

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année 2009

Faculté des Sciences de l'ingénieur
Département d'électrotechnique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

**Diagnostic Robuste des Systèmes Énergétiques par
l'Approche Bond Graph**

Option

Commande

Par

BOUTASSETA Nadir

Directeur de mémoire: Dr. RAMDANI Messaoud Université de Annaba

Président	: ABASSI Hadj Ahmed	Pr.	Université de Annaba
Examineurs	: OUARI Ahmed	MC	Université de Annaba
	BENSAOULA Salah	MC	Université de Annaba
	MOUSSAOUI Abdelkrim	MC	Université de Guelma

ملخص

إن أنظمة المراقبة تلعب دورا أساسيا في حماية المنشآت الصناعية وجاهزية مكوناتها. فالإنذار المبكر للفرق المسجل بالنسبة إلى السلوك العادي يمثل عنصرا أساسيا في مراحل عمليات الصيانة.

هناك العديد من الظواهر الفيزيائية والمكونات التكنولوجية التي يمكن إيجادها في المركبات الصناعية. ولهذا السبب أداة "رسم الروابط"، والتي أساسها التحليل الطاقوي والمتعدد المجالات، مناسبة تماما لهذا الغرض.

إن نموذج "رسم الروابط" الناتج يمكننا من تطبيق طرق تشخيص الأخطاء التي تتركز على استعمال نموذج النظام المدروس.

في بداية هذا البحث نقوم بعرض للطرق المستخدمة في تشخيص الأخطاء. بعد ذلك نقوم بتقديم الأداة المستعملة في نمذجة الجمل، بالإضافة إلى أمثلة تطبيقية. في المرحلة التالية يتم تفصيل طرق التشخيص المتركزة على استعمال أداة "رسم الروابط" وتوسيع الدراسة لتشمل الجمل التي تحتوي على معالم غير مؤكدة. أخيرا، يتم تطبيق الطريقة المختارة لتشخيص الأخطاء في محرك كهربائي لاتزامني.

كلمات بحث: تشخيص الأخطاء، رسم الروابط.

Résumé

Les systèmes de surveillance et de supervision jouent un rôle majeur pour la sécurité des installations industrielles et la disponibilité de ses équipements. Signaler le plus tôt possible à l'opérateur les écarts détectés par rapport au comportement nominal prévu est fondamental pour la mise en oeuvre des actions préventives et correctives sur le procédé.

Ces systèmes industriels sont régis par plusieurs phénomènes physiques et divers composants technologiques, c'est pourquoi l'outil Bond Graph, basé sur une analyse énergétique et multi-physique, est bien adapté. Le modèle bond Graph résultant permet par la suite d'appliquer des méthodes de diagnostic à base de modèles à fin de détecter et éventuellement isoler le défaut. Dans ce mémoire, nous allons aborder le problème de diagnostic des systèmes énergétiques par une présentation des méthodes de diagnostic existantes. Ensuite, on introduit l'outil de modélisation utilisé avec illustration par des exemples d'applications dans différents domaines physiques. Les méthodes de diagnostic à base du modèle Bond Graph sont par la suite présentées, ainsi que l'extension de ces méthodes à des modèles à paramètres incertains. Enfin, la méthode de diagnostic étudiée est appliquée pour la détection et l'isolation des défauts dans un moteur asynchrone.

Mots-clés :Diagnostic,Modélisation, Bond Graph, Redondance analytique.

Abstract

Supervision and monitoring systems have a major role to the security of industrial plants and availability of its equipments. Early detection and isolation of incipient faults may prevent the factory from disaster.

Industrial plants integrate many technology components that are governed by several physical phenomenas, that's why Bond Graph tool which is based on an energy and multi physics analysis is well suited. The resulting bond graph model can subsequently be used in model-based fault diagnosis methods that allows the detection and isolation of faults.

In this study, we address the problem of diagnosis of energy systems by presenting a state of the art of diagnosis methods. Next, we introduce Bond Graph modeling procedure with applications in different physical domains. Bond Graph model-based diagnosis methods are presented after, followed by its extension to robust fault diagnosis methods. Finally, application examples of the diagnosis method are presented.

Keywords : Fault diagnosis, Bond Graph, Model-Based, Analytical Redundancy relations, FDI

*Je dédie ce mémoire
À mes chers parents pour tout les sacrifices consentis,
pour leur soutien durant toute mes années d'études,
À toute ma famille et à mes amis,*

Remerciements

Mr Ramdani Messaoud pour la confiance qu'il m'a accordée, ses encouragements, et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier les membres du jury et plus précisément :

Monsieur ABASSI Hadj Ahmed, Professeur à l'Université Badji-Mokhtar Annaba,

Messieurs Ouari Ahmed, Maître de conférence à l' Université de Annaba,

BENSAOULA Salah, Maître de conférence à l' Université de Annaba,

MOUSSAOUI Abdelkrim, Maître de conférence à l' Université de Guelma,

d'avoir répondu favorablement à notre demande et d'avoir examiné notre mémoire.

Je remercie aussi ma famille, et en particulier mes parents, pour leur patience et la compréhension dont ils ont fait preuve tout au long de mes études.

Je remercie finalement mon meilleur ami Amar Neçaibia de son soutien, de son aide et tout simplement de son amitié.

Liste des tableaux

2.1	Variables généralisées d'effort et de flux en vrai bond graph	14
2.2	Variables généralisées de moment et de déplacement en vrai bond graph . .	16
2.3	Variables généralisées pseudo bond graph	17
3.1	Modèle structurel de la partie hydraulique	45
3.2	Matrices d'incidence du processus hydraulique	46
3.3	Matrices d'incidence et couplage des variables	51
A.1	Règles de causalités des différents éléments Bond Graph	88

Liste des figures

1.1	Classification générale des approches de diagnostic	5
2.1	Élément multiport (a), éléments et ports (b), Bond Graph (c)	13
2.2	Informations fournies par une représentation bond graph	14
2.3	Élément R à 1 port	17
2.4	Modèle en pseudo et en vrai bond graph du processus de conduction	19
2.5	Élément C à 1 port	20
2.6	Énergie stockée par un élément C dans le cas linéaire et non linéaire	21
2.7	Élément C thermique	22
2.8	Élément I à 1 port	23
2.9	Sources d'effort et de flux	24
2.10	Élément de jonction "0" et "1"	25
2.11	Exemple de modèle Bond Graph d'un système mécanique	25
2.12	Exemple de modèle Bond Graph d'un système Hydraulique	26
2.13	Élément Transformateur et Gyrateur	27
2.14	Lien d'information, détecteurs d'effort et de flux	27
2.15	Causalités en Bond Graphs	28
2.16	Schéma de principe d'une demi-caisse d'un véhicule	29
2.17	Schéma mécanique de la suspension	30
2.18	Modèle Bond Graph de la suspension	30
2.19	Résultats de simulations de l'exemple de la suspension mécanique	31
2.20	Résultats de simulations de l'exemple de la suspension mécanique	31
2.21	Système Hydraulique (2 Cuves) (a) et à (3Cuves) (b)	32
2.22	Model bond Graph du Système Hydraulique (2 Cuves)	32
2.23	Model bond Graph du Système Hydraulique (3 Cuves)	32
2.24	Résultat de simulation du système hydraulique (3 Cuves)	33
3.1	Représentation bond graph d'un système de surveillance.	35
3.2	Système à 2 cuves (a) Le Bond Graph équivalent (b).	39
3.3	Différents cas d'entrée inconnue pour les hypothèses de défauts considérées. .	40
3.4	Bond Graph avec entées inconnues.	41
3.5	Modèle Bond Graph d'un système masse-ressort-amortisseur.	43
3.6	Réservoir alimenté en eau par une pompe.	44
3.7	Le diagraphe correspondant aux équations 3.35.	46
3.8	Modèle bond graph de l'exemple de la <i>figure</i> 3.6.	47
3.9	Génération des RRAs à partir d'un graphe biparti orienté.	52

