{ej}} - \frac{N}{J_s}p_{J_s}, \quad (4.17)$$

$$\dot{p}_{J_{sj}} = e_{12} = N_j K_j q_{K_j} - \frac{f_{sj}}{J_{sj}}p_{J_{sj}} + N \cdot \omega_j - F_{xj} \cdot r_j. \quad (4.18)$$

Cette dernière peut être représentée par (4.19) :

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{p}_{L_j} \\ \dot{p}_{J_{ej}} \\ \dot{q}_{K_j} \\ \dot{p}_{J_{sj}} \end{bmatrix}}_{\dot{X}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_{ej}}{L_j} & -\frac{k_{ej}}{J_{ej}} & 0 & 0 \\ \frac{k_{ej}}{L_j} & -\frac{f_{ej}}{J_{ej}} & -K_j & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_{ej}} & 0 & -\frac{N_j}{J_{sj}} \\ 0 & 0 & N_j K_j & -\frac{f_{sj}}{J_{sj}} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} p_{L_j} \\ p_{J_{ej}} \\ q_{K_j} \\ p_{J_{sj}} \end{bmatrix}}_X + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & -1 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} U_{0j} \\ \omega_j \\ F_{xj} \cdot r_j \end{bmatrix}}_U, \\ \underbrace{\begin{bmatrix} i \\ \dot{\theta}_e \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix}}_Y &= \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_j} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_{ej}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_{sj}} \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} p_{L_j} \\ p_{J_{ej}} \\ q_{K_j} \\ p_{J_{sj}} \end{bmatrix}}_X. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Notons que le nombre de variables d'état est égal au nombre d'éléments de stockage (I, C) en causalité intégrale. De la Figure 4.7, on peut déduire qu'il existe quatre variables d'état. Ainsi, cette représentation est donnée par (4.19) où p_{L_j} , $p_{J_{ej}}$, p_{K_j} et $p_{J_{sj}}$ sont des variables d'énergie associées aux éléments de stockage L_j , J_{ej} , K_j et J_{sj} respectivement.

Les quatre autres dynamiques considérées du véhicule RobuTAINeR sont combinées à celle de la traction pour donner le modèle globale de la Figure 4.9. Ce dernier considère les dynamiques verticale, longitudinale, latérale et lacet où les paramètres a , b représentent

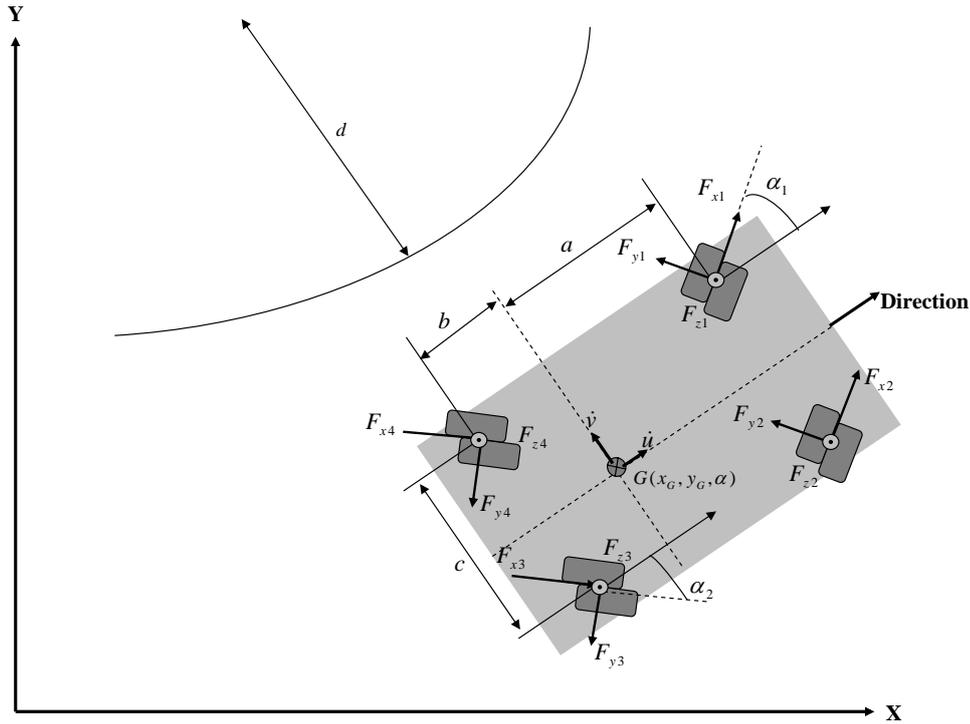


Figure 4.8 – Projections des efforts sur le véhicule.

respectivement la distance entre le centre de gravité du véhicule et l'axe des roues avant et arrière. c est la distance entre les roues gauche et droite par rapport à l'axe longitudinale.

Les forces F_{xj} et F_{yj} représentent les forces de contacts longitudinale et latérale respectivement exercées sur les roues du véhicule lors de l'interaction avec la chaussée. F_{yj} est calculée en fonction de la force centrifuge donnée dans [Michelin 2001] comme suit :

$$F_{yj} = m \frac{(r\dot{\theta}_{sj})^2}{d} \quad (4.20)$$

où d est le rayon de la trajectoire (Figure 4.8) et m est la masse du véhicule. Quant à la force de contact longitudinale F_{xj} , elle est en fonction de la vitesse longitudinale du véhicule (\dot{u}) et la vitesse angulaire de la roue $\dot{\theta}_{sj}$, et est donnée en utilisant la courbe canonique d'estimation (4.21) à partir du modèle non-linéaire [Michelin 2001] de la façon suivante :

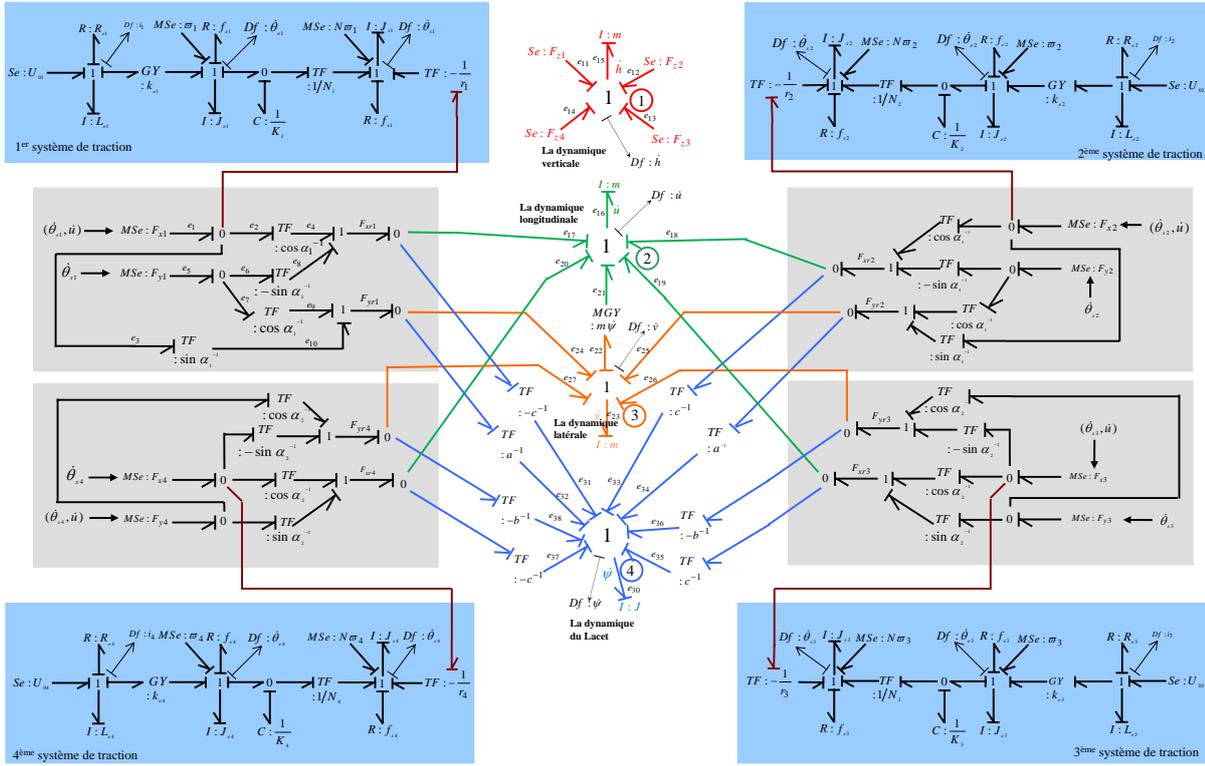


Figure 4.9 – Modèle BG du véhicule autonome intelligent RobuTAINeR.

$$F_{xj} = [\delta_0 - \delta_1 e^{-\beta|(\dot{u} - r\dot{\theta}_{sj})|} - \delta_2(\dot{u} - r\dot{\theta}_{sj})].sign(\dot{u} - r\dot{\theta}_{sj}), \quad (4.21)$$

Où δ_0 et δ_1 sont les forces de frottement de coulomb et de stiction respectivement $[N]$. Lorsque la vitesse de glissement $\dot{u} - r\dot{\theta}_s$ est faible, les phénomènes de frottement de stiction et visqueux peuvent être faibles par rapport au frottement statique (coulomb). Dans ce cas, l'équation (4.21) est simplifiée à l'équation du frottement de coulomb [Merzouki 2007b] et est donnée par :

$$F_{xj} = \delta_0.sign(\dot{u} - r_j\dot{\theta}_{sj}). \quad (4.22)$$

A partir du modèle BG complet du véhicule, les expressions mathématiques qui décrivent les différentes dynamiques du système peuvent être déduites comme suit :

Les forces F_{xrj} et F_{yrj} :

Afin d'expliquer comment les forces F_{xrj} et F_{yrj} sont obtenues, nous considérons le cas de la force F_{xr1} . Cette dernière est donnée à partir du modèle BG de la Figure 4.9 par :

$$F_{xr1} = e_4 + e_8 \quad (4.23)$$

Les efforts e_4 et e_8 sont calculés en suivant les liens de puissances. Elles sont données par

$$\begin{cases} e_4 = \cos(\alpha_1)F_{x1} \\ e_8 = -\sin(\alpha_1)F_{y1} \end{cases} \quad (4.24)$$

où α_1 est l'angle d'orientation de la roue par rapport à son axe longitudinale (Figure 4.8). Donc F_{xr1} est égale à :

$$F_{xr1} = \cos(\alpha_1)F_{x1} - \sin(\alpha_1)F_{y1} \quad (4.25)$$

Les autres forces F_{xrj} et F_{yrj} sont obtenues de la même manière et elles sont calculées en suivant les liens de puissances dans le modèle BG du RobuTAINeR (Figure 4.9).