3.10	Représentation LFT.	56
3.11	Elément R déterministe en causalité résistance (a) et causalité conductance (b)	57
3.12	Elément R en causalité résistance avec incertitude additive (a). en causalité conductance (b).	57
3.13	Elément C en causalité intégrale avec incertitude additive (a). en causalité dérivée (b)	58
3.14	Elément I en causalité intégrale avec incertitude additive (a). en causalité dérivée (b)	58
3.15	Modèle bloc diagramme LFT d'un élément R en causalité résistance avec incertitude multiplicative (a). en causalité conductance (b).	59
3.16	Modèle BG-LFT d'un élément R en causalité résistance avec incertitude multiplicative (a).en causalité conductance (b).	60
3.17	Elément I en causalité dérivée préférentielle (a). Elément C en causalité dérivée préférentielle (b).	61
3.18	Elément I en causalité intégrale préférentielle (a). Elément C en causalité intégrale préférentielle (b).	62
3.19	Elément TF avec les deux types de causalité.	63
3.20	Elément GY avec les deux types de causalité.	64
3.21	Représentation d'un BG-LFT.	65
3.22	Circuit électrique R, C, I.	65
3.23	Modèle BG déterministe en causalité intégrale d'un circuit R, C, I.	65
3.24	Modèle BG-LFT en causalité intégrale d'un circuit R, C, I.	66
4.1	Système hydraulique à 3 cuves	70
4.2	Modèle Bond Graph du système hydraulique à 3 cuves	70
4.3	Résidus résultants d'un défaut de fuite sur la cuve1	71
4.4	Résidus résultant d'un défaut de fuite sur la cuve 2	71
4.5	Résidus résultant d'un défaut de fuite sur la cuve 3	72
4.6	Résidus résultant de défauts combinés sur les cuve 1,2 et 3	72
4.7	Réponse du système pour 3 défauts combinés sur les cuves 1,2 et 3	73
4.8	Modèle bond graph du moteur asynchrone à cage	74
4.9	Les courants statoriques et la vitesse angulaire du MAS	74
4.10	Le couple en absence de charge	75
4.11	Le couple en fonction de la vitesse angulaire en absence de charge	75
4.12	Modèle BG du moteur asynchrone pour le diagnostic	76
4.13	Courants statoriques et vitesse du moteur asynchrone sain	78
4.14	Courants rotoriques du moteur asynchrone sain	79
4.15	Résidus d'un moteur asynchrone sain	80
4.16	Résidus d'un moteur asynchrone avec 1 barre cassée	80
4.17	Courants rotoriques d'un moteur asynchrone avec 1 barre cassée	81
4.18	Résidus avec court-circuit dans les spires d'une bobine statorique	81
4.19	Modèle BG-LFT du moteur asynchrone à cage	82
4.20	Résidus robustes aux variations paramétriques	83
4.21	Détection de défaut en présence des variations paramétriques	83

Liste des Symboles

BG	Bond Graph,
BG-LFT	Bond Graph sous forme LFT,
e	Effort de x ,
E	Energie,
E_p	Énergie potentielle,
E_c	Énergie cinétique,
f	Flux,
F	Force,
FDI	Fault Detection and Isolation,
i	Intensité électrique,
I	Paramètre caractéristique d'un élément inertiel,
J	Moment,
LFT	Linear Fractional Transformation,
MAS	Moteur ASynchrone à cage,
P	Pression,
p	Variable du moment généralisé,
P_U	Puissance,
PID	Plan d'Instrumentation Détaillé,
\dot{Q}	Flux thermique,
q	Variable de déplacement généralisé,
R	Paramètre caractéristique d'un élément résistif,
R_e	Résistance électrique,
R_h	Résistance hydraulique,
R_t	Résistance thermique,
RRA	Relations de Redondance Analytique
u	Tension,
\dot{x}	Vitesse de translation,
ω	Vitesse angulaire.

Table des matières

Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des Symboles	ix
Introduction générale	1

Chapitre 1

Diagnostic des systèmes

1.1	Introduction	4
1.2	Terminologie	4
1.3	Méthodes de diagnostic	6
1.3.1	Méthodes sans modèles	6
1.3.2	Méthodes avec modèles	7
1.3.3	Modèles hiérarchiques	9
1.4	Conclusion	10

Chapitre 2

Modélisation par Bond Graph

2.1	Introduction	12
2.2	Concepts et définitions : port, lien, bond graph	12
2.3	Variables d'énergie et de puissance	14
2.3.1	Vrais bond graphs	14
2.3.2	Pseudo bond graphs	16
2.4	Éléments du langage bond graph	17
2.4.1	Éléments passifs 1 port	17
2.4.2	Éléments actifs	23

2.4.3	Éléments de jonction	24
2.4.4	Transformateur (TF) et Gyrateur (GY)	26
2.4.5	Liens d'information	27
2.5	Causalités en Bond Graphs	28
2.6	Exemples de modélisation	29
2.6.1	Exemple 1	29
2.6.2	Exemple 2	32
2.7	Conclusion	33

Chapitre 3

Diagnostic Robuste par l'Approche Bond Graph

3.1	Introduction	35
3.1.1	L'approche qualitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph	36
3.1.2	L'approche quantitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph	36
3.2	Observateurs à entrée inconnue	37
3.2.1	Application avec l'approche Bond Graph	39
3.2.2	Conclusion	41
3.3	Résidus dans l'espace de parité	41
3.3.1	Exemple d'application	42
3.3.2	Conclusion	43
3.4	Génération de Relations de Redondance Analytique	44
3.4.1	Représentation graphique des systèmes	44
3.4.2	Génération de RRAs en utilisant le graphe biparti	50
3.4.3	Génération de RRAs en utilisant le bond graph	52
3.5	Diagnostic robuste par l'approche Bond Graph	56
3.5.1	Représentation LFT	56
3.5.2	Modélisation des éléments Bond Graph incertains	57
3.5.3	Construction d'un modèle BG-LFT	64
3.6	Génération de résidus robustes	66
3.6.1	Forme générale de la RRA incertaine	66
3.6.2	Génération des seuils adaptatifs	67
3.7	Conclusion	68

Chapitre 4**Application et Résultats de Simulations**

4.1	Introduction	70
4.1.1	Discussions	73
4.2	Cas d'étude d'un Moteur Asynchrone	74
4.2.1	Modèle Bond Graph du moteur asynchrone	74
4.2.2	Modèle BG du moteur asynchrone à cage pour le diagnostic	76
4.2.3	Diagnostic du moteur asynchrone	79
4.2.4	Diagnostic robuste du moteur asynchrone à cage	82
4.3	Conclusion	84
	Conclusions générales et perspectives	85
	Annexe A Affectation de causalités	87
	Bibliographie	89

Introduction générale

La moindre défaillance sur un processus est néfaste dans un environnement où le rendement est primordial. Il est donc nécessaire de s'assurer en permanence du bon fonctionnement du processus vis-à-vis des objectifs qui lui ont été assignés.

L'information permettant de traduire le comportement d'un système est donnée par les mesures des variables de celui-ci. La qualité des mesures est un élément essentiel pour permettre la surveillance et l'évaluation des performances d'un processus. La qualité de l'information peut être accrue en améliorant la précision de l'instrumentation et en multipliant le nombre de capteurs. Pour des raisons techniques ou financières, cette solution, où une même grandeur est mesurée par plusieurs capteurs, est réservée aux industries de haute technologie ou à celles présentant de hauts risques technologiques. De plus, cette redondance matérielle ne permet pas de se protéger contre une défaillance de certains éléments communs de la chaîne de mesure : plusieurs capteurs mesurant la même grandeur sont généralement géographiquement voisins et alimentés par le même réseau électrique ; une panne d'alimentation entraîne un arrêt de tout le système de mesure. L'exploitation de modèles a priori exacts liant différentes grandeurs mesurées offre un autre moyen de vérifier la fiabilité des mesures.

La redondance analytique présente l'avantage de ne pas augmenter le coût de l'installation et de se dégager des contraintes matérielles. Dans le domaine du diagnostic, des méthodes basées sur le concept de redondance de l'information ont été développées. Leur principe repose généralement sur un test de cohérence entre un comportement observé du processus fourni par des capteurs et un comportement prévu fourni par une représentation mathématique du processus.

Les méthodes de redondance analytique nécessitent donc un modèle du système à surveiller. Ce modèle comprend un certain nombre de paramètres dont les valeurs sont supposées connues lors du fonctionnement normal. La comparaison entre le comportement réel du système et le comportement attendu donné par le modèle fournit une quantité, appelée résidu, qui va servir à déterminer si le système est dans un état défaillant ou non et de préciser le cas échéant la partie ou le composant du système défaillant. Effectuer le diagnostic de fonctionnement d'un système consiste à détecter et localiser les défauts internes (affectant le processus lui-même), les défauts externes (affectant les actionneurs, les capteurs), les fonctionnements anormaux, puis à estimer les caractéristiques principales des défauts mis en évidence (leurs amplitudes).

Dans la plupart des situations pratiques, le diagnostic de fonctionnement doit être effectué en présence de bruits de mesure, de perturbations, de bruits agissant sur le processus et d'erreurs de modélisation. Les performances de la procédure de diagnostic en terme de détection et localisation de défauts dépendent donc directement de l'exactitude du modèle bond graph développé. Partant de ce constat, des méthodes de diagnostic robustes sont développées.

Dans ce contexte, le mémoire comporte quatre chapitres et organisé de la façon suivante :

Chapitre 1

Ce chapitre présente l'état de l'art des techniques de diagnostic à base de modèles.

Chapitre 2

Ce chapitre servira, dans un premier lieu, pour l'introduction du langage de modélisation par Bond Graph et à la description de ses concepts de base. Nous allons voir qu'il est possible de décrire un système physique par ses interactions énergétiques et à l'aide d'un certain nombre de composantes élémentaires possédant des propriétés énergétiques fixes.

Par la suite, on exposera le concept le plus fondamental du Bond Graph, c'est la causalité. La causalité permet de transformer un modèle symbolique en modèle mathématique qui peut être simulé par la suite.

Chapitre 3

Nous nous intéressons dans ce chapitre aux méthodes de diagnostic robustes à base du modèle bond graph. Au début, on présente l'approche de diagnostic à base d'observateur à entrée inconnue. Par la suite, on expose une méthode basée sur l'espace de parité, la génération des relations de redondance analytique est aussi détaillée avec un exemple d'illustration. L'extension des modèles déterministes présentés dans le chapitre précédent à des modèles intégrant des éléments incertains, la mise sous forme LFT, et la génération des relations de redondance analytique robustes sont aussi détaillés dans ce chapitre.

Chapitre 4

Dans ce chapitre, on applique les techniques de diagnostic présentées dans les chapitres précédents sur des systèmes énergétiques.

Enfin, une conclusion générale et des perspectives sont données à la fin du mémoire.

1

Diagnostic des systèmes

1.1 Introduction

Les systèmes conçus et fabriqués par l'homme (véhicules, avions, réseaux de télécommunications, usines...) sont de plus en plus complexes. Cette complexité est due au grand nombre de composants constituant ces systèmes. Malgré les besoins de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements, ces systèmes ne sont pas à l'abri de défaillances. C'est pourquoi les activités de surveillance, diagnostic (détection, localisation, identification de défaillances), réparation ou reconfiguration sont très importantes. Ces activités permettent de détecter et localiser les défauts, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

De nos jours, l'implémentation des systèmes automatisés suppose la mise en place d'outils importants pour le diagnostic et la surveillance pour aider les entreprises dans leur recherche permanente d'un meilleur fonctionnement de leurs systèmes à moindre coût. Dans ce contexte, de nombreuses approches ont été développées, en vue de la détection de défauts et du diagnostic, par différentes communautés de recherche en automatique.

Ces approches peuvent être classées, de manière générale, comme des méthodes à base de modèles, à base de reconnaissance de formes, à base de réseaux bayésiens, à base de cas, et des méthodes à base d'arbre de décision. Les méthodes à base de modèles considèrent un modèle de comportement du système basé sur des principes physiques fondamentaux.

Ces modèles peuvent être de type quantitatif exprimés sous forme d'équations mathématiques (contraintes) ou bien de type qualitatifs, exprimés par exemple sous forme de relations logiques. Les méthodes à base de reconnaissance de formes visent à identifier les zones d'un espace de valeurs qui correspondent à des états défaillants. Les méthodes à base de réseaux bayésiens sont des méthodes probabilistes qui peuvent aider à faire le diagnostic. Les méthodes à base d'arbre de décision consistent à construire un arbre à questions successives. Selon la réponse, cet arbre peut être construit et il permet de réaliser le diagnostic. Les méthodes à base de cas consistent à enregistrer dans une base de connaissances les effets observés des défauts qui se sont produits dans le passé. Puis, lorsqu'un fait anormal se produit, on cherche des cas similaires dans la base de connaissances pour trouver les diagnostics possibles.

1.2 Terminologie

Comme étape vers une terminologie unifiée, le "*Technical Committee of International Federation of Automatic Control*" (**IFAC**) **SAFEPROCESS** a suggéré des définitions préliminaires dans le domaine du diagnostic de défaut [16].

– **Analyse structurelle :**

Analyse des propriétés structurales des modèles, c'est-à-dire des propriétés qui sont indépendantes des valeurs réelles du paramètre.

– **Défaillance :**

Une interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées.

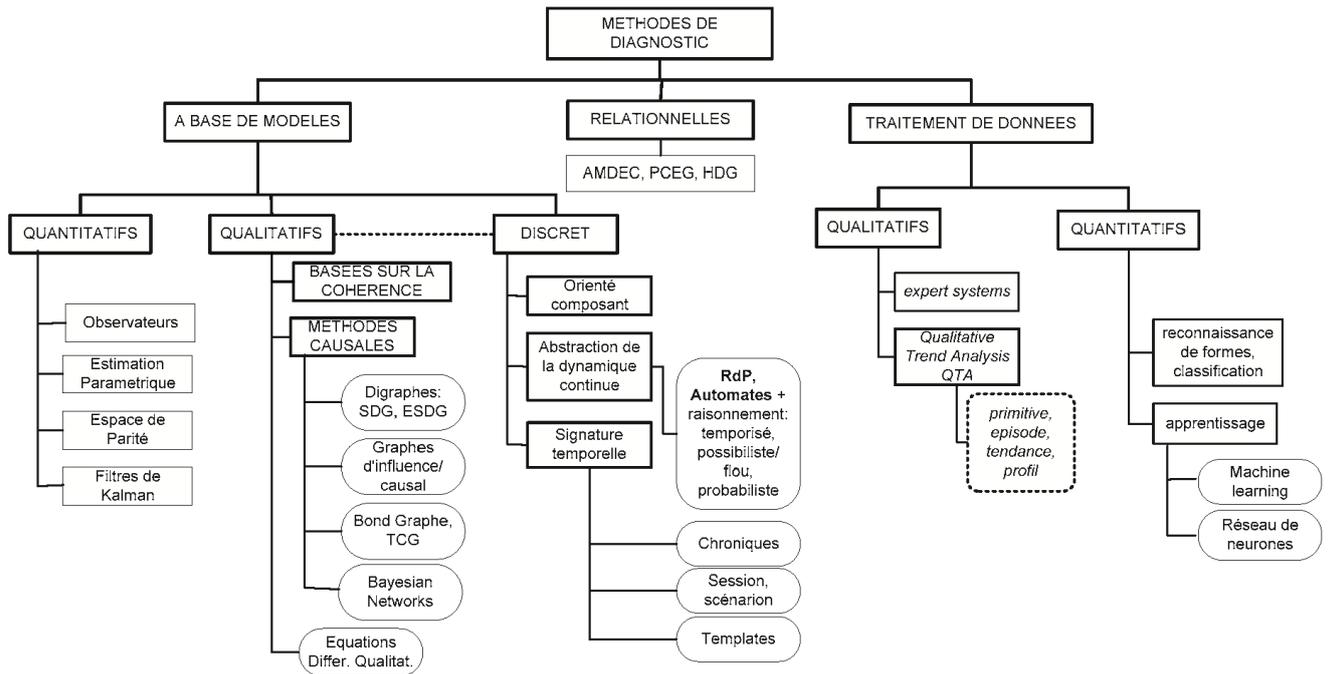


FIGURE 1.1 – Classification générale des approches de diagnostic

- **Défaut :**
Un écart non permis d’au moins une propriété structurale ou d’un paramètre caractéristique du système par rapport au comportement nominal (usuel ou acceptable).
- **Détection de défaut :**
La détermination de la présence de défauts et de l’instant de leurs occurrences.
- **Isolation de défaut :**
La détermination du type, de la localisation et de l’instant d’occurrence d’un défaut.
- **Identification :**
La détermination de la taille et du comportement temporel d’un défaut.
- **Diagnostic :**
La détermination du type, de la taille, de la localisation et de l’instant d’occurrence d’un défaut ; il suit la détection de défauts et inclut l’isolation et l’identification.
- **Effet de défaillance :**
La conséquence d’un mode de défaillance sur l’opération, la fonction, ou le statut d’une variable.

- **Modèle qualitatif :**
Un modèle de système décrivant le comportement avec des relations entre des variables et des paramètres du système en termes heuristiques tels que des causalités ou des règles.
- **Modèle quantitatif :**
Un modèle de système décrivant le comportement avec des relations entre des variables et des paramètres du système en termes analytiques tels que des équations différentielles ou aux différences.
- **Modélisation du défaut :**
Détermination d'un modèle mathématique pour décrire un effet spécifique du défaut.
- **Reconfiguration :**
Changement de la structure et des paramètres du contrôleur. L'objectif original de commande est atteint bien que l'exécution puisse être dégradée.
- **Redondance analytique :**
Détermination d'une variable par la mesure ou par l'utilisation d'un modèle mathématique du processus considéré.
- **Résidu :**
Les signaux portants de l'information, basés sur l'écart entre les mesures et les calculs basés sur le modèle.
- **Seuil :**
La valeur limite de l'écart d'un résidu avec le zéro, ainsi s'il est dépassé, un défaut est déclaré comme détecté.

1.3 Méthodes de diagnostic

La stratégie de diagnostic et la forme sous laquelle la connaissance est disponible conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance. Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de la connaissance, on distingue deux types d'approches : les méthodes utilisant des modèles opératoires et celles utilisant des modèles de diagnostic (connues souvent sous les méthodes avec ou sans modèle).

1.3.1 Méthodes sans modèles

Décrit par un certain nombre de réalisations, les méthodes sans modèle comme l'indique leur nom, ne disposent pas de modèle opératoire. Autrement dit, on ne dispose pas de modèle décrivant le comportement normal et les comportements défectueux du système. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de

reconnaissance de formes [8] ou à l'intelligence artificielle [11].

La méthode sans modèle est utilisée dans le cas de systèmes complexes traitant des données très variées (analogique, numérique..) ou imprécises (bruit de mesure). L'objectif de la reconnaissance des formes consiste à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connues a priori. Par conséquent, ces techniques doivent connaître a priori tous les états de fonctionnement (normal et en défaut). La conception d'un système de diagnostic sans modèle se déroule en trois phases :

– *Phase d'analyse.*

Cette phase consiste à rassembler toutes les informations existantes sur le processus : les données des différents capteurs, les modèles des dispositifs, l'historique, l'expérience accumulée. A partir de cette phase doit sortir une définition précise des paramètres à observer ou qui représentent les modes de fonctionnement. Une suite d'observations du même mode ne se trouve pas en un seul point, mais occupe une zone de l'espace des observations. Ceci est dû au bruit inhérent au niveau des différentes mesures. Il s'agit donc d'associer à chaque forme observée un mode ou une classe. Après avoir représenté les modes par des paramètres significatifs, on essaye d'avoir le maximum de données sur chacun des modes observables ; c'est la phase d'apprentissage.