La dynamique verticale du châssis

A partir de la jonction 1_① du modèle BG de la Figure 4.9, on a :

$$\begin{aligned} \sum e &= e_{11} + e_{12} + e_{13} + e_{14} + e_{15} = 0 \\ f_{11} &= f_{12} = f_{13} = f_{14} = f_{15} = \dot{h} \end{aligned} \quad (4.26)$$

tel que :

$$e_{11} = F_{z1}, e_{12} = F_{z2}, e_{13} = F_{z3}, e_{14} = F_{z4}, e_{15} = m \frac{d}{dt} f_{15} \quad (4.27)$$

Donc, l'équation 4.26 devient :

$$F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} - m \frac{d}{dt} \dot{h} = 0 \quad (4.28)$$

Ainsi, le modèle mathématique de la dynamique verticale \dot{h} est donnée par :

$$\ddot{h} = \frac{1}{m} (F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}) \quad (4.29)$$

La dynamique longitudinale

A partir de la jonction 1^② du modèle BG de la Figure 4.9, on a :

$$\begin{aligned} \sum e &= -e_{16} + e_{17} + e_{18} + e_{19} + e_{20} + e_{21} = 0 \\ f_{16} &= f_{17} = f_{18} = f_{19} = f_{20} = f_{21} = \dot{u} \end{aligned} \quad (4.30)$$

tel que :

$$e_{16} = m \frac{d}{dt} f_{16}, e_{17} = F_{xr1}, e_{18} = F_{xr2}, e_{19} = F_{xr3}, e_{20} = F_{xr4}, e_{21} = m\dot{\psi}\dot{v} \quad (4.31)$$

Dans ce cas, l'équation 4.30 devient :

$$-m \frac{d}{dt} \dot{u} + F_{xr1} + F_{xr2} + F_{xr3} + F_{xr4} + m\dot{\psi}\dot{v} = 0 \quad (4.32)$$

Donc, le modèle mathématique de la dynamique longitudinale \dot{u} est donnée par :

$$m\ddot{u} = F_{xr1} + F_{xr2} + F_{xr3} + F_{xr4} + m\dot{\psi}\dot{v} \quad (4.33)$$

La dynamique Latérale

A partir de la jonction 1^③ du modèle BG de la Figure 4.9, on a :

$$\begin{aligned} \sum e &= -e_{22} - e_{23} + e_{24} + e_{25} + e_{26} + e_{27} = 0 \\ f_{22} &= f_{23} = f_{24} = f_{25} = f_{26} = f_{27} = \dot{v} \end{aligned} \quad (4.34)$$

tel que :

$$e_{22} = m\dot{\psi}\dot{u}, e_{23} = m \frac{d}{dt} f_{23}, e_{24} = F_{yr1}, e_{25} = F_{yr2}, e_{26} = F_{yr3}, e_{27} = F_{yr4} \quad (4.35)$$

Dans ce cas, l'équation 4.34 devient :

$$-m\dot{\psi}\dot{v} - m\frac{d}{dt}\dot{v} + F_{yr1} + F_{yr2} + F_{yr3} + F_{yr4} = 0 \quad (4.36)$$

L'expression mathématique de la dynamique Latérale \dot{v} est donnée par :

$$m\ddot{v} = F_{yr1} + F_{yr2} + F_{yr3} + F_{yr4} - m\dot{\psi}\dot{v} \quad (4.37)$$

La dynamique du Lacet

L'expression mathématique de la dynamique du lacet $\dot{\psi}$ est obtenue à partir de la jonction 1④ du modèle BG de la Figure 4.9. Elle est donnée par :

$$\begin{aligned} \sum e &= -e_{30} + e_{31} + e_{32} + e_{33} + e_{34} + e_{35} + e_{36} + e_{37} + e_{38} = 0 \\ f_{30} &= f_{31} = f_{32} = f_{33} = f_{34} = f_{35} = f_{36} = f_{37} = f_{38} = \dot{\psi} \end{aligned} \quad (4.38)$$

tel que :

$$\begin{aligned} e_{30} &= J\frac{d}{dt}f_{30}, e_{31} = -cF_{xr1}, e_{32} = aF_{yr1}, e_{33} = cF_{xr2}, e_{34} = aF_{yr2}, \\ e_{35} &= cF_{xr3}, e_{36} = -bF_{yr3}, e_{37} = -cF_{xr4}, e_{38} = -bF_{yr4} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Ainsi, la dynamique du lacet est donnée par :

$$J\ddot{\psi} = (-F_{xr1} + F_{xr2} + F_{xr3} - F_{xr4})c + (F_{yr1} + F_{yr2})a - (F_{yr3} + F_{yr4})b \quad (4.40)$$

Nous notons que les informations sur les dynamiques verticale, longitudinale, latérale, et lacet sont acquises à partir d'une centrale inertielle installée au centre de gravité du RobuTAINeR (x_g, y_g). Cette dernière retourne les accélérations longitudinale, latérale et verticale ainsi que l'angle du lacet.

4.3 Analyse structurelle de la détectabilité et l'isolabilité de défauts

Etant donnée la taille du modèle BG du système avec les dynamiques considérées, nous allons nous contenter de présenter la procédure de l'analyse structurelle de la détectabilité et de l'isolabilité de défauts composants sur le j^{eme} système de traction du RobuTAINeR de la Figure 4.7. Cette procédure peut être généralisée sur l'ensemble du système.

Remarque 4.1 : *Le modèle BG de la Figure 4.7 est non-linéaire dû à la présence de la force de contact extérieure F_{xj} et le couple perturbateur du jeu mécanique ω_j . Ces derniers sont représentés par des sources modulées décrites comme des entrées connues du système. Cependant, la structure globale du système reste linéaire par rapport aux états, et par conséquent l'analyse structurelle développée dans le cadre de ce travail reste applicable aux défauts composants sur cette forme de système non-linéaire.*

Sur le j^{eme} système de la traction, nous considérons un défaut multiplicatif qui affecte les composants suivants :

- Un défaut sur la résistance électrique $R : Re_j$ de la partie électrique du moteur CC ;
- Un défaut sur le frottement visqueux $R : f_{ej}$ de la partie mécanique du moteur CC ;
- Un défaut sur l'arbre de transmission ($C : 1/K_j$) qui décrit un changement de la raideur de l'axe suite à un blocage sur la transmission.

La première étape pour vérifier la détectabilité et l'isolabilité structurelles de ces défauts est de concevoir un modèle BG global représentatif de ces derniers.

4.3.1 Modèle BG du système de la traction en présence de défauts composants.

L'effet des défauts composants sur les éléments $R : R_{ej}$, $R : f_{ej}$ et $C : 1/K_j$ sont représentés par des sources modulées comme suit :

- Sources d'efforts modulées ($MSe : F_1, MSe : F_2$) pour les défauts composants sur les éléments $R : R_{ej}$ et $R : f_{ej}$ respectivement.
- Source de flux modulée $MSf : F_3$ pour le défaut composant sur l'élément $C : 1/K$.

En se référant au chapitre 2, le j^{eme} système électromécanique de la traction en présence de ces défauts est décrit par le modèle BG de la Figure 4.10.

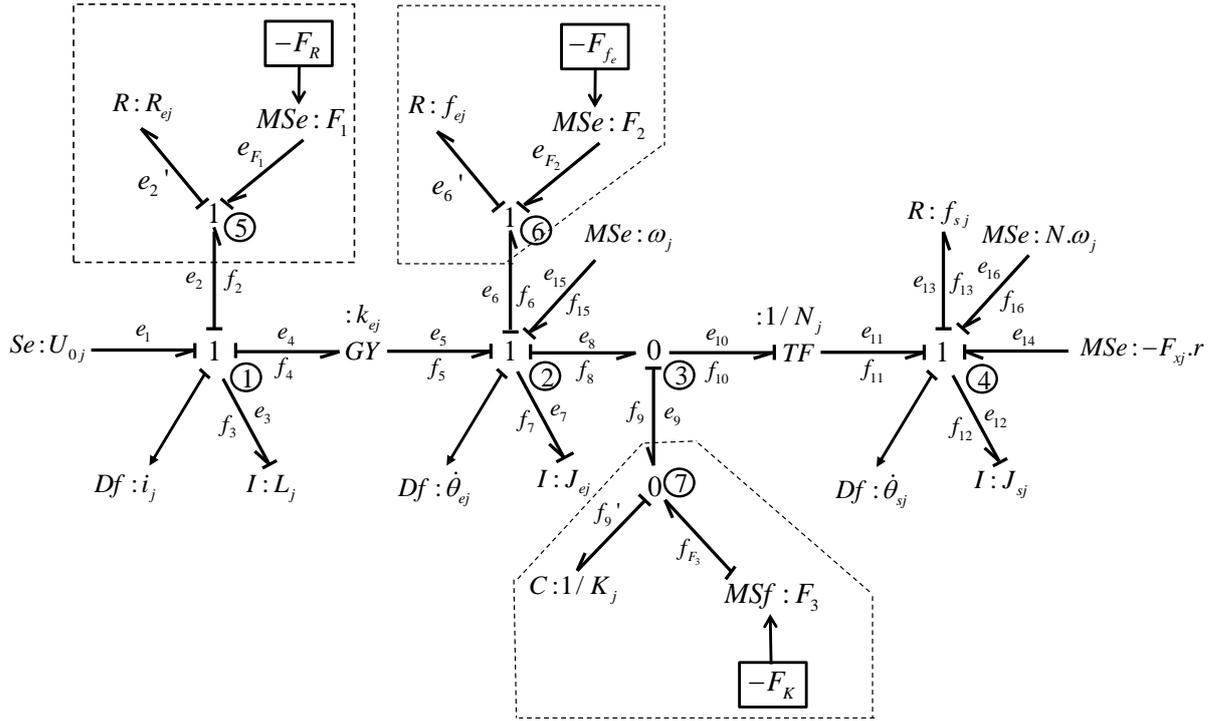


Figure 4.10 – Modèle BG en causalité intégrale du système électromécanique en présence de défauts composants.

A partir du modèle BG de la Figure 4.10, un modèle analytique sous forme d'équations d'état peut être déduit. Ce dernier est donné par :

$$\begin{cases} \dot{p}_{Lj} = -\frac{R_{ej}}{L_j} p_{Lj} - \frac{k_{ej}}{J_{ej}} p_{J_{ej}} + U_{0j} + F_1 \\ \dot{p}_{J_{ej}} = \frac{k_{ej}}{L_j} p_{Lj} - \frac{f_{ej}}{J_{ej}} p_{J_{ej}} - K_j q_{K_j} + F_2 + \omega_j \\ \dot{q}_{K_j} = \frac{1}{J_{ej}} p_{J_{ej}} - \frac{N_j}{J_{sj}} + F_3 \\ \dot{p}_{J_{sj}} = N_j K_j q_{K_j} - \frac{f_{sj}}{J_{sj}} p_{J_{sj}} - F_{xj}.r + N\omega_j \end{cases} \quad (4.41)$$

Le but est de vérifier la détectabilité et l'isolabilité structurelles des défauts F_i où $i = 1..3$.

4.3.2 Détection et isolabilité structurelles de défauts composants

Afin de vérifier la détectabilité et l'isolabilité structurelles des défauts F_i , $i = 1..3$, sur les composants $R : R_{ej}$, $R : f_{ej}$ et $C : 1/K_j$, la procédure présentée dans le chapitre 3.3.1 est appliquée sur le modèle BG de la Figure 4.10. Pour cela, il faut identifier l'ensemble Φ des chemins causaux défauts-détecteurs à partir du modèle BG de la Figure 4.10. Ce dernier est donné par (4.42) où l est la longueur du chemin causal.

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 MSe : F_1 \xrightarrow{e_{F_1}, e_2, e_3} I : L_j \xrightarrow{f_3} Df : i_1 & l = 1 \\
 MSe : F_1 \xrightarrow{e_{F_1}, e_2, e_3} I : L_j \xrightarrow{f_3, f_4} GY : k_{ej} \xrightarrow{e_5, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7} Df : \dot{\theta}_{ej} & l = 2 \\
 MSe : F_1 \xrightarrow{e_{F_1}, e_2, e_3} I : L_j \xrightarrow{f_3, f_4} GY : k_{ej} \xrightarrow{e_5, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7, f_8, f_9, f'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{e'_9, e_9, e_{10}} TF : 1/N_j \xrightarrow{e_{11}, e_{12}} I : J_{sj} \xrightarrow{f_{12}} Df : \dot{\theta}_{sj} & l = 4 \\
 MSe : F_2 \xrightarrow{e_{F_2}, e_6, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7} Df : \dot{\theta}_{ej} & l = 1 \\
 MSe : F_2 \xrightarrow{e_{F_2}, e_6, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7, f_5} GY : k_e \xrightarrow{e_4, e_3} I : L_j \xrightarrow{f_3} Df : y_1 & l = 2 \\
 MSe : F_2 \xrightarrow{e_{F_2}, e_6, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7, f_8, f_9, f'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{e'_9, e_9, e_{10}} TF : 1/N_j \xrightarrow{e_{11}, e_{12}} I : J_{sj} \xrightarrow{f_{12}} Df : \dot{\theta}_{sj} & l = 3 \\
 MSf : F_3 \xrightarrow{f_{F_3}, f'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{e'_9, e_9, e_8, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7, f_5} GY : k_{ej} \xrightarrow{e_4, e_3} I : L_j \xrightarrow{f_3} Df : y_1 & l = 3 \\
 MSf : F_3 \xrightarrow{f_{F_3}, f'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{e'_9, e_9, e_8, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7} Df : \dot{\theta}_{ej} & l = 2 \\
 MSf : F_3 \xrightarrow{f_{F_3}, f'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{e'_9, e_9, e_8, e_{10}} TF : 1/N_j \xrightarrow{e_{11}, e_{12}} I : J_{sj} \xrightarrow{f_{12}} Df : \dot{\theta}_{sj} & l = 2
 \end{array} \right. \quad (4.42)$$

A partir de l'ensemble Φ , on détermine l'ensemble Φ_1 des chemins causaux défauts-détecteurs disjoints. Ce dernier est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 MSe : F_1 \xrightarrow{e_{F_1}, e_2, e_3} I : L_j \xrightarrow{f_3} Df : i_j & l = 1 \\
 MSe : F_2 \xrightarrow{e_{F_2}, e_6, e_7} I : J_{ej} \xrightarrow{f_7} Df : \dot{\theta}_{ej} & l = 1 \\
 MSf : F_3 \xrightarrow{f_{F_3}, f'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{e'_9, e_9, e_8, e_{10}} TF : 1/N_j \xrightarrow{e_{11}, e_{12}} I : J_{sj} \xrightarrow{f_{12}} Df : \dot{\theta}_{sj} & l = 2
 \end{array} \right. \quad (4.43)$$