– *Phase de choix d'un système de détection.*

Les frontières entre les classes sont définies dans cette phase. Un système de décision capable de décider de l'appartenance ou non d'une nouvelle observation à une des classes existantes est créé. De nombreuses solutions servant à définir le système de décision peuvent être retenues [8]. On cite d'une manière non exhaustive les méthodes de discrimination paramétrique avec rejet (supposent la connaissance totale des lois de probabilité régissant les observations et appliquées sous l'hypothèse gaussienne avec estimation des paramètres), les méthodes de discrimination non paramétrique (les lois de probabilité dans chaque classe sont inconnues mais peuvent être estimées par la méthode de Parzen ou celle des plus proches voisins), les méthodes se reposant sur le concept de distance (paramétrique ou non) et les méthodes recherchant les équations de frontières (délicate et largement heuristique).

– *Phase d'exploitation.*

C'est la phase d'implémentation du système de diagnostic afin de proposer une décision pour toute nouvelle observation effectuée. Le système doit adapter sa règle de décision en fonction des nouvelles classes détectées.

1.3.2 Méthodes avec modèles

Cette deuxième famille (où se situe d'ailleurs notre étude) se base sur l'existence de redondance matérielle ou analytique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système. Le principe de redondance consiste à déterminer la valeur des variables par différentes manières et à analyser si les résultats coïncident. La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs afin de mesurer la même variable. Ces capteurs in-

diquent en fonctionnement normal la même valeur aux bruits et imprécisions de mesure près. Une duplication des capteurs est nécessaire pour la détection de pannes simples. Cependant la localisation de la défaillance exige un minimum de trois capteurs, on procédera alors à un vote majoritaire. Cette méthode a été largement utilisée dans l'industrie car elle est facile à appliquer et est très fiable, cependant elle est très lourde et coûteuse. De plus elle n'est pas toujours applicable pour des raisons architecturales et matérielles et son champ d'application est limité aux seules défaillances capteurs. Contrairement à la redondance matérielle, la redondance analytique consiste à trouver des relations entre les variables connues du système (entrées et sorties). Bon nombre de travaux leur sont consacrés, citons les synthèses trouvées dans [14], [10], [27] et le livre pédagogique [22] pour les systèmes linéaires.

Dans ce cas, la génération des résidus peut être réalisée par différentes approches :

- Approche par estimation de paramètres (estimation paramétrique)
- Approche par estimation de l'état (observateur)
- Approche par espace de parité

Approche par estimation de paramètres : Les signaux d'entrées et de sorties du système sont utilisés pour estimer les différentes valeurs des paramètres du modèle analytique. Les paramètres du système sont estimés en utilisant des procédures d'identification. Les écarts entre les valeurs estimées et les valeurs de référence constituent les résidus. Lorsque les valeurs nominales ne sont pas connues, une autre approche consiste à les remplacer par des valeurs estimées précédemment. Dans ce cas, l'écart des résidus par rapport à zéro est le résultat des variations de paramètres. Ces écarts sont ensuite analysés par la théorie de décision [14], [15].

Approche par estimation de l'état : C'est l'approche duale à l'estimation des paramètres. Les techniques d'estimation d'état utilisent des données de base brute pour estimer l'état du système $x(t)$ et par voie de conséquence ses sorties $y(t)$. Celles-ci sont comparées aux sorties réelles : tout écart entre la valeur mesurée de la sortie et sa valeur réelle constitue un résidu.

Il existe deux classes d'approches, la première estime d'abord le vecteur d'état (observateur de Luenberger [21], filtre de Kalman [30] puis en déduit l'estimation des sorties par application de l'équation de mesure. L'autre approche utilise des observateurs qui estiment directement les sorties, ou plus généralement toute combinaison des variables d'état dont on connaît le comportement théorique en fonctionnement normal [2].

Approche par espace de parité : Cette approche conduit à une réécriture des équations d'état et de mesure, dans laquelle seules des variables connues (commandes et sorties) sont autorisées à figurer. Dans le cas linéaire, ces équations sont connues par les équations

de parité et relations de redondance analytique (RRA) dans le cas le plus général.

Un système est caractérisé par un ensemble de contraintes Φ appliquées à ensemble de variables V . V représente l'ensemble des variables connues K et inconnues W ($V = K \cup W$). La structure conduit à un "digraphe" dont la matrice d'incidence binaire représente les liens entre les variables (connues et inconnues) et les contraintes. Tout système peut être décomposé structurellement par une décomposition canonique en trois sous systèmes : un sous système sous déterminé ayant les contraintes Φ et les variables V avec ($\dim(V) > \dim(\Phi)$), un sous système juste déterminé ($\dim(V) = \dim(\Phi)$) et un sous système sur déterminé ($\dim(V) < \dim(\Phi)$). Ce dernier contient un sous système structurellement juste déterminé et quelques contraintes supplémentaires R sur les variables de ce sous-système. Ces contraintes, une fois leurs variables estimées en fonction des variables connues forment les propriétés d'invariance du système en état normal (les *RRAs*) sous la forme :

$$\phi(u(t, t - p), y(t, t - p)) = 0 \quad (1.1)$$

u et y représentent les commandes et les sorties connues sur une fenêtre temporelle $[t, t - p]$.

Comme cette égalité n'est jamais vérifiée (le système n'étant jamais dans des conditions de fonctionnement idéal), le vecteur des résidus aura la forme :

$$r = \phi(u(t, t - p), y(t, t - p)) \quad (1.2)$$

1.3.3 Modèles hiérarchiques

Dans ce cas, on décrit le processus de diagnostic par une approche fonctionnelle présentée sous forme d'une décomposition structurelle. La modélisation fonctionnelle [23] comme l'indique son nom se base sur la fonction du composant (i.e. stocker pour la fonction d'un réservoir,...). La modélisation téléologique, quant à elle, exprime la finalité du composant (la fonction téléologique d'une chaudière est la production de la vapeur). Cette fonction sert un projet, un but. Un réservoir peut avoir plusieurs fonctions téléologiques (en fonction de son utilisation et de l'interprétation de l'opérateur) par contre le type de transformation de l'énergie est indépendante de sa fonction.

Cette démarche entraîne une ambiguïté en raison de la subjectivité de la notion de fonction : il existe autant de fonctions que d'opérateurs.

Toutefois quelques travaux [5] associent des fonctions génériques issues des bond graphs afin de rendre la fonction plus objectives en introduisant les notions d'effort et de flux et les éléments bond graphs (R , C et I). Les modèles externes (utilisant la notion de services et de missions associées aux bonds graphs) trouvent aussi un intérêt dans cette approche [25].

1.4 Conclusion

Ce chapitre introductif se veut être une revue non exhaustive des méthodes de détection et de localisation de défauts. Nous avons expliqué, de façon sommaire, les outils dont nous disposons (redondance matérielle ou analytique) ainsi que les étapes méthodologiques (détection et localisation) à suivre pour mener à terme une démarche de diagnostic. Cependant, le diagnostic des systèmes à base de modèle par l'approche bond graph nécessite une connaissance approfondie des éléments de bases constituant ce langage. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les concepts de base de la modélisation des systèmes en utilisant l'outil Bond Graph.

2

Modélisation par Bond Graph

2.1 Introduction

Les procédés énergétiques possèdent un comportement fortement non linéaire dû principalement à l'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes de natures diverses et associant des composants technologiques qui mettent en oeuvre des énergies de natures différentes (mécanique, chimique, thermodynamique, etc.). Le comportement dynamique de ce type de système est décrit généralement par des équations différentielles non linéaires. La démarche classique basée sur les équations du premier principe (consistant à étudier les échanges en stationnaire ou en transitoire) devient compliquée en raison du caractère multiénergie et non stationnaire de ce type de procédé.

L'outil **bond graph (graphe de liaison ou graphe à liens)** à vocation pluridisciplinaire permet justement, par sa nature graphique, à l'aide d'un langage unifié, d'afficher explicitement la nature des échanges de puissance dans le système, tels que les phénomènes de stockage, de transformation et de dissipation d'énergie et de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'état. Par ailleurs, le modèle bond graph est évolutif, ce qui permet aisément d'affiner le modèle (en fonction des hypothèses de modélisation retenues) par simple ajout de nouveaux éléments (perte thermique, effet d'inertie, etc.) sans avoir à reprendre la démarche depuis le début.

Ce langage répond particulièrement bien à ces besoins par les caractéristiques suivantes :

- une approche énergétique qui permet une décomposition du système étudié en sous-systèmes qui échangent de la puissance et qui structurent la procédure de modélisation ;
- une terminologie unifiée pour tous les domaines physiques, fondée sur la notion d'analogie entre phénomènes ;
- une représentation graphique pour visualiser les transferts de puissance, mais aussi de causalité ;
- une souplesse inhérente qui permet de faire évoluer le modèle en ajoutant des phénomènes négligés ;
- une écriture systématique des équations mathématiques issues du modèle bond graph sous forme d'équations différentielles ;
- un support pour une analyse structurelle des propriétés du modèle en vue de la conception de systèmes de surveillance ou de commande.

2.2 Concepts et définitions : port, lien, bond graph

Afin d'introduire la méthodologie de l'outil bond graph, définissons d'abord les notions de multiports, liens et ports. Les éléments multiports sont les nœuds d'un graphe, ils sont représentés par des caractères alphanumériques. Par exemple sur la *figure 2.1a*, trois éléments multiports que nous désignons par **0**, **R** et **TF** sont représentés. Les ports de chaque multiport sont représentés par des segments, à l'aide desquels l'élément multiport peut être connecté à l'environnement. Ainsi, sur la *figure 2.1b*, l'élément **0** est à trois

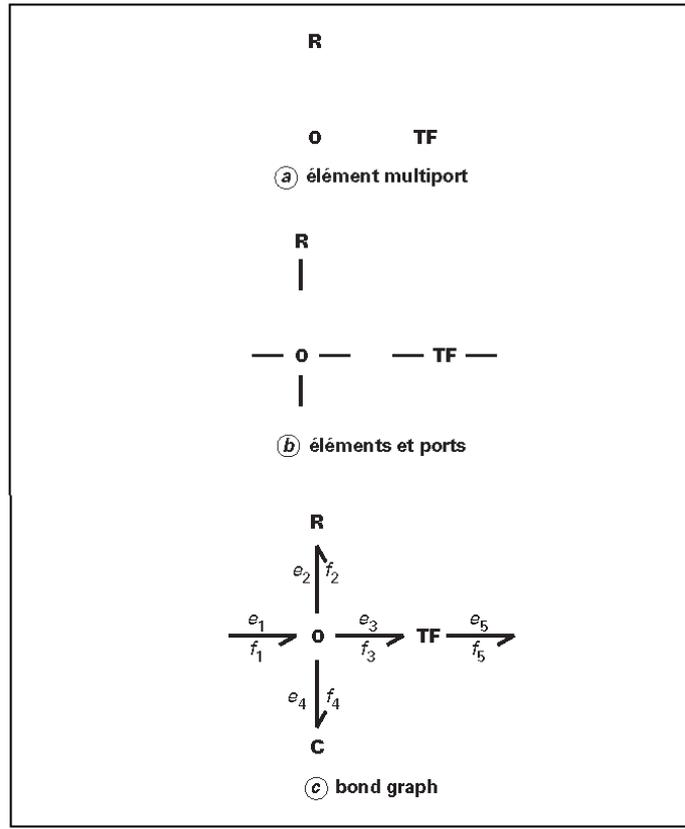


FIGURE 2.1 – Élément multiport (a), éléments et ports (b), Bond Graph (c)

ports, l'élément **R** à un port et l'élément **TF** possède deux ports. Les liens sont formés lorsque deux ports sont connectés entre une paire d'éléments multiports.

L'ensemble de ces multiports connectés entre eux par des liens représente le bond graph ou graphe de liaison ou graphe à liens (*figure 2.1c*). En bond graph, les liens (appelés liens de puissance) représentent la puissance ou le flux d'énergie échangé entre les deux multiports connectés. Cette puissance s'exprime comme le produit de deux variables complémentaires. Indépendamment du domaine physique considéré (thermique, électrique, chimique...), ces variables sont appelées variables généralisées d'effort et de flux notées respectivement par **e** et **f**. Ce lien (bond) porte les deux variables de puissance et est désigné par le symbole d'une demi-flèche comme indiqué sur la *figure 2.1c*. Par convention, le flux est toujours représenté du côté de la demi-flèche. La puissance instantanée en fonction du temps t rentrant ou sortant du port est le produit effort(e)-flux(f) :

$$Pu(t) = e(t) \times f(t) \quad (2.1)$$

La direction de la puissance positive est représentée par le sens de la demi-flèche. Une représentation bond graph permet de mettre en évidence quatre informations (*figure 2.2*) :

- la liaison physique entre les deux systèmes par le lien bond graph ;
- la causalité par le trait causal ;
- le type d'énergie utilisé par la nature des variables de puissance et enfin la direction de la puissance transmise par la direction de la demi-flèche.

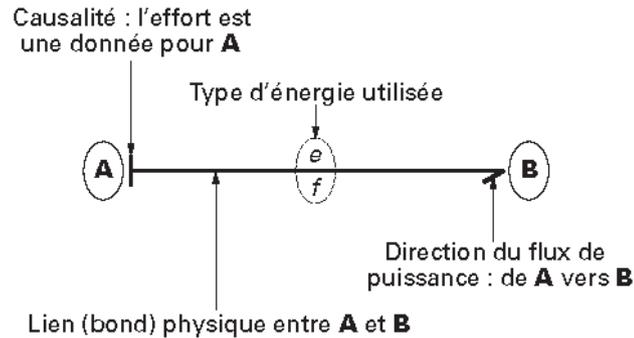


FIGURE 2.2 – Informations fournies par une représentation bond graph

2.3 Variables d'énergie et de puissance

2.3.1 Vrais bond graphs

Les variables d'effort et de flux pour quelques domaines physiques sont données par la *table 2.1*. Le produit effort-flux est une puissance, ce type de bond graph est alors appelé vrai bond graph.

TABLE 2.1 – Variables généralisées d'effort et de flux en vrai bond graph

Domaine physique	Effort	Flux
Électrique	Tension u (V)	Courant i (A)
Mécanique de translation	Force F (N)	Vitesse de translation \dot{x} (m/s)
Mécanique de rotation	Couple Γ (N · m)	Vitesse angulaire ω (rad/s)
Hydraulique	Pression P (Pa)	Débit volumique V (m^3/s)
Thermique	Température T (K)	Flux d'entropie \dot{S} (J/(K·s))
Chimique(transformation)	Potentiel chimique μ (J/mol)	Flux molaire \dot{n} (mol/s)
Chimique(cinétique)	Affinité chimique A (J/mol)	Vitesse de la réaction $\dot{\xi}$ (mol/s)

En plus des variables de puissance (effort et flux), deux autres types de variables sont importants pour la description dynamique des systèmes. Ces variables sont appelées des

variables d'énergie. Ces variables dites d'énergie notées $p(t)$ et $q(t)$ sont appelées respectivement moment généralisé ou impulsion et déplacement généralisé. Elles sont définies par les relations intégrales des variables de l'effort et du flux comme suit :

$$p(t) = \int_{t_0}^t e(t)dt = p_0 + \int_{t_0}^t e(t)dt \quad (2.2)$$

$$q(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt = q_0 + \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (2.3)$$

Les relations 4.2 et 4.3 peuvent être réécrites différemment en utilisant une forme différentielle :

$$\frac{dp(t)}{dt} = e(t) \Rightarrow dp = e(t)dt \quad (2.4)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = f(t) \Rightarrow dq = f(t)dt \quad (2.5)$$

L'énergie $E(t)$ est calculée par intégration de la puissance :

$$E(t) = \int P_U(t)dt = \int e(t)f(t)dt \quad (2.6)$$

Il est aisé, en utilisant les relations (4.15) et (2.5), d'exprimer l'énergie E en fonction de l'une des variables d'énergie dans les équations (4.2) et (4.3) :

$$E(t) = \int e(t)dq(t) = \int f(t)dp(t) \quad (2.7)$$

Par ailleurs, les variables d'effort $e(t)$ et de flux $f(t)$ peuvent être exprimées en fonction, respectivement, des variables de déplacement $e = e(q)$ et d'impulsion $f = f(p)$. Alors l'énergie E peut être exprimée non seulement en fonction du temps, mais aussi en fonction de l'une des variables d'énergie p et q :

$$E_p(q) = \int e(q)dq \quad (2.8)$$

$$E_c(p) = \int f(p)dp \quad (2.9)$$

Les équations (2.8) et (2.9) motivent l'appellation de p et q comme variables d'énergie en distinction des variables de puissance e et f .

Les variables dites d'énergie pour différents domaines physiques sont données par le *tableau 2.2*. Dans le domaine de la chimie et de la thermique, les variables de moment généralisé p ne sont pas définies car il n'est pas possible d'exprimer les variables d'effort (température ou potentiel chimique) en fonction de la dérivée de la variable complémentaire de flux (flux d'entropie ou flux molaire) comme c'est le cas en mécanique pour la loi de la masse M ou en électricité pour le cas d'une bobine d'inductance L :

$$F = M \frac{d\dot{x}}{dt}, u = L \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

TABLE 2.2 – Variables généralisées de moment et de déplacement en vrai bond graph

Domaine physique	Moment	Déplacement
Électrique	Flux magnétique $\phi(Wb)$	Charge $q(C)$
Mécanique de translation	Moment $J(N\cdot s)$	Élongation $x(m)$
Mécanique de rotation	Moment angulaire $\Omega(N\cdot m\cdot s)$	Angle θ (rad)
Hydraulique	Impulsion de pression $P_p(N \cdot s/m^2)$	Volume (m^3)
Thermique	-	Entropie S (J/K)
Chimique	-	Nombre de moles n

2.3.2 Pseudo bond graphs

Pourquoi les pseudo bond graphs ?