Par conséquent, la procédure d'obtention du modèle anneau BG de diagnostic peut s'appliquer sur l'ensemble Φ_1 . Pour cela, les détecteurs Df sont remplacés par les éléments $SeSf$ et les sources modulées associées aux défauts sont remplacées par les éléments $DeDf$. Le modèle anneau BG de diagnostic résultant est illustré par la Figure 4.11. A partir de ce modèle, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1. Tous les éléments de stockage I, C acceptent la causalité dérivée ce qui conduit à conclure que les défauts sont observables par rapport aux variables d'entrée et de sortie du système, c'est à dire, ils sont détectables ;

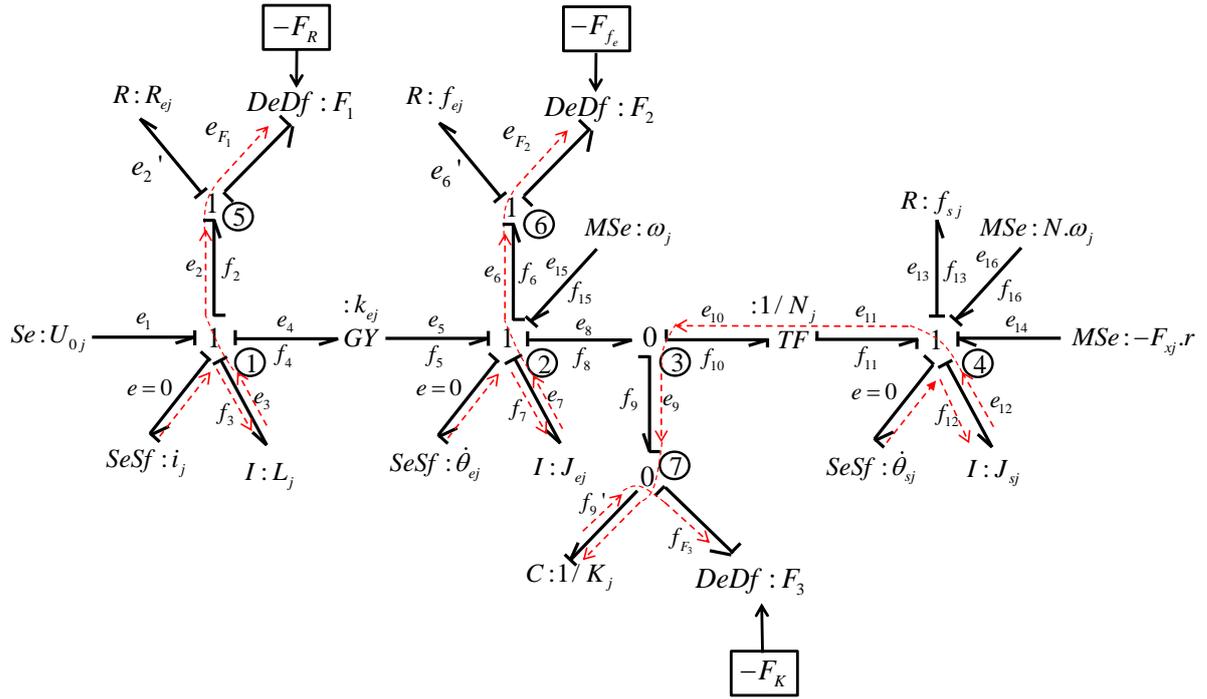


Figure 4.11 – Modèle anneau BG de diagnostic pour l'analyse structurelle de détectabilité et isolabilité de défauts composants.

2. Il existe trois chemins causaux disjoints détecteurs - défauts (4.44). Donc, les défauts composants sur les éléments R_{ej} , f_{ej} et K_j sont structurellement isolables.

$$\left\{ \begin{array}{l} SeSf : i_j \xrightarrow{f_3} I : L_j \xrightarrow{e_3, e_2, e_{F_1}} DeDf : F_1 \\ SeSf : \dot{\theta}_{ej} \xrightarrow{f_3} I : J_{ej} \xrightarrow{e_3, e_2, e_{F_2}} DeDf : F_2 \\ SeSf : \dot{\theta}_{sj} \xrightarrow{f_{12}} I : J_{sj} \xrightarrow{e_{12}, e_{11}} TF : 1/N_j \xrightarrow{e_{10}, e_9, e'_9} C : 1/K_j \xrightarrow{f'_9, f_{F_3}} DeDf : F_2 \end{array} \right. \quad (4.44)$$

Par conséquent, les théorèmes 3.3 et 3.4 sont vérifiés, donc les défauts F_1 , F_2 et F_3 sont structurellement détectables et isolables. Ainsi :

- Ils sont exprimés en fonction des variables d'entrée et de sortie ainsi que leurs dérivées respectives

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \xi_1 \left(U_0, \dots, i_j, \dot{\theta}_{ej}, \dot{i}_j, \dots \right) \\
 F_2 &= \xi_2 \left(F_{xj}, \omega_j, \dots, i_j, \dot{\theta}_{ej}, \dot{\theta}_{sj}, \ddot{\theta}_{ej}, \dots \right) \\
 F_3 &= \xi_3 \left(\dot{F}_{xj}, \dot{\omega}_j, \dots, \dot{\theta}_{ej}, \ddot{\theta}_{sj}, \dots \right)
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

– Il existe un système d'espace de parité tel que :

$$M \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = Q \begin{pmatrix} U_0 \\ \omega_j \\ -F_{xj}.r \end{pmatrix} + S \begin{pmatrix} i_1 \\ \dot{\theta}_{ej} \\ \dot{\theta}_{sj} \end{pmatrix} \tag{4.46}$$

où $M \in k[\delta]^{3 \times 3}$, $Q \in k[\delta]^{3 \times 3}$, $S \in k[\delta]^{3 \times 3}$, $\det M \neq 0$.

Pour obtenir les expressions algébriques des défauts considérés (4.47), la procédure proposée en 3.5 est appliquée. Pour cela, il suffit d'identifier tous les chemins causaux liant les sorties (resp, les entrées) aux défauts et de calculer les différents gains défaut-sorties (T_h) (resp, défaut-entrées (T_g))

$$F = \sum_g T_g u + \sum_h T_h y \tag{4.47}$$

Par exemple pour le défaut F_1 , les chemins causaux suivants sont identifiés :

$$\left\{ \begin{array}{ll}
 SeSf : i_j \rightarrow R : R_{ej} \rightarrow DeDf : F_1 & T_1 = R_{ej} \\
 SeSf : i_j \rightarrow I : L_j \rightarrow DeDf : F_1 & T_2 = L_j \delta \\
 SeSf : \dot{\theta}_{ej} \rightarrow GY : k_{ej} \rightarrow DeDf : F_1 & T_3 = k_{ej} \\
 Se : U_0 \rightarrow DeDf : F_1 & T_4 = -1
 \end{array} \right. \tag{4.48}$$

le résultat de la somme des gains T_i ($i = 1 \dots 4$) exprime l'équation algébrique du défaut, et elle est donnée par :

$$F_1 = (L_j \delta + R_{ej}) i_j + k_{ej} \dot{\theta}_{ej} - U_{0j} \tag{4.49}$$

i.e.,

$$F_1 = \left(L_j \frac{d}{dt} i_j + R_{ej} i_j \right) + k_{ej} \dot{\theta}_{ej} - U_{0j} \quad (4.50)$$

Pour le défaut F_2 , les chemins causaux suivants sont déterminés :

$$\left\{ \begin{array}{ll} SeSf : i_j \rightarrow GY : k_{ej} \rightarrow DeDf : F_2 & T_1 = -k_{ej} \\ SeSf : \dot{\theta}_{ej} \rightarrow I : J_{ej} \rightarrow DeDf : F_2 & T_2 = J_{ej} \delta \\ SeSf : \dot{\theta}_{ej} \rightarrow I : f_{ej} \rightarrow DeDf : F_2 & T_3 = f_{ej} \\ SeSf : y_3 \rightarrow I : J_{sj} \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow DeDf : F_2 & T_4 = J_{sj} \delta / N_j \\ SeSf : y_3 \rightarrow I : f_{sj} \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow DeDf : F_2 & T_5 = f_{sj} \delta / N_j \\ MSe : \omega_j \rightarrow DeDf : F_2 & T_6 = -1 \\ MSe : N_j \cdot \omega_j \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow DeDf : F_2 & T_7 = -1/N_j \\ MSe : -F_{xj} \cdot r \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow DeDf : F_2 & T_8 = -1/N_j \end{array} \right. \quad (4.51)$$

L'équation algébrique du défaut F_2 est donnée par :

$$F_2 = -k_{ej} i_j + (J_{ej} \delta + f_{ej}) \dot{\theta}_{ej} + \left(\frac{J_{sj} \delta}{N_j} + \frac{f_{sj}}{N_j} \right) \dot{\theta}_{ej} + \frac{F_{xj} \cdot r}{N_j} - 2\omega_j \quad (4.52)$$

i.e.,

$$F_2 = -k_{ej} i_j + \left(J_{ej} \frac{d}{dt} \dot{\theta}_{ej} + f_{ej} \dot{\theta}_{ej} \right) + \frac{1}{N_j} \left(J_{sj} \frac{d}{dt} \dot{\theta}_{ej} + f_{sj} \dot{\theta}_{ej} \right) + \frac{F_{xj} \cdot r}{N_j} - 2\omega_j \quad (4.53)$$

L'ensemble de chemins causaux pour le défaut F_3 suivant sont identifiés :

$$\left\{ \begin{array}{ll} SeSf : \dot{\theta}_{ej} \rightarrow DeDf : F_3 & T_1 = -1 \\ SeSf : \dot{\theta}_{sj} \rightarrow I : J_{sj} \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow C : 1/K_j \rightarrow DeDf : F_3 & T_2 = \frac{1}{N_j} \frac{1}{K_j} \delta J_{sj} \delta \\ SeSf : \dot{\theta}_{sj} \rightarrow R : f_{sj} \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow C : 1/K_j \rightarrow DeDf : F_3 & T_3 = \frac{1}{N_j} \frac{1}{K_j} \delta f_{sj} \\ SeSf : \dot{\theta}_{sj} \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow DeDf : F_3 & T_4 = N_j \\ MSe : N_j \cdot \omega_j \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow C : 1/K_j \rightarrow DeDf : F_3 & T_5 = -\frac{1}{N_j} \frac{1}{K_j} \delta \\ MSe : -F_{x.r} \rightarrow TF : 1/N_j \rightarrow C : 1/K_j \rightarrow DeDf : F_3 & T_6 = -\frac{1}{N_j} \frac{1}{K_j} \delta \end{array} \right. \quad (4.54)$$

Et l'équation algébrique du F_3 est donnée par

$$F_3 = -\dot{\theta}_{ej} + \frac{1}{N_j} \left(\frac{1}{K_j} \delta \right) (J_{sj} \delta + f_{sj}) \dot{\theta}_{sj} + N_j \dot{\theta}_{sj} + \frac{1}{N_j} \left(\frac{1}{K_j} \delta \right) F_{xj.r} - \frac{1}{K_j} \delta \omega_j \quad (4.55)$$

i.e.,

$$F_3 = -\dot{\theta}_{ej} + \frac{1}{N_j K_j} \left(J_{sj} \frac{d^2}{dt^2} \dot{\theta}_{sj} + f_{sj} \frac{d}{dt} \dot{\theta}_{sj} + N_j^2 K_j \dot{\theta}_{sj} \right) + \frac{1}{N_j K_j} \frac{d}{dt} F_{xj.r} - \frac{1}{K_j} \frac{d}{dt} \omega_j \quad (4.56)$$

A partir des équations (4.49), (4.52) et (4.55) le système de parité (4.46) est :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{N_j} & -2 \\ 0 & \frac{1}{N_j K_j} \delta & -\frac{1}{K_j} \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_0 \\ F_{xj.r} \\ \omega_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_j \delta + R_{ej} & k_{ej} & 0 \\ -k_{ej} & J_{ej} \delta + f_{ej} & \frac{J_{sj} \delta + f_{sj}}{N_j} \\ 0 & -1 & \frac{1}{N_j K_j} (J_{sj} \delta^2 + f_{sj} \delta + N_j^2 K_j) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_j \\ \dot{\theta}_{ej} \\ \dot{\theta}_{sj} \end{pmatrix} \quad (4.57)$$

Dans cette partie, nous avons vérifié la détectabilité et l'isolabilité structurelles des défauts sur les composants $R : R_{ej}$, $R : f_{ej}$ et $C : 1/K_j$ en utilisant les propriétés causales et structurelles de l'outil BG combinés à la notion de la bicausalité. Ainsi, les indicateurs des défauts ont été générés directement à partir du BG. Ces derniers satisfont les conditions de la détectabilité et l'isolabilité algébriques. Dans la section suivante, des résultats de co-simulations sont présentés afin de valider cette analyse structurelle.

4.4 Résultats de Co-simulations

De l'analyse structurelle de la détectabilité et l'isolabilité de défauts composants sur le système électromécanique de la traction, nous présentons des résultats de co-simulations. Ces derniers sont obtenus en utilisant un logiciel de simulation professionnel du comportement dynamique du véhicule et du trafic *SCANeR Studio* [OKTAL 2012]. Ce simulateur de la dynamique du véhicule et du trafic est une plateforme d'expérimentation dédiée pour la recherche et le développement. Dans ce qui suit les résultats de co-simulations sont réalisés à l'aide de deux environnements de simulations. En effet, un échange de données est réalisé entre un programme développé sous *Matlab / Simulink* et le simulateur *SCANeR studio*. Pour les résultats montrés ci-dessous, la dynamique globale du RobuTAINeR est fournie par le simulateur *SCANeR studio* après avoir identifié les paramètres statiques du véhicule par le constructeur. Le modèle de traction est modélisé analytiquement sous *Matlab/Simulink* après avoir adapté son modèle BG sur cet environnement. Ceci peut se faire grâce à la génération d'une fonction à partir du logiciel de conception intégrée *Symbols 2000* [Ould-Bouamama 2005], tandis que la dynamique du véhicule est reproduite directement sur le logiciel *SCANeR Studio*. Le schéma global de la co-simulation ainsi que les valeurs numériques des différents paramètres du système électromécanique sont données par la Figure 4.12 et la Table 4.1 respectivement.

R_{ej}	1.5	(Ω)
L_j	0.022	(H)
k_{ej}	2.37	($N.m.A^{-1}$)
J_{ej}	0.00177	($Kg.m^2$)
f_{ej}	0.3068	($N.m.s.rad^{-1}$)
J_{sj}	2	($Kg.m^2$)
f_{sj}	0.2	($N.m.s.rad^{-1}$)
K_j	10^4	($N.m.rad^{-1}$)
N_j	10	-
r	0.36	(m)

TABLE 4.1 – Spécifications du j^{eme} système de traction

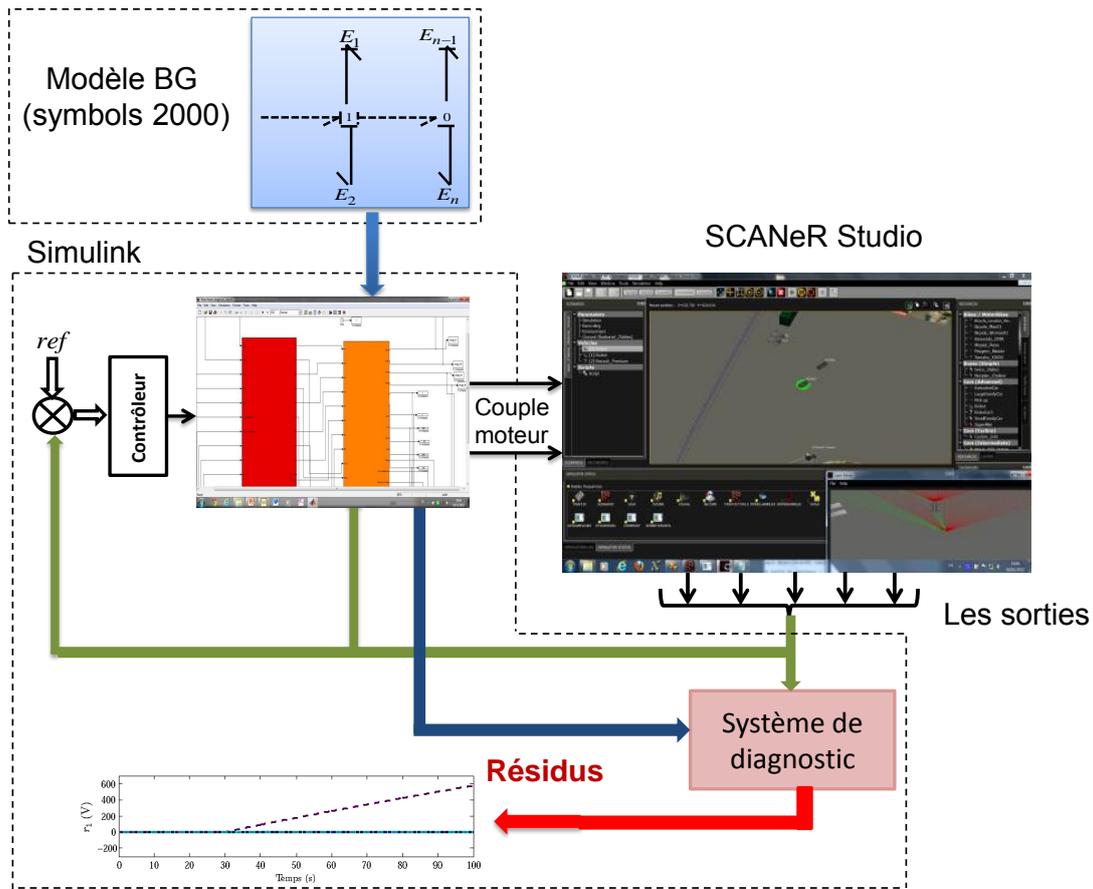


Figure 4.12 – Schéma de co-simulation : Simulink /SCANeR studio.

4.4.1 Calcul de résidus

L'évaluation des indicateurs de défaut F est basée sur la construction des résidus $\hat{r} \in k(s) \left[\frac{d}{ds} \right]$ de la forme (4.58). Ces résidus sont obtenus en fonction des relations algébriques dépendantes d'intégrales des signaux mesurés et de commande [Fliess 2004, Barbot 2007]. Ces dernières produisent un effet de filtrage intéressant dans le cas où les signaux sont bruités.

$$\hat{r} = s^{-n} \frac{d}{ds^n} \hat{F} \quad (4.58)$$

Le signe $\hat{}$ signifie que la variable est exprimée dans le domaine de Laplace. En présence des perturbations structurées (π), le problème de générations de résidus sensibles aux défauts indépendamment des perturbations revient à chercher un annulateur différentiel

$\sigma \in k(s) \left[\frac{d}{ds} \right]$ et $\sigma \neq 0$ tel que :

$$\sigma.\pi = 0 \tag{4.59}$$

Par la suite, nous ferons l'hypothèse que la perturbation du jeu mécanique ω_j est constante mais avec une amplitude inconnue, et qu'elle s'annule par une dérivation d'indicateur de défaut \hat{F} par rapport à s . Dans ce cas, la procédure d'obtention des résidus est comme suit :

1. Mettre les indicateurs de défauts F dans le domaine de Laplace,
2. Dériver le résultat n fois par rapport à s afin d'éliminer les conditions initiales qui peuvent être inconnues et les perturbations,
3. Multiplier par s^{-n} de chaque côté et revenir au domaine temporel.

La dérivation par rapport à s d'ordre n ($\frac{d^n}{ds^n}$) dans le domaine de Laplace se traduit par une multiplication par $(-1)^n t^n$ dans le domaine temporel, et la multiplication par s^{-n} correspond à la l'intégration d'ordre n dans le domaine temporel.

Remarque 4.2 : s^{-n} sont des filtres passe-bas, et sont utilisés pour éviter la différenciation temporelle.

Les résidus r_i , $i = 1..3$ pour les indicateurs de défauts F_i donnés respectivement par (4.50), (4.53) et (4.56) sont obtenus en dérivant une fois (resp, deux fois) les indicateurs de défauts \hat{F}_1 et \hat{F}_2 (resp, \hat{F}_3) et en multipliant les deux parties de l'équation par s^{-1} pour \hat{F}_1 et \hat{F}_2 et s^{-2} pour \hat{F}_3 . Donc les résidus r_1 , r_2 et r_3 sont donnés dans le domaine de Laplace par :

$$\begin{aligned} \hat{r}_1 &= s^{-1} \frac{d}{ds} \hat{F}_1 \\ \hat{r}_2 &= s^{-1} \frac{d}{ds} \hat{F}_2 \\ \hat{r}_3 &= s^{-2} \frac{d^2}{ds^2} \hat{F}_3 \end{aligned} \tag{4.60}$$

Par conséquent, les résidus sont obtenus comme suit :

1. Les indicateurs de défauts sont donnés dans le domaine de Laplace par :

$$\begin{cases} \hat{F}_1 = L_j \hat{s} i_j + R_{ej} \hat{i}_j - i_j(0) + k_{ej} \hat{\theta}_{ej} - \hat{U}_{0j} \\ \hat{F}_2 = -k_{ej} \hat{i}_j + J_{ej} \hat{s} \hat{\theta}_{ej} + f_{ej} \hat{\theta}_{ej} - \hat{\theta}_{ej}(0) + \frac{J_{sj}}{N_j} \hat{s} \hat{\theta}_{sj} + f_{sj} \hat{\theta}_{sj} - \hat{\theta}_{sj}(0) + \frac{\hat{F}_{xj.r}}{N_j} - 2\hat{\omega}_j \\ \hat{F}_3 = -\hat{\theta}_{ej} + \frac{J_{sj}}{N_j K_j} s^2 \hat{\theta}_{sj} + \frac{f_{sj}}{N_j K_j} \hat{s} \hat{\theta}_{sj} + N_j \hat{\theta}_{sj} - \hat{\theta}_{sj}(0) - \hat{\theta}_{sj}(0) + \frac{1}{N_j K_j} s \hat{F}_{xj.r} - F_{xj.r}(0) - \frac{1}{K_j} s \hat{\omega}_j + \omega_j(0) \end{cases} \quad (4.61)$$

où : $i_j(0)$, $\hat{\theta}_{ej}(0)$, $\hat{\theta}_{sj}(0)$, $\hat{\theta}_{sj}(0)$, $\omega_j(0)$ et $F_{xj}(0)$ sont les conditions initiales.

2. Afin d'éliminer les conditions initiales et la perturbation ω_j , \hat{F}_1 et \hat{F}_2 sont dérivés une fois et \hat{F}_3 est dérivé deux fois. Le résultat de la dérivation est :

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \hat{F}_1 = s \left(L_j \frac{d}{ds} \hat{i}_j \right) + \left(L_j \hat{i}_j + R_{ej} \frac{d}{ds} \hat{i}_j + k_{ej} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{ej} - \frac{d}{ds} \hat{U}_0 \right) \\ \frac{d}{ds} \hat{F}_2 = s \left(J_{ej} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{ej} + \frac{J_{sj}}{N_j} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{sj} \right) + \left(-k_{ej} \frac{d}{ds} \hat{i}_j + J_{ej} \hat{\theta}_{ej} + f_{ej} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{ej} \right. \\ \quad \left. + \frac{J_{sj}}{N_j} \hat{\theta}_{sj} + \frac{f_{sj}}{N_j} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{sj} + \frac{1}{N_j} \frac{d}{ds} \hat{F}_{xj.r} \right) \\ \frac{d^2}{ds^2} \hat{F}_3 = s^2 \frac{J_{sj}}{N_j K_j} \frac{d^2}{ds^2} \hat{\theta}_{sj} + s \left(\frac{4J_{sj}}{N_j K_j} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{sj} + \frac{f_{sj}}{N_j K_j} \frac{d^2}{ds^2} \hat{\theta}_{sj} + \frac{1}{N_j K_j} \frac{d^2}{ds^2} \hat{F}_{xj.r} \right) \\ \quad + \left(-\frac{d^2}{ds^2} \hat{\theta}_{ej} + \frac{2J_{sj}}{N_j K_j} \hat{\theta}_{ej} + \frac{2f_{sj}}{N_j K_j} \frac{d}{ds} \hat{\theta}_{sj} + N_j \frac{d^2}{ds^2} \hat{\theta}_{sj} + \frac{2}{N_j K_j} \frac{d}{ds} \hat{F}_{xj.r} \right) \end{cases} \quad (4.62)$$