L'outil bond graph permet de modéliser parfaitement les systèmes mécaniques et électriques. Pour ces systèmes, les variables d'effort et de flux sont respectivement tension-force et intensité du courant-vitesse. Ces systèmes sont décrits par un vrai bond graph dont le produit effort-flux est la puissance instantanée sur un lien ou un port d'un composant du système.

Dans les systèmes thermodynamiques et plus globalement en génie des procédés et énergétique, l'utilisation de vrais bond graphs introduit des variables d'effort et de flux thermique et chimique (température, potentiel chimique, et flux d'entropie, flux molaire) qui sont de nature complexe et inadaptées aux problèmes de simulation, non accessibles aux mesures, car ils n'obéissent pas à des lois de conservation simples. On introduit alors pour leur modélisation un pseudo bond graph pour lequel le produit des variables d'effort et de flux n'a plus la dimension d'une puissance. Toutefois, il faut noter que les propriétés classiques (causales, structurelles, mise en équations...) déduites d'un vrai bond graph restent valables pour un pseudo bond graph.

Variables de puissance et d'énergie en pseudo bond graphs

En thermodynamique, les variables, dont l'uniformité est nécessaire pour réaliser l'équilibre d'un système, sont appelées intensives ou de tension. Elles correspondent aux variables d'effort (terme plus général que tension en bond graph). C'est le cas de la température, de la pression, des concentrations ou du potentiel chimique. D'autres variables telles que le volume, la masse, la charge électrique, l'énergie interne, l'entropie... sont des variables extensives. Les variables extensives correspondent aux variables de déplacement (l'intégrale du flux) en bond graph.

Dans les systèmes électriques ou mécaniques, un seul domaine physique est impliqué et deux variables duales sont impliquées : tension-courant ou force-vitesse. En thermodynamique, trois domaines physiques sont impliqués : le thermique, le fluide et le matériel ou le chimique.

Sur le *tableau* 4.3 sont représentées les variables de puissance et d'énergie en pseudo bond graph utilisées en génie des procédés.

En thermique, le produit des variables effort flux ($T\cdot\dot{Q}$) n'a pas la dimension d'une puissance, la puissance correspond plutôt à la variable du flux \dot{Q} .

TABLE 2.3 – Variables généralisées pseudo bond graph

Domaine	Effort (e)	Flux (f)	Déplacement q	Impulsion p
Chimique	Concentration C (mol/m ³)	Flux molaire \dot{n} (mol/s)	Nombre de moles n	–
Hydraulique	Pression P (N/m ²)	Débit massique \dot{m} (kg/s)	Masse m (kg)	Impulsion de pression p [(N · s)/m ²]
Thermique :				
– conduction	Température T (K)	Flux thermique \dot{Q} (J/s)	Quantité de chaleur Q (J)	–
– convection	Température T (K)	Flux d'enthalpie \dot{H} (J/s)	Énergie interne U (J)	–

2.4 Éléments du langage bond graph

On définit dans cette partie l'ensemble des multiports nécessaires pour la modélisation d'un système physique d'une manière générique en utilisant les variables généralisées d'effort et de flux.

Ces éléments de base se classifient en :

- trois éléments passifs (**R** , **C** et **I**) ;
- deux éléments actifs (**Se** et **Sf**)
- quatre jonctions (**1** , **0** , **TF** et **GY**).

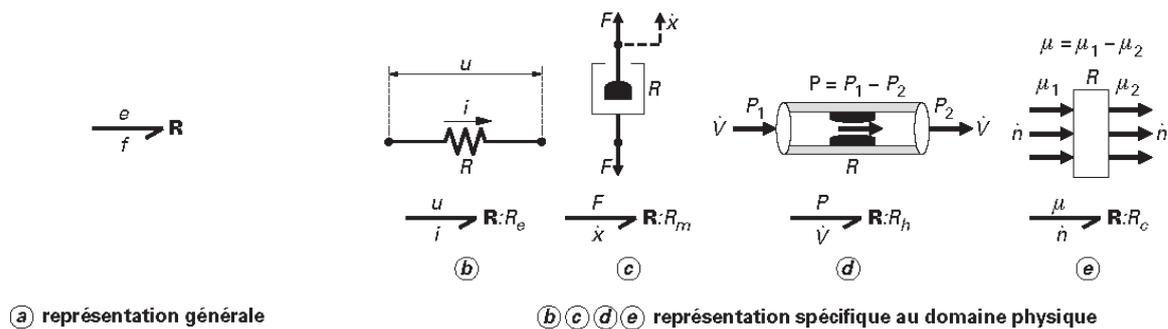


FIGURE 2.3 – Élément R à 1 port

2.4.1 Éléments passifs 1 port

Les éléments sont dits passifs car ils transforment la puissance qui leur est fournie en puissance dissipée (**élément R**), stockée sous forme d'énergie potentielle (**élément C**) ou cinétique (**élément I**). Ces éléments sont généralement à 1 port dans le cas des systèmes monoénergétiques car ils reçoivent de la puissance par un seul lien. Comme la puissance est fournie à ces éléments, la demi-flèche est orientée vers l'élément.

Éléments R

L'élément **R** à 1 port modélise tout phénomène qui dissipe de l'énergie : la puissance qui lui est fournie est transformée en énergie thermique dissipée. Notons que le terme dissipatif est beaucoup plus large en bond graph que le sens habituel. Il concerne aussi

les éléments décrits par une relation liant les variables d'effort et de flux. Cet élément est représenté en bond graph par la *figure 2.3a*. À titre d'exemple (*figure 2.3*), citons les résistances électriques, les frottements visqueux mécaniques, les restrictions hydrauliques, les membranes chimiques séparant deux solutions de potentiels chimiques différents. On représente par \mathbf{R} le type de phénomène identifié et par R_e, R_m, R_h ou R_c la valeur du paramètre intervenant dans l'écriture de la loi en linéaire pour les différents domaines physico-chimiques (*figure 2.3b, c, d, e*). La loi générique qui le caractérise est une relation statique liant l'effort et le flux :

$$\phi_R(e, f) = 0 \quad (2.11)$$

Cette loi linéaire ou non linéaire s'écrit par exemple :

$$u = R_e i \text{ (loi d'ohm),}$$

$$F = R_m \dot{x} \text{ (en mécanique),}$$

$$P = R_h \dot{V}^2 \text{ (en hydraulique : loi de Bernoulli).}$$

Processus de conduction thermique en énergétique

Afin d'introduire la notion d'élément R en énergétique, examinons la modélisation de la matière au repos (problème de conduction) qu'on rencontre en général dans les parois des échangeurs de chaleur, dans les fours, dans les phénomènes de pertes thermiques à travers les parois etc. Dans ce cas, on peut utiliser aussi bien la paire température-flux d'entropie (T, \dot{S}) pour constituer un vrai bond graph que la paire température-flux thermique (T, \dot{Q}) pour un pseudo bond graph. Par analogie avec l'électricité, nous définissons le flux de chaleur \dot{Q} (quantité de chaleur transmise par unité de temps) comme une puissance résultant du produit d'une "tension" T et " d'un courant " \dot{S} :

$$\dot{Q} = T \cdot \dot{S} \quad (2.12)$$

Le flux thermique est ici une puissance et est exprimée en joules par seconde (J/s) ou en watts (W), la température T (effort) est exprimée en kelvins (K) et le flux d'entropie \dot{S} en W/K . Cette équation (2.12), appelée parfois **équation de Carnot** , est le fondement de toute la thermodynamique. L'équation de Carnot est analogue à celle exprimant la puissance P_U électrique :

$$P_U = ui$$

Comme le courant électrique i est le flux de la charge électrique, le courant thermique est le flux de l'entropie, ceci est vrai car le flux de chaleur est une puissance thermique.

Sur la *figure 2.4a* est schématisé un système thermique représentant deux chambres 1 et 2 bien calorifugées portées à des températures absolues T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$) et échangeant un flux de chaleur à travers une paroi de résistance thermique R_t . L'inverse de R_t ($1/R_t$) sera noté K_t et représente la conductance thermique, notion analogue

à la conductance dans le domaine électrique. L'utilisation de la paire température-flux thermique (T, \dot{Q}) pour un pseudo bond graph est assez commode. En effet, le flux de chaleur échangé entre les deux chambres est décrit par une simple équation constitutive en pseudo bond graph, analogue à la loi d'ohm en électricité :

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_t}(T_1 - T_2) = K_t(T_1 - T_2) \Leftrightarrow \phi_R(T_1 - T_2, \dot{Q} = 0) \quad (2.13)$$

Cette équation (2.13) se représente facilement par un modèle bond graph (*figure 2.4b*). Les éléments "1" (respectivement "0") sur les modèles bond graphs (*figure 2.4b* et *d*) sont des jonctions permettant de coupler les composants physiques (éléments bond graph) lorsqu'ils sont soumis à un même flux (respectivement à un même effort). L'équation (2.13) est bien une relation algébrique d'un élément \mathbf{R} liant l'effort $(T_1 - T_2)$ analogue à une différence de potentiel et le flux \dot{Q} analogue à un courant électrique.