3. Après avoir multiplié les deux côtés de 4.62 par s^{-n} , et être revenu dans le domaine temporel, les résidus obtenus sont :

$$\begin{cases} r_1 = -L_j t i_j + \int_0^t \left(L_j i_j - R_{ej} \lambda i_j - k_{ej} \lambda \dot{\theta}_{ej} + \lambda U_{0j} \right) d\lambda \\ r_2 = -J_{ej} t \dot{\theta}_{sj} - \frac{J_{sj}}{N_j} t \dot{\theta}_{sj} + \\ \quad + \int_0^t \left(-k_{ej} \lambda i_j + J_{ej} \dot{\theta}_{ej} - f_{ej} \lambda \dot{\theta}_{ej} + \frac{J_{sj}}{N_j} \dot{\theta}_{sj} - \frac{f_{sj}}{N_j} \lambda \dot{\theta}_{sj} - \frac{1}{N_j} \lambda F_{xj.r} \right) d\lambda \\ r_3 = \frac{J_{sj}}{N_j K_j} t^2 \dot{\theta}_{sj} + \int_0^t \left(-\frac{4J_{sj}}{N_j K_j} \lambda \dot{\theta}_{sj} + \frac{f_{sj}}{N_j K_j} \lambda^2 \dot{\theta}_{sj} + \frac{1}{N_j K_j} \lambda^2 F_{xj.r} \right) d\lambda \\ \quad + \int_0^t \int_0^\alpha \left(-\alpha \dot{\theta}_{ej} + \frac{2J_{sj}}{N_j K_j} \dot{\theta}_{ej} - \frac{2f_{sj}}{N_j K_j} \alpha \dot{\theta}_{sj} + N_j \alpha^2 \dot{\theta}_{sj} - \frac{2}{N_j K_j} \alpha F_{xj.r} \right) d\lambda d\alpha \end{cases} \quad (4.63)$$

4.4.2 Résultats de co-simulations

Pour les résultats de co-simulations, deux scénarios de défauts sont considérés :

1. Un défaut unique sur chaque élément surveillé : un défaut affectant l'élément R_{ej} à l'instant $t = 30s$, un défaut sur l'élément f_{ej} en $t = 55s$, et finalement un défaut sur l'axe de transmission ($C : 1/K_j$) à l'instant $t = 72$.
2. Deux défauts multiples affectant les éléments f_{ej} et K_j à l'instant $t = 40s$ et $t = 65s$ respectivement.

Le choix de ces deux scénarios de défauts est motivé pour démontrer que chaque résidu est sensible uniquement au défaut pour lequel il est généré et par ailleurs, que les défauts multiples peuvent être détectés et isolés.

Scénario 1 :

Les résultats d'évaluation des résidus en fonctionnement nominal ainsi qu'en présence des défauts considérés pour le scénario 1 sont illustrés dans la Figure 4.13 quant aux signaux d'entrées - sorties du système, ils sont représentés par les Figures 4.14 et 4.15.

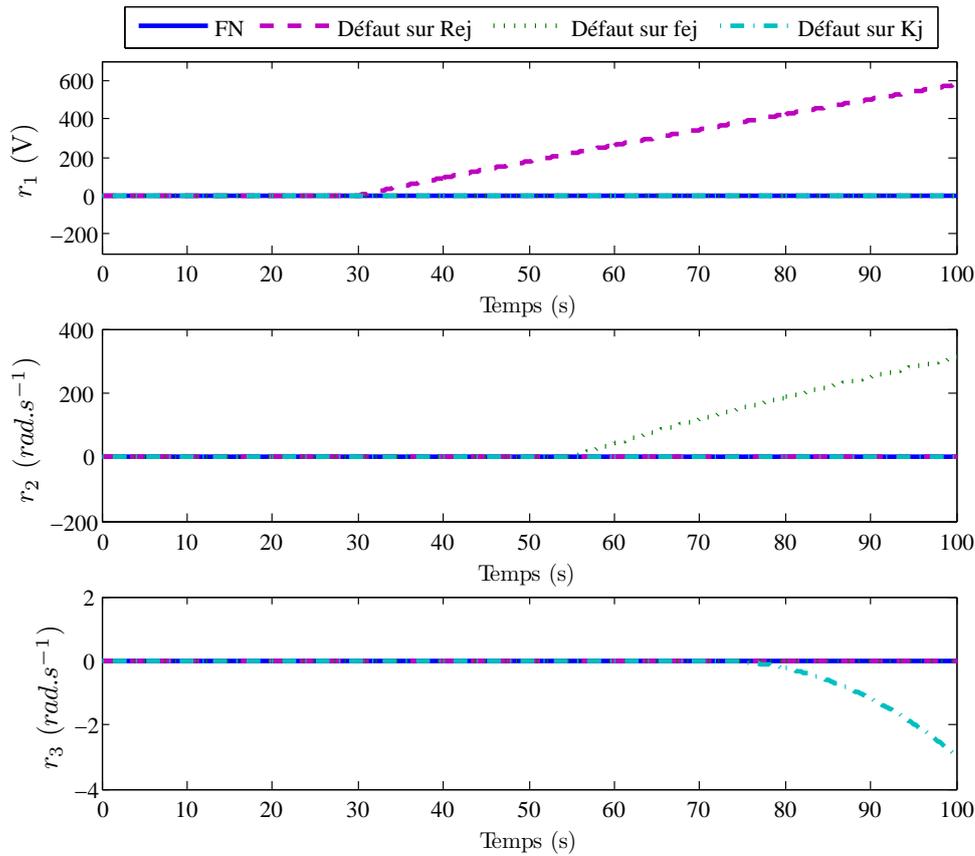


Figure 4.13 – Résidus en fonctionnement nominal (FN) et en situation de défauts

- En fonctionnement normal, les différents résidus générés r_1 , r_2 et r_3 sont presque à zéro comme il est illustré par la Figure 4.13. En examinant les signaux d'entrées et de sorties du système lors de l'apparition d'un défaut multiplicatif sur l'élément R_{ej} à $t = 30s$, nous constatons que l'influence de ce dernier sur la vitesse angulaire de la roue est minimal (une baisse de $0,1 rad.s^{-1}$). Cela est due à l'action du correcteur PI présent dans la boucle de commande du système de traction qui compense l'effet du défaut par l'ajout d'une tension supplémentaire au système. Concernant les résidus, uniquement le résidu r_1 est sensible au défaut sur R_{ej} , les autres sont à zéros lors de son apparition.
- Un défaut affectant l'élément $R : f_{ej}$ entraîne une baisse considérable de la vitesse angulaire de la roue de $0,8 rad.s^{-1}$. Dans ce cas, le correcteur PI fournit plus de

tension au système et cela engendre une compensation de l'effet du défaut sur la vitesse de la roue. En présence de ce défaut, Il y a un glissement instantané de la roue dû à la différence entre la vitesse de la roue et la vitesse globale du véhicule. Grâce au correcteur PI , la vitesse de la roue converge vers la vitesse désirée et donc entraîne une baisse de la vitesse de glissement. Sur la Figure 4.13, uniquement le résidu généré pour la détection du défaut sur l'élément $R : f_{ej}$ est sensible à son apparition.

- Le défaut considéré sur l'élément $C : 1/K_j$ entraîne un changement de rigidité de l'axe de transmission ce qui cause la perte de transmission entre la partie mécanique du moteur CC et la roue. Dans ce cas, on constate une baisse minimale de la vitesse de la roue ($0,2 \text{ rad.s}^{-1}$). La vitesse de la roue converge rapidement vers la vitesse globale du véhicule. C'est la raison pour laquelle le correcteur PI ne fournit pas une tension supplémentaire afin de compenser le défaut. Ce défaut est détecté dès son apparition par le résidu r_3 et isolé car les autres résidus (r_1 et r_2) ne sont pas sensibles à ce défaut.

A partir de ce scénario de défauts, on a illustré que les différents résidus générés r_1 , r_2 et r_3 sont uniquement sensibles aux défauts pour lesquels ils ont été conçus. Par conséquent, la détection et l'isolation des défauts composants considérés est claire et ce résultat montre la validité de la conclusion de la détectabilité et l'isolabilité structurelles des défauts considérés.

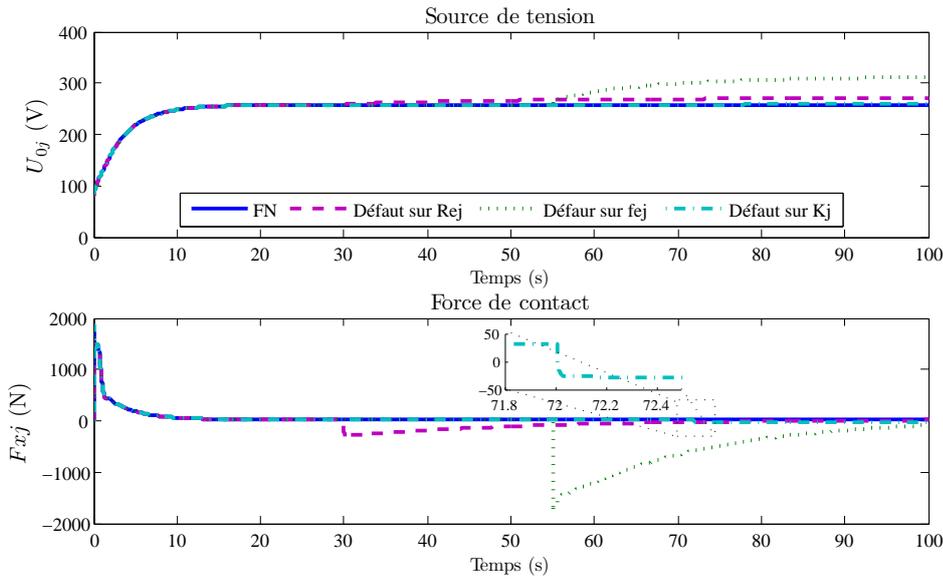


Figure 4.14 – Les entrées en fonctionnement nominal et en situation de défauts

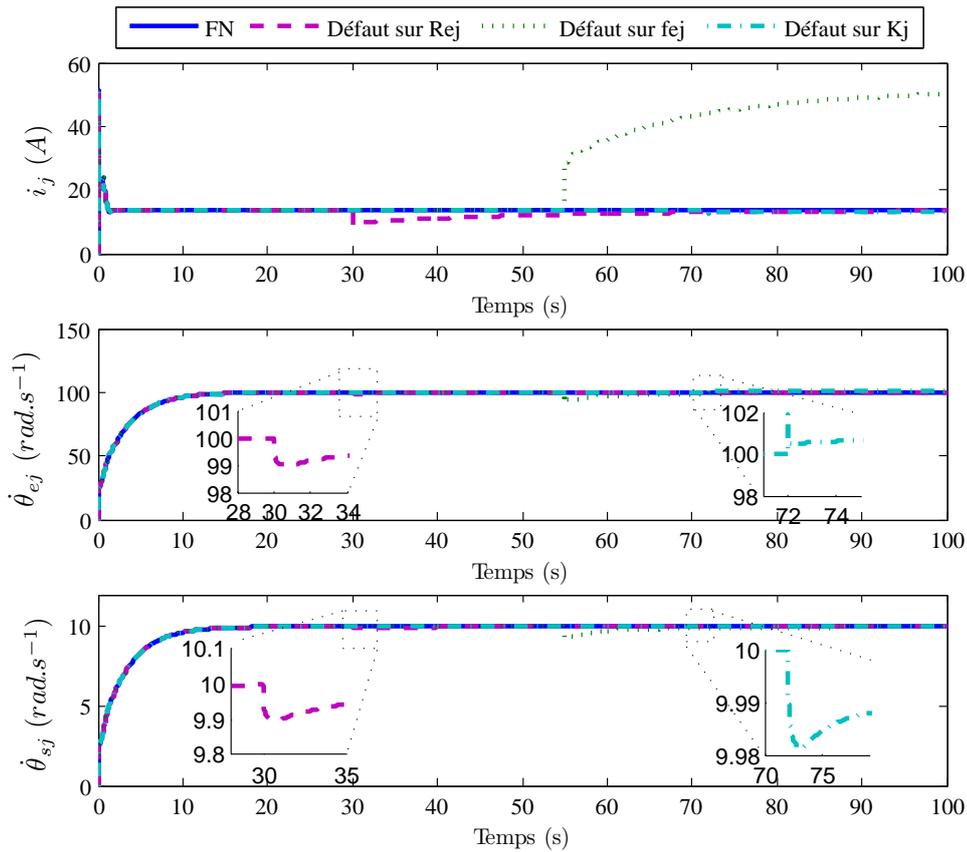


Figure 4.15 – Les sorties du système en fonctionnement nominal (FN) et en situation de défauts

Scénario 2

Pour le deuxième scénario, deux défauts multiples sur le système électromécanique sont considérés : un défaut affectant l'élément $R : f_{ej}$ en $t = 40s$ ensuite un autre défaut affectant l'élément $C : 1/K_j$ à $t = 65s$. Dans ce cas, les résultats d'évaluation des résidus en fonctionnement nominal ainsi en présence de défauts sont illustrés par la Figure 4.16 quant aux signaux d'entrées - sorties du système, ils sont représentés respectivement par les Figures 4.17 et 4.18.

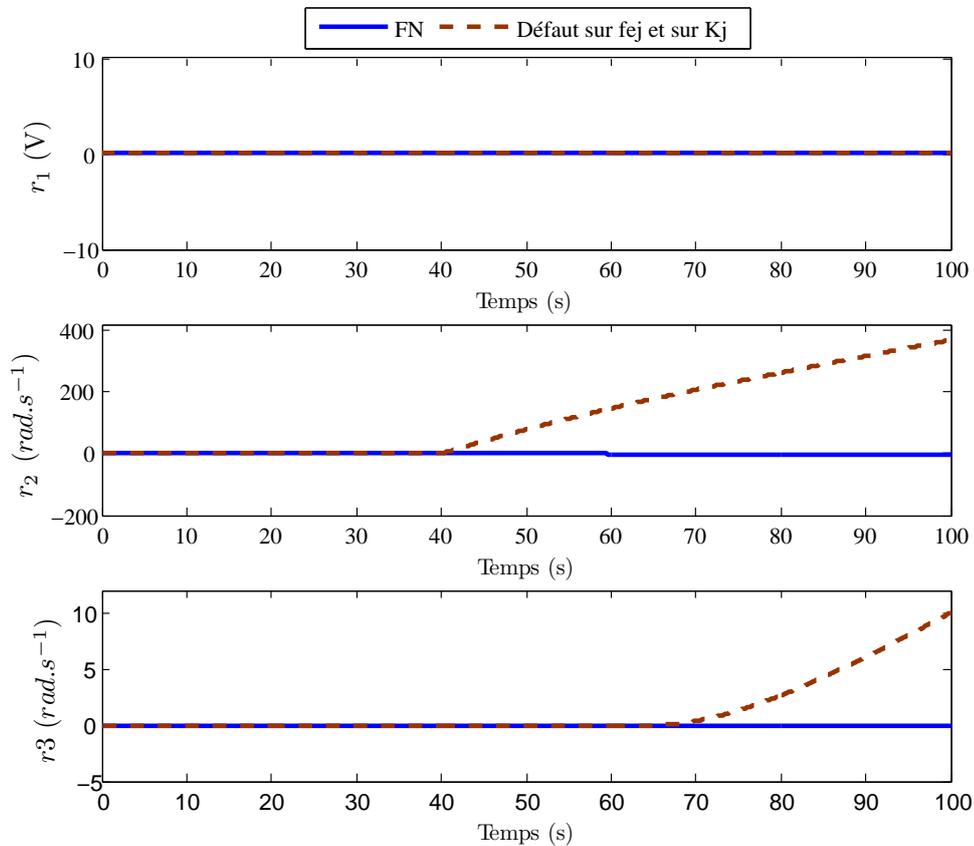


Figure 4.16 – Résidus en fonctionnement nominal (FN) et en situation de défauts multiple

En fonctionnement normal, les résidus r_i $i = 1..3$ sont presque à zéros. Quand un défaut affecte l'élément f_{ej} , seul le résidu r_2 est alors sensible. Les résidus r_1 et r_3 sont à zéros. A $t = 65s$, un autre défaut affecte l'élément C . Dans ce cas, ce défaut est détecté par le résidu r_3 . En présence de deux défauts le résidu r_1 est toujours à zéros.

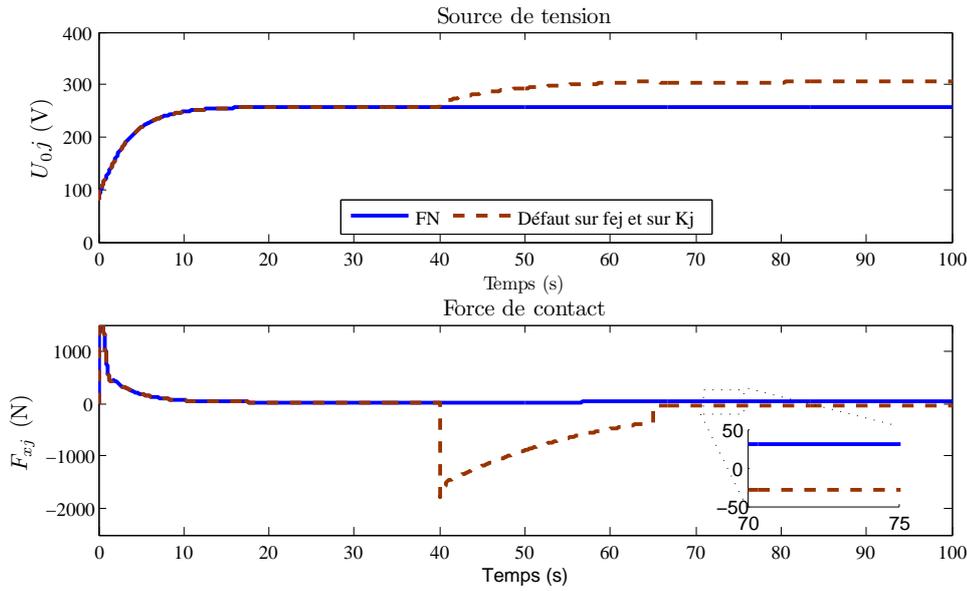


Figure 4.17 – Les entrées en fonctionnement nominal et en situation de défauts multiples

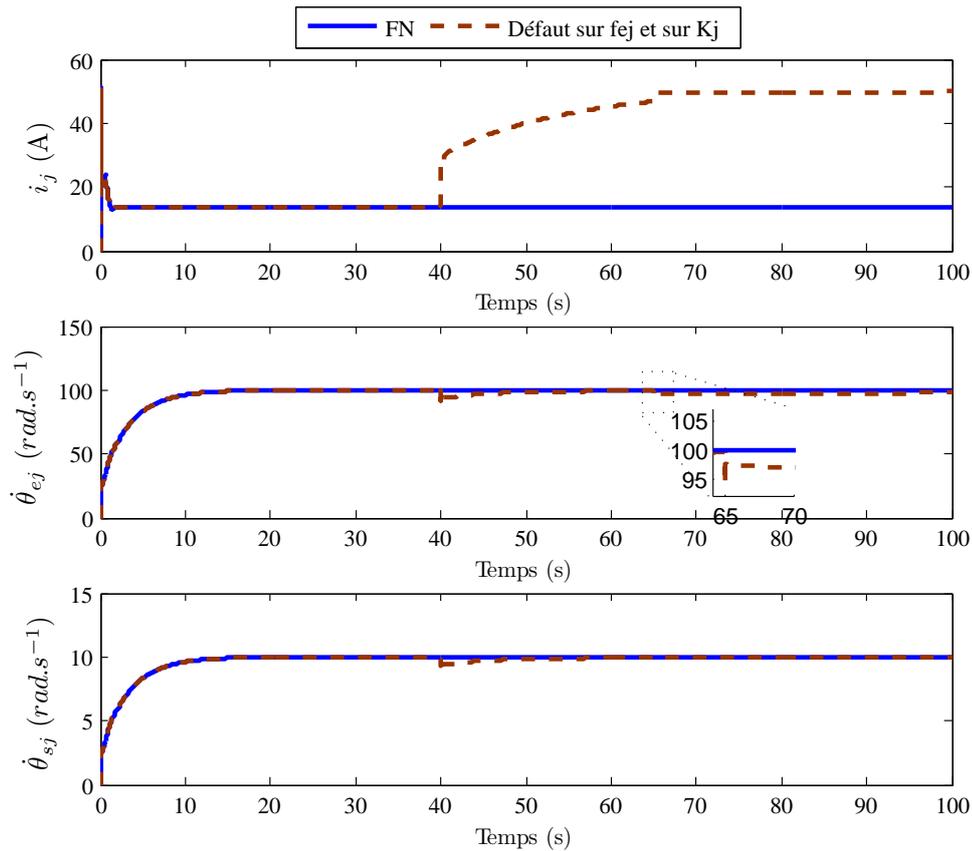


Figure 4.18 – Les sorties du système en fonctionnement nominal et en situation de défauts multiples

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie d'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité structurelles sur un système de traction d'un quart de véhicule autonome intelligent, RobuTAINeR. Ces résultats ont été validés par la suite par des co-simulations en utilisant un simulateur de véhicule, appelé SCANeR studio. Ces derniers ont montré le principe de cette méthodologie ainsi que les conditions d'implémentation dans le cas de défauts composants.

Conclusions et Perspectives

Dans cette thèse, nous nous sommes penchés sur le problème de détection et isolation structurelle de défauts composants sur un modèle BG. En combinant la théorie du module, et les propriétés causales et structurelles de l'outil BG, de simples conditions graphiques ont été proposées pour la vérification de la détectabilité et de l'isolabilité de défauts composants. Ensuite, nous nous sommes intéressés au cas de système en présence de défaut non observable. Pour cela, nous avons proposé un placement de capteur optimal pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence du défaut. A la fin, nous avons présenté une procédure systématique pour la génération des indicateurs de défauts pour les défauts composants considérés.

Synthèse

Dans un premiers temps nous nous sommes intéressés à modéliser l'effet d'un défaut composant sur un modèle BG. Cela nous a mené à considérer qu'un défaut composant peut être considéré comme étant une entrée inconnue au système. Cette modélisation nous a permis d'étendre les définitions de la détectabilité et de l'isolabilité algébriques sur un modèle BG. En effet, grâce à la notion de la bicausalité et les propriétés causales (la causalité des éléments de stockages) et structurelles (le chemin causal) du BG, de simples conditions graphiques ont été élaborées, ces dernières nous permettent de conclure sur la détectabilité et l'isolabilité structurelles de défauts composants directement sur un modèle BG. Ensuite, un placement de capteurs optimal est considéré. En effet, la non surveillabilité du système en présence du défaut est associée au sous-modèle BG correspondant au module des zéros invariants. En exploitant la définition de la longueur d'un chemin causal,

et la notion des chemins causaux disjoints, une stratégie de placement de capteur a été présentée. Ce placement est optimal dans le sens qu'il permet un recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts avec un nombre minimal de capteurs.

La deuxième étape après les conclusions sur la détectabilité et l'isolabilité structurelle de défauts, est sa surveillance, pour cela il est nécessaire de générer des indicateurs de défaut sensibles aux défauts considérés. A cet égard, une procédure systématique à base de règle de Mason a été proposée. Cette procédure permet l'obtention des relations algébriques des indicateurs de défaut de manière immédiate et directe à partir du modèle anneau BG de diagnostic.

Enfin, l'approche proposée dans ce travail de thèse a été validée par une application sur le système électromécanique du quart de véhicule intelligent autonome, appelé Robu-TAINeR. Des résultats de co-simulations ont été présentés afin d'appuyer les conclusions structurelles obtenues.

Ce travail a permis d'enrichir les travaux déjà existant au LAGIS, pour l'analyse structurelle et la surveillance des systèmes physiques modélisés par BG, et de confirmer que l'analyse structurelle d'un système physique à l'aide de la théorie de l'algèbre différentielle est plus simple à partir de son modèle BG.

Perspectives

Nous avons considéré dans ce travail que la structure du modèle BG est linéaire. Il serait intéressant dans de futurs travaux de considérer un modèle BG non-linéaire. Une solution pourrait être apportée en utilisant le modèle BG variationnel.

Aussi, il serait intéressant d'associer les méthodes AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et de leur Criticités) avec l'approche proposée dans ce travail afin de vérifier la surveillabilité des composants à risque, ainsi que de proposer un placement de capteurs optimal pour les surveiller.

Annexe A

Transformée de Laplace en théorie du module

La caractérisations des relations d'entrées-sorties est obtenu en utilisant la transformée de Laplace. Cette dernière est défini en théorie de module par le notion du produit tensoriel [Cohn 1985] :

Définition A.1 : Soit Ω un $k[\delta]$ - module à gauche, le produit tensoriel est une application canonique

$$\begin{aligned}\Omega &\rightarrow \hat{\Omega} \\ \omega &\rightarrow 1 \otimes \omega\end{aligned}\tag{A.1}$$

$\hat{\Omega} = F \otimes_{k[\delta]} \omega$ est l'ensemble des combinaisons linéaires finies :

$$: \sum_{\text{finie}} a_i \otimes \omega_i \quad \setminus \quad a_i \in F\tag{A.2}$$

où : $\hat{\Omega}$ représente un F -espace vectoriel.