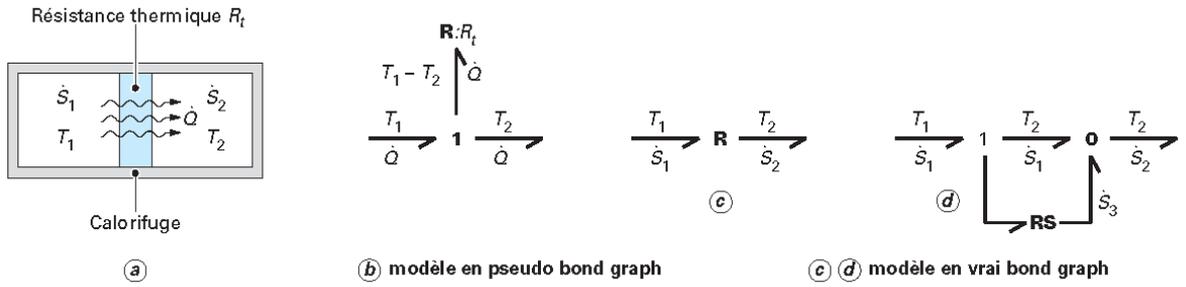


FIGURE 2.4 – Modèle en pseudo et en vrai bond graph du processus de conduction

En revanche, l'utilisation du flux d'entropie conduit à écrire les lois sous une forme non linéaire plus complexe. En effet, en supposant que le flux de chaleur fourni par la chambre 1 est instantanément égal au flux de chaleur récupéré par la chambre 2, on peut écrire :

$$T_1 \dot{S}_1 = \dot{Q} = T_2 \dot{S}_2 \quad (2.14)$$

Le flux d'entropie nette créé est :

$$\Delta \dot{S} = \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \frac{\dot{Q}}{T_2} - \frac{\dot{Q}}{T_1} = \dot{Q} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = K_t \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_2 T_1} \geq 0 \quad (2.15)$$

$\Delta \dot{S}$ est bien positif puisque il y a création d'entropie ($\dot{S}_2 > \dot{S}_1$). L'expression (2.15) est aussi une équation constitutive d'un élément \mathbf{R} , liant les flux d'entropie et l'effort (température). Toutefois, cette résistance thermique est à deux ports et est représentée par le modèle bond graph de la *figure 2.4c*. Cette résistance à deux ports, conservative de puissance a la particularité suivante : le flux d'entropie \dot{S}_2 quittant le multiport \mathbf{R} est supérieur au flux d'entropie \dot{S}_1 rentrant dans \mathbf{R} . Lorsque la résistance \mathbf{R} est un composant physique d'un système, l'entropie du système tend à augmenter chaque fois qu'un flux de chaleur \dot{Q} circule au travers de cet élément \mathbf{R} . La génération de l'entropie $\dot{S}_3 = \dot{S}_2 - \dot{S}_1$

(figure 2.4d) déduite de la jonction "0" peut être explicitement mise en évidence par le modèle bond graph.

L'autre complexité de la relation (12) provient du calcul numérique de l'effort $(T_1 - T_2)$. Ce problème de causalité sera discuté au paragraphe 2.4.

Élément C

L'élément **C** à 1 port modélise tout système qui transforme la puissance qui lui est fournie en énergie potentielle stockée. Sur la figure 2.5 sont données les représentations générale et spécifique à quelques domaines physiques de cet élément du bond graph. La loi générique qui le caractérise est une relation dynamique liant l'intégrale du flux (soit le déplacement généralisé) et l'effort :

$$\phi_C(e, \int f(t)dt) = \phi_C(e, q) = 0 \quad (2.16)$$

Dans le cas linéaire, la loi générique s'écrit :

$$\begin{aligned} u - \frac{q}{C} &= 0 \text{ en électricité,} \\ P - \frac{\rho g}{A} V &= 0 \text{ en hydraulique,} \\ F - kx &= 0 \text{ en mécanique.} \end{aligned}$$

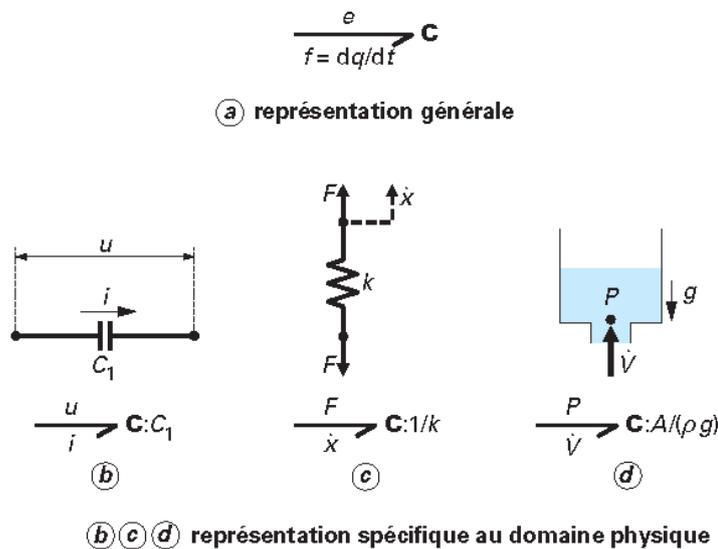


FIGURE 2.5 – Élément C à 1 port

La capacité C_1 d'un condensateur **C** est analogue à l'inverse de la raideur k d'un ressort appelée compliance et analogue à la constante $A/(\rho g)$ d'un réservoir cylindrique de section A et rempli d'un fluide de masse volumique ρ . Sur la base de l'équation 2.8, sachant que

$V \equiv q$ et $P(V) = \frac{\rho g}{A} V = \frac{V}{C}$, on déduit par exemple l'énergie potentielle gravifique stockée par une capacité hydraulique (réservoir) de section A (*figure 2.5d*) :

$$E_p(q) = \int_{q_0}^{q_1} e(q) dq = \int_{V_0}^{V_1} P(V) dV = \frac{1}{A} \rho g (V_1^2 - V_0^2) \quad (2.17)$$

L'énergie potentielle stockée est représentée sur la *figure 2.6* par la surface bleutée dans le cas linéaire (a) et non linéaire (b).

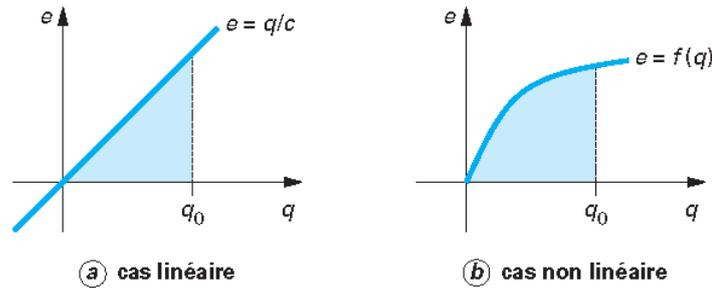


FIGURE 2.6 – Énergie stockée par un élément C dans le cas linéaire et non linéaire

Pour définir l'élément C dans le domaine thermique, considérons un corps porté à une température uniforme par un flux de chaleur \dot{Q} (*figure 2.7*). La température T du corps dépend de la quantité de chaleur accumulée :

$$Q = \int_{t_0}^t \dot{Q} dt + Q_0 \quad (2.18)$$

En supposant que la capacité thermique C_t globale du corps reste constante, la température sera :

$$T = T_0 + \frac{Q}{C_t} \quad (2.19)$$

Cette relation est bien une relation constitutive d'un élément pseudo bond graph liant la variable de déplacement Q (intégrale du flux \dot{Q}) et la variable de l'effort (la température T) (*figure 2.7b*).

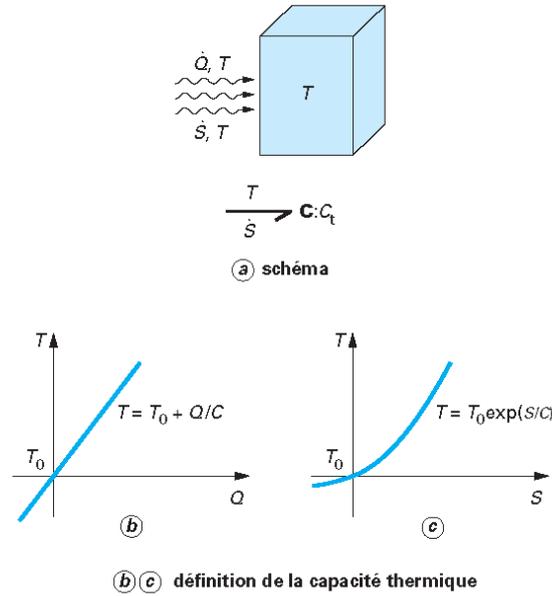


FIGURE 2.7 – Élément C thermique

Déterminons la relation constitutive de l'élément C en vrai bond graph en utilisant la paire (T, \dot{S}) . En utilisant les équations de Carnot (2.12) et (2.19), on déduit :

$$S = \int_0^S dS = \int_0^Q \frac{dQ}{T} = \int_0^Q \frac{dQ}{T_0 + \frac{Q}{C_t}} = C_t \left[\ln \left(T_0 + \frac{Q}{C_t} \right) - \ln T_0 \right] \quad (2.20)$$

d'où :

$$T = T_0 \exp \frac{S}{C} \quad (2.21)$$

qui représente une relation liant la variable généralisée de déplacement (entropie S) et l'effort (température T). Son graphe est donné par *figure 2.7c*.