Propriété A.1 : Le produit tensoriel $F \otimes$ définit l'opérateur de Laplace du $k[\delta]$ -module à gauche dans le F -espace vectoriel.

Remarque A.3 : L'opérateur $F \otimes$ est un opérateur de transformation de Laplace, qui a un sens mathématique plus que physique.

Annexe B

Méthodologie BG

B.1 variables mises en jeu

D'un point de vue global, indépendamment du domaine physique considéré, les variables e et f sont considérées comme étant les variables définissant la puissance, i.e., $P = ef$.

Comme l'énergie est l'intégrale de la puissance par rapport au temps, on distingue alors deux variables d'énergie :

$$\begin{aligned} p(t) &= \int e(t) + p_0 \\ q(t) &= \int f(t) + q_0 \end{aligned} \tag{B.1}$$

où $p(t)$ est le moment généralisé et $q(t)$ est le déplacement généralisé.

La Table [B.1](#) indique la signification physique et l'unité de ces différentes variables dans certains domaines physiques.

B.2 Procédure d'affectation de la causalité

La procédure suivante connue sous le nom de SCAP (Sequential Causality Assignment Procedure) est appliquée sur le modèle BG acausal :

1. Affecter une causalité obligatoire aux sources et aux éléments R et répercuter sur l'environnement en respectant les restrictions de causalité des jonctions.

Domaine physique	Variables de puissance				Variables de d'énergie			
	Effort e	SI	Flux f	SI	Moment $p = \int edt$	SI	Déplacement $q = \int fdt$	SI
Mécanique translation	Force F	N	Vitesse V	$\frac{m}{s}$	Moment p	Ns	Élongation x	m
Mécanique rotation	Couple τ	Nm	Vitesse angulaire ω	$\frac{rad}{s}$	Moment angulaire H	Nms	Angle θ	rad
Électrique	Tension u	V	Courant i	A	Flux magnétique Φ	Wb	Charge q	C
Hydraulique	Pression P	$\frac{N}{m^2}$	Débit volumique Q	$\frac{m^3}{s}$	Impulsion P_p	$\frac{Ns}{m^2}$	Volume V	m^3

TABLE B.1 – Classification de différentes variables BG

2. Affecter une causalité intégrale préférentielle aux éléments I et C et répercuter sur l'environnement en respectant également les restrictions sur les jonctions.
3. Compléter la causalité sur les éléments R linéaires en respectant les restrictions sur les jonctions.
4. En cas de conflit de causalité, rechercher l'élément I ou C en cause et lui affecter une causalité dérivée puis repartir à l'étape 3.
5. Affecter la causalité au détecteurs, s'il y a lieu.

B.3 Règle de Mason

Pour un graphe (resp, BG) sur un anneau commutatif, l'expression de la relation entrée-sortie est donnée par (B.2).

$$T = \frac{1}{\Delta} \sum_{k \in H} \Delta_k T_k \quad (\text{B.2})$$

où H est l'ensemble de tous les chemins causaux entrée-sortie. Δ est défini par :

$$\Delta = 1 - \sum_i B_i + \sum_i \sum_j B_i B_j - \dots \quad (\text{B.3})$$

Élément	Causalité	Configuration	Loi caractéristique
Source d'effort	Obligatoire	$Se \xrightarrow[f]{e} \dashv$	e est imposé par Se
Source de flux	Obligatoire	$Sf \dashv \xrightarrow[f]{e}$	f est imposé par Sf
Élément I	Intégrale	$\xrightarrow[f]{e} \dashv I$	$f_I = \Phi_I(\int e_I dt)$
	Dérivée	$\dashv \xrightarrow[f]{e} I$	$e_I = \frac{d}{dt} \Phi_I^{-1}(f_I)$
Élément C	Intégrale	$\dashv \xrightarrow[f]{e} C$	$e_C = \Phi_C(\int f_C dt)$
	Dérivée	$\xrightarrow[f]{e} \dashv C$	$f_C = \frac{d}{dt} \Phi_C^{-1}(e_C)$

TABLE B.2 – Règles d'affectation de la causalité aux éléments BGs

où la somme est prise sur des cycles (resp, boucles causales) disjoint(e)s. Δ_k est défini comme Δ pour le sous-graphe (resp, bond-graph réduit) ne touchant pas le chemin k . T_k est le produit des gains des arcs (resp, chemins causaux) le long du chemin (resp, chaîne d'action) k et les B_i sont les gains des cycles (resp. boucles causales).

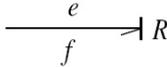
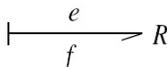
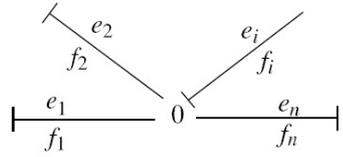
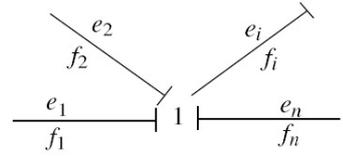
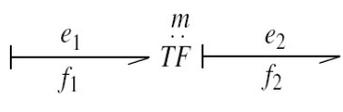
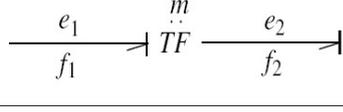
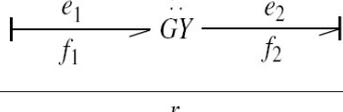
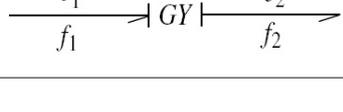
Élément	Causalité	Configuration	Loi caractéristique
Élément R non linéaire	Conductance		$f_R = \Phi_R^{-1}(e_R)$
	Résistance		$e_R = \Phi_R(f_R)$
Jonction 0	Un seul trait près de la jonction 0		$e_1 = e_i, e_2 = e_i, \dots, e_n = e_i$ $f_i = \pm \sum_{j=1}^n \pm f_j, i \neq j$
Jonction 1	Un seul trait loin de la jonction 1		$f_1 = f_i, f_2 = f_i, \dots, f_n = f_i$ $e_i = \pm \sum_{j=1}^n \pm e_j, i \neq j$
Transformateur TF	Flux rentrant		$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$
	Effort rentrant		$\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$
Gyrateur TG	Flux rentrant		$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \end{cases}$
	Effort rentrant		$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{r} e_2 \\ f_2 = \frac{1}{r} e_1 \end{cases}$

TABLE B.3 – Règles d'affectation de la causalité aux éléments BGs, suite

Bibliographie

- [Achir 2004] A. Achir, C. Sueur and G. Dauphin-Tanguy. *Ring bond graphs over non commutative rings : application to variational bond*. In I3M-IMAACA, ITALY, 2004.
- [Achir 2005] A. Achir. *Contribution à l'étude de la propriété de la platitude sur des modèles à bond graph non linéaires*. PhD thesis, Université de science et de technologie de Lille, 2005.
- [Barbot 2007] J.P. Barbot, M. Fliess and T. Floquet. *An algebraic framework for the design of nonlinear observers with unknown inputs*. In 46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007.
- [Bartlett 2005] L. M. Bartlett and J. D. Andrews. *Fault tree based approach for system fault diagnostics*. In Proceedings of the 23rd International System Safety Conference, August 2005.
- [Basile 1992] G. Basile and G. Marro. *Controlled invariants and conditioned invariants in linear system theory*. Prentice Hall, 1992.
- [Benmoussa 2011] S. Benmoussa, B. Ould-Bouamama and R. Merzouki. *Component fault detection and isolation comparison between bond graph and algebraic approach*. In IMAACA, pages 214–220, 2011.
- [Blanke 2003] Mo. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki. *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer, 2003.
- [Boukhobza 2007] T. Boukhobza, F. Hamelin and S. Martinez-Martinez. *State and input observability for structured linear systems : A graph-theoretic approach*. *Automatica*, vol. 43, pages 1204–1210, 2007.
- [Bourles 2005] H. Bourles. *Advanced topics in control systems theory, chapitre Structural Properties of Discrete and Continuous Linear Time-Varying Systems : A Unified Approach*, pages 225–280. Springer, 2005.
- [Breedveld 1984] P. Breedveld. *Essential Gytrators and Equivalence Rules for 3-port Junction Structures*. *Journal of The Franklin Institute*, vol. 318 (2), pages 77–89, 1984.
- [Chalh 2007] Z. Chalh, A. Achir and C. Sueur. *A bond graph approach for direct characterization of invariant zeros of linear time varying systems*. In IFAC symposium on Power system, Structure and Control, Brazil, 2007.
- [Chen 1999] J. Chen and R.J. Patton. *Robust model-based fault diagnosis in dynamic systems*. Kluwer academic publishers, 1999.

- [Chow 1984] E.Y. Chow and A.S. Willsky. *Analytical redundancy and the design of robust failure detection system*. IEEE Transaction on Automatic control, vol. 29, pages 603–614, 1984.
- [Cohn 1985] P. M. Cohn. *Free rings and their relations*. 2nd ed. New York : Academic., 1985.
- [Commault 1991] C. Commault, J. M. Dion and A. Perez. *Disturbance rejection for structured systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36, pages 884–887, 1991.
- [Commault 2002] C. Commault, J. M. Dion, O. Sename and R. Motyeian. *Observer-based fault detection and isolation for structured systems*. IEEE transactions on automatic control, vol. 47, no. 12, pages 2074–2079, 2002.
- [Commault 2007] Commault and J. M. Dion. *Sensor location for diagnosis in linear systems : A structural analysis*. IEEE transactions on automatic control, vol. 52, no. 2, pages 155–169, 2007.
- [Commault 2008] Commault, J. M. Dion and Sameh Yacoub Agha. *Structural analysis for the sensor location problem in fault detection and isolation*. Automatica, vol. 44, pages 2074–2080, 2008.
- [Cruz-Victoria 2008a] J.C. Cruz-Victoria and D.I. Gonzalez-Sanchez. *Nonlinear system diagnosis : Bond graphs meets differential algebra*. International journal of mechanics, vol. 2, pages 119–128, 2008.
- [Cruz-Victoria 2008b] J.C. Cruz-Victoria, R. Martinez-Guerra and J.J. Rincon-Pasaye. *On nonlinear systems diagnosis using differential and algebraic methods*. Journal of the Franklin Institute, vol. 345, pages 102–117, 2008.
- [Declerck 1991] Ph. Declerck. *Analyse Structurelle et Fonctionnelle Des Grands Systèmes, Application À Une Centrale PWR 900 MW*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille (France), 1991.
- [Ding 2008] S.X. Ding. *Model-based fault diagnosis techniques*. Springer, 2008.
- [Dion 1993] J. M. Dion and C. Commault. *Feedback decoupling of structured systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 38, no. 7, pages 1132–1135, 1993.
- [Dion 2003] J. M. Dion, C. Commault and J. van der Woude. *Generic properties and control of linear structured systems : a survey*. Automatica, vol. 39, pages 1125–1144, 2003.
- [Diop 2001] S. Diop and R. Martinez-Guerra. *On an algebraic and differential approach of nonlinear systems diagnosis*. In proceedings of the 40th IEEE : Conference On Decision and Control, pages 585–589, Orlando, FL, USA, 2001.
- [Djeziri 2007] M.A. Djeziri. *Diagnostic des Systemes Incertains par l'Approche Bond Graph*. PhD thesis, Ecole centrale de Lille, 2007.
- [Djeziri 2009] M.A. Djeziri, B. Ould-Bouamama, R. Merzouki and G. Dauphin-Tanguy. *Optimal sensor placement for fault diagnosis*. In Mechatronics, 2009. ICM 2009. IEEE International Conference on, april 2009.

-
- [Edelmayer 1994] A. Edelmayer, J. Bokor and L. Keviczky. *An H_∞ filtering approach to robust detection of failures in dynamical systems*. In Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on, volume 3, pages 3037–3039 vol.3, dec 1994.
- [El-Osta 2005] W. El-Osta, B. Ould Bouamama and C. Sueur. *Flatness for actuators monitoring : application in process engineering domain*. In 16th IFAC World Congress on Automatic Control Theory, technology and applications, prague, 4-8 July 2005.
- [El-Osta 2006] W. El-Osta, B. Ould Bouamama and C. Sueur. *Monitorability indexes and bond graphs for fault tolerance analysis*. In Safeprocess IFAC, Beijing, Chine, 29-1 Sept 2010 2006.
- [Fliess 1989] M. Fliess. *Automatique et corps différentiels*. Forum Math", 1989.
- [Fliess 1990] M. Fliess. *Some basic structural properties of generalized linear systems*. System & Control Letters, vol. 15, pages 391–396, 1990.
- [Fliess 2003] M. Fliess and C. Join. *An algebraic approach to fault diagnosis for linear systems*. In CESA, July 2003.
- [Fliess 2004] M. Fliess, C. C. Join and H. Sira-Ramirez. *Robust residual generation for linear fault diagnosis : an algebraic setting with examples*. International journal of control, vol. 77, pages 1223–1242, 2004.
- [Frank 1997] Paul M. Frank and Birgit Koppen-Seliger. *Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis*. International Journal of Approximate Reasoning, vol. 16, no. 1, pages 67 – 88, 1997.
- [Gawthrop 1995] P.J. Gawthrop. *Bicausal Bond Graph*. In International Conference On Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'95), Las Vegas, U.S.A., 15-18 January 1995.
- [Gertler 1997] J. Gertler. *Fault detection and isolation using parity relations*. Control Engineering Practice, vol. 5, pages 653–661, 1997.
- [Gertler 2004] J. Gertler and J. Cao. *PCA-based fault diagnosis in the presence of control and dynamics*. AIChE Journal, vol. 50, pages 388–402, 2004.
- [Hammouri 1999] H. Hammouri, M. Kinnaert and E.H. E-Yaagoubi. *Observer-based approach to fault detection and isolation for nonlinear systems*. Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. 44, no. 10, pages 1879–1884, oct 1999.
- [Henry 2001] D. Henry, A. Zolghadri, F. Castang and M. Monson. *A new multi-objective filter design for guaranteed robust FDI performance*. In Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on, volume 1, pages 173–178 vol.1, 2001.
- [Hovelaque 1996] V. Hovelaque, C. Commault and J. M. Dion. *Analysis of linear structures systems using a primal-dual algorithm*. System & Control Letters, vol. 27, pages 73–85, 1996.
- [Hurdle 2009] E.E. Hurdle, L.M. Bartlett and J.D. Andrews. *Fault diagnostics of dynamic system operation using a fault tree based method*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 94, pages 1371–1380, 2009.

- [InTraDE 2012] InTraDE. *Intelligent transportation for dynamic environment (InTraDE)*, <http://www.intrade-nwe.eu>, 2012, accessed 20 September 2012.
- [Isermann 2006] R. Isermann. *Fault-diagnosis systems : An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, 2006.
- [Karnopp 1975] D. Karnopp and R.C. Rosenberg. *System dynamics : A unified approach*. John Wiley & Sons, 1975.
- [Kelly 2006] E. M. Kelly and L. M. Bartlett. *Application of the digraph method in system fault diagnostics*. In Proceedings of the First International Conference on Availability, Reliability and Security, 2006.
- [Khemliche 2006] M. Khemliche, B. Ould-Bouamama and H. Haffaf. *Sensor placement for component diagnosability using bond-graph*. *Sensors and Actuators*, vol. A 132, pages 547–556, 2006.
- [Krysander 2002] M. Krysander and M. Nyberg. *Structural analysis utilizing MSS sets with application to a paper plant*. In Proceeding 13th International Workshop on Principles of Diagnosis Dx, Semmering, Austria, 2002.
- [Krysander 2005] M. Krysander and J. Aslund. *Graph theoretical methods for finding analytical redundancy relations in overdetermined differential algebraic systems*. In IMACS World Congress, Paris, France, 2005.
- [Krysander 2008] M. Krysander, J. Aslund and M. Nyberg. *An efficient algorithm for finding minimal overconstrained subsystems for model-based diagnosis*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans*, vol. 38, no. 1, pages 197–206, 2008.
- [Larsson 1994] J. E. Larsson. *Hyperfast algorithms for model-based diagnosis*. In Computer Control System Design IEEE/ IFAC, pages 533–538, 1994.
- [Lichiardopol 2010] S. Lichiardopol and C. Sueur. *Duality in system analysis for bond graph models*. *Journal of Franklin Institute*, vol. 347, pages 377–414, 2010.
- [Maki 1997] Y. Maki and K.A. Loparo. *A neural-network approach to fault detection and diagnosis in industrial processes*. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 6, pages 529–541, 1997.
- [Marinez-Guerra 2006] R. Marinez-Guerra, A. Luviano-Juarez and J.J. Rincon-Pasaye. *Fault diagnosis of nonlinear systems : a differential algebraic approach*. In CLCA, 2006.
- [Massoumnia 1989] M. A. Massoumnia, G. C. Verghese and A. S. Willsky. *Failure detection and identification*. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 3, pages 316–321, mar 1989.
- [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*, vol. 17, no. 5, pages 501–518, 2004.
- [Maurya 2005] M. R. Maurya, R. Rengaswamy and V. Venkatasubramanian. *Fault diagnosis by qualitative trend analysis of the principal components*. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 83, pages 1122–1132, 2005.

-
- [Maurya 2007] M. R. Maurya, R. Rengaswamy and V. Venkatasubramanian. *Fault diagnosis using dynamic trend analysis : A review and recent developments*. Engineering Applications of artificial intelligence, vol. 20, pages 133–146, 2007.
- [Merzouki 2007a] R. Merzouki, J.A. Davila, L. Fridman and J.C. Cadiou. *Backlash phenomenon observation and identification in electromechanical system*. Control Engineering Practice, vol. 15, no. 4, pages 447 – 457, 2007.
- [Merzouki 2007b] R. Merzouki, B. Ould-Bouamama, M.A. Djeziri and M. Bouteldja. *Modelling and Estimation of Tire-Road Longitudinal Impact Efforts using Bond Graph Approach*. Mechatronics, vol. 17, pages 93–108, 2007.
- [Meskin 2007] N. Meskin, T. Jiang, E. Sobhani, K. Khorasani and C.A. Rabbath. *Nonlinear Geometric Approach to Fault Detection and Isolation in an Aircraft Nonlinear Longitudinal Model*. In American Control Conference, 2007. ACC '07, pages 5771–5776, july 2007.
- [Michelin 2001] Michelin. *Tire encyclopedia, Société de Technologie Michelin*, 2001.
- [Moyes 1995] A. Moyes, G. M. Burt, J.R. McDonald, J.R. Capener, J.Dray and R. Goodfellow. *Application of expert systems to fault diagnosis IN ALTERNATORS*. In Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Drives, 1995.
- [Ngwompo 1996] R.F. Ngwompo, S. Scavarda and D. Thomasset. *Inversion Of Linear Time-Invariant SISO Systems Modelled By Bond Graph*. Journal of the Franklin Institute, vol. 336, pages 157–174, 1996.
- [Ngwompo 2001] R.F. Ngwompo, S. Scavarda and D. Thomasset. *Physical model-based inversion in control systems using bond graph representation, part 1 : theory*. Proceedings of ImechE, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, vol. 215(2), pages 95–103, 2001.
- [OKTAL 2012] OKTAL. *SCANeR Driving Simulation Engine*, <http://www.scanersimulation.com>, 2012, accessed 29 September 2012.
- [Ould-Bouamama 2003] B. Ould-Bouamama, A. K. Samantaray, M. Staroswiecki and G. Dauphin-Tanguy. *Derivation of Constraint Relations from Bond Graph Models for Fault Detection and Isolation*. In International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation, pages 104–109, 2003.
- [Ould-Bouamama 2005] B. Ould-Bouamama, K. Medjaher, A.K. Samantaray and G. Dauphin-Tanguy. *Model Builder Using Functional and Bond Graph Tools for FDI Design*. Control Engineering Practice (CEP) journal, vol. 13, no. 7, pages 875–891, 2005.
- [Ould-Bouamama 2006] B. Ould-Bouamama, M. Staroswiecki and A. K. Samantaray. *Software for Supervision System Design in Process Engineering*. In IFAC World Congress, pages 691–695, 2006.
- [Patton 1997] R.J. Patton and J. Chen. *observer-based fault detection and isolation : robustness and applications*. Control Engineering Practice, vol. 5, pages 671–682, 1997.
- [Paynter 1961] H.M. Paynter. *Analysis and design of engineering systems*. MIT press, Cambridge, MA, U.K, 1961.

- [Qian 2008] Yu Qian, Liang Xu, Xiuxi Li, Li Lin and Andrzej Kraslawski. LUBRES : *An expert System development and implementation for real-time fault diagnosis of a lubricating oil refining process*. Expert Systems with Applications, vol. 35, pages 1252–1266, 2008.
- [Rahmani 1996] A. Rahmani, C. Sueur and G. Dauphin-Tanguy. *On the infinite structure of systems modelled by bond-graph : Feedback decoupling*. In IEEE SMC'96, Pekin, China, 1996.
- [Rudolph 1996] J. Rudolph. *Duality in time-varying linear systems : A module theoretic approach*. Linear Algebra and its Applications, vol. 245, page 83i; $\frac{1}{2}$ 106, 1996.
- [Samantary 2006] A.K. Samantary, 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, vol. 14, pages 237–262, 2006.
- [Samantary 2008a] A. K. Samantary and B. Ould-Bouamama. Model-based process supervision. Springer, 2008.
- [Samantary 2008b] A.K. Samantary and S.K. Ghoshal. *Bicausal bond graph for supervision : from fault detection and isolation to fault accommodation*. Journal of the Franklin Institute, vol. 345, pages 1–28, 2008.
- [Srinivas 1994] S. Srinivas. *A probabilistic approach to hierarchical model-based diagnosis*. In Proceedings UAI-94, pages 538–545, 1994.
- [Staroswiecki 1989] M. Staroswiecki. *Analytical Redundancy in Non Linear Interconnected Systems by Means of Structural Analysis*. In AIPAC'98, pages 23–27. IFAC, 1989.
- [Staroswiecki 2000] M. Staroswiecki. *Quantitative and qualitative models for fault detection and isolation*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 14, no. 3, pages 301 – 325, 2000.
- [Sueur 1991] C. Sueur and G. Dauphin-Tanguy. *Bond-graph approach for structural analysis of MIMO linear systems*. Journal of the Franklin Institute, vol. 328, pages 55–70, 1991.
- [Tharrault 2008] Y. Tharrault, G. Mourot and J. Ragot. *Fault detection and isolation with robust principal component analysis*. In Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on, pages 59 –64, june 2008.
- [Vedam 1997] H. Vedam and V. Venkatasubramanian. *Signed Digraph Based Multiple Fault Diagnosis*. Computers Chem. Engineering, vol. 21, pages 655–660, 1997.
- [Wang 2004] S. Wang and F. Xiao. *AHU sensor fault diagnosis using principal component analysis method*. Energy and Buildings, vol. 36, no. 2, pages 147 – 160, 2004.
- [Wonham 1985] W. M. Wonham. Linear multivariable control. Springer, 1985.
- [Xiaojun 2009] G. Xiaojun, Y. Shixi, Z. Yun and Q. Suxiang. *Development of multilevel flow model for power plant process fault diagnosis*. In Control and Decision Conference, pages 189–193, June 2009.
- [Yongli 2006] Z. Yongli, H. Limin and L. Jinling. *Bayesian networks-based approach for power systems fault diagnosis*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 2, pages 634 – 639, 2006.

Approche Bond Graph pour la détectabilité et l'isolabilité algébriques de défauts composants

Résumé :

La présente thèse concerne l'étude structurelle d'un système modélisé par Bond Graph du point de vue détection et isolation de défaut. En combinant la théorie du module avec les propriétés causales et structurelles de l'outil Bond Graph, de simples conditions graphiques permettant de conclure sur la détectabilité et l'isolabilité de défauts composants ont été proposées. Aussi, une procédure de placement de capteurs optimal a été présentée pour le recouvrement de la surveillabilité du système en présence de défauts.

Pour l'étape de diagnostic, une procédure systématique a été développée pour la génération des indicateurs de défauts sensibles aux défauts composants considérés. L'approche proposée dans ce travail a été validée par une application sur un véhicule autonome intelligent, appelé RobuTAINeR.

Mots clés : analyse structurelle, détection et isolation de défaut, bond graph, théorie du module.

Abstract:

This thesis is concerned with system structural analyses for fault detection and isolation. By using the module theory and the causal and structural properties of the Bond Graph tool, simple graphical conditions of structural detectability and isolability of plant faults are proposed. Also, a procedure for optimal sensor placement is performed in order to recover systems monitorability in the presence of plant faults.

Moreover, for the diagnosis step, a procedure is proposed for a systematic generation of faults indicator which are only sensitive to the desired plant faults. The proposed approach in this work is validated by an application on a quarter of an autonomous intelligent vehicle.

Keywords: Structural analysis, Fault detection and isolation, bond graph, module theory.