Élément I

L'élément **I** (inertie) est aussi un élément de stockage d'énergie. L'élément **I** transforme la puissance qui lui est fournie en énergie cinétique pour les systèmes mécaniques et magnétiques pour les systèmes électriques. Sur la *figure 2.8* sont données les représentations générale et spécifique à quelques domaines physiques de cet élément du bond graph. La loi générique qui le caractérise est une relation dynamique liant l'intégrale de l'effort (soit l'impulsion) et le flux :

$$\Phi_I \left(f, \int e(t) dt \right) = \Phi_I(f, p) = 0 \quad (2.22)$$

Dans le cas linéaire, la loi générique s'écrit :

$$u - L \frac{di}{dt} = 0 \text{ (soit } \phi - Li = 0 \text{) en électricité.}$$

$F - M\ddot{x} = 0$ (soit $p - Mx = 0$) en mécanique (*figure 2.8c*).

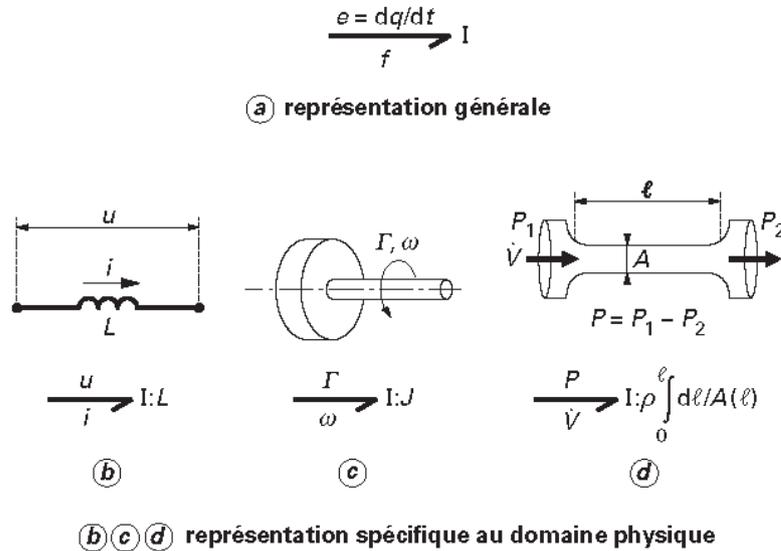


FIGURE 2.8 – Élément I à 1 port

En hydraulique l'inertie du fluide dans une conduite de longueur l et de section A (*figure 2.8d*) peut être déduite en considérant que la force motrice tendant à accélérer le fluide de masse ρAl est due à la différence de pression :

$$\rho Al \frac{d(\dot{V}/A)}{dt} = A(P_1 - P_2) = AP \Rightarrow \dot{V} = \frac{A}{\rho l} \int P dt = \frac{A}{\rho l} p \quad (2.23)$$

L'inertie du fluide est alors :

- Dans le cas d'un volume de section constante A :

$$I = \rho l/A$$

- Pour une section variable :

$$I = \rho \int_0^l \frac{dl}{A(l)}$$

2.4.2 Éléments actifs

Les éléments dits actifs sont ceux qui fournissent de la puissance au système. On distingue les sources d'effort \mathbf{Se} et de flux \mathbf{Sf} . Ainsi une pompe de pression \mathbf{P} (respectivement un générateur de tension u) supposée idéale modélisée par $\mathbf{Se} : P$ (resp. $\mathbf{Se} : u$) applique une pression (respectivement une tension) au circuit hydraulique (respectivement électrique) auquel il est connecté, ce qui entraîne la circulation d'un débit volumique \dot{V} (respectivement un courant i) : le produit ($P\dot{V}$) (respectivement ui) est la puissance instantanée fournie par cette source. Sur la *figure 2.9* sont représentés les symboles de ces

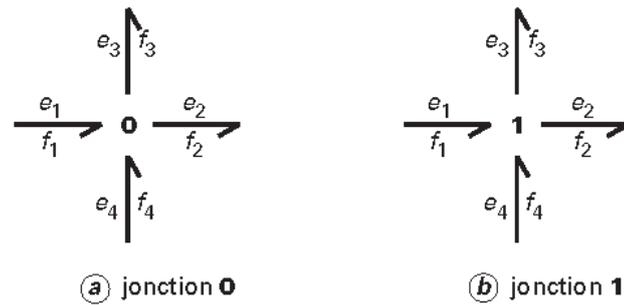


FIGURE 2.10 – Élément de jonction "0" et "1"

La pondération sur les flux (ou les efforts) se fait avec un signe (+) ou (-) suivant que la demi-flèche est entrante dans la jonction **1** (ou **0**) ou sortante.

La jonction **0** correspond en mécanique à des éléments en série (même force) et à des éléments en parallèle en électricité (même tension) et en hydraulique (même pression). La jonction **1** correspond en mécanique à des éléments en parallèle (même vitesse) et à des éléments en série en électricité (même courant) et en hydraulique (même débit volumique). Elles permettent une extension à tous les domaines de la physique des lois de Kirchhoff (loi des noeuds, loi des mailles) du domaine électrique. Des exemples de systèmes mécaniques et hydrauliques sont donnés par les *figures* 2.11 et 2.12.

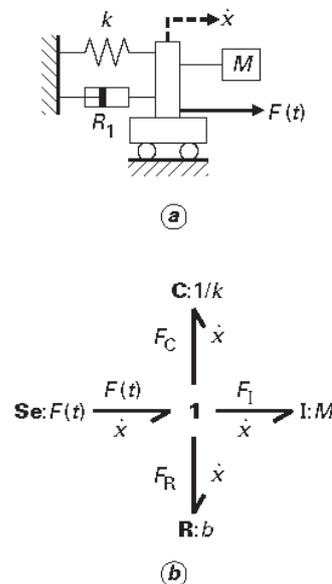


FIGURE 2.11 – Exemple de modèle Bond Graph d'un système mécanique

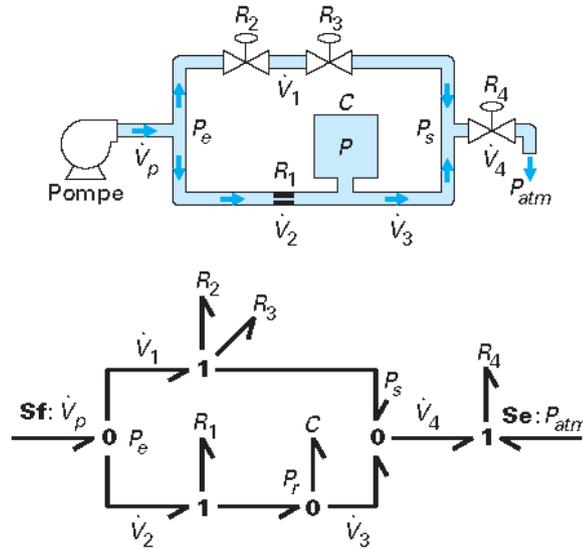


FIGURE 2.12 – Exemple de modèle Bond Graph d'un système Hydraulique

2.4.4 Transformateur (TF) et Gyrateur (GY)

Les phénomènes de transformation de puissance sont représentés par les éléments **TF** (transformateur) et **GY** (gyrateur). Ces deux éléments à deux ports sont représentés par la *figure 2.13*. À titre d'exemple d'un transformateur, on peut citer un bras de levier, un système de poulie ou un piston hydraulique pour représenter des transformations interdomaines (transformation de la puissance hydraulique en puissance mécanique dans le cas d'un vérin hydraulique *figure 2.13a*) ou de la puissance électrique en puissance mécanique dans le cas d'un moteur électrique (*figure 2.13b*). Les relations qui les caractérisent (pour dimensionner les modules m et r) sont pour le Transformateur :

$$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases} \quad (2.26)$$

car le transformateur conserve de la puissance :

$$e_1 f_1 = e_2 f_2 \Rightarrow \frac{e_1}{e_2} = \frac{f_2}{f_1} = m$$

et pour le **gyrateur** :

$$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \end{cases} \quad (2.27)$$

car, de la même manière, le gyrateur doit conserver la puissance :

$$e_1 f_1 = e_2 f_2 \Rightarrow \frac{e_1}{f_2} = \frac{e_2}{f_1} = r$$

Dans le cas du vérin hydraulique (*figure 2.13a*) le module m est l'inverse de l'aire du piston ($P = F/A$). Pour le gyrateur, r est le coefficient de proportionnalité liant le courant i et le couple Γ ($\Gamma = ri$).

Si r et m sont variables, les éléments **TF** et **GY** deviennent des transformateurs modulés (**MTF**) et gyrateurs modulés (**MGY**).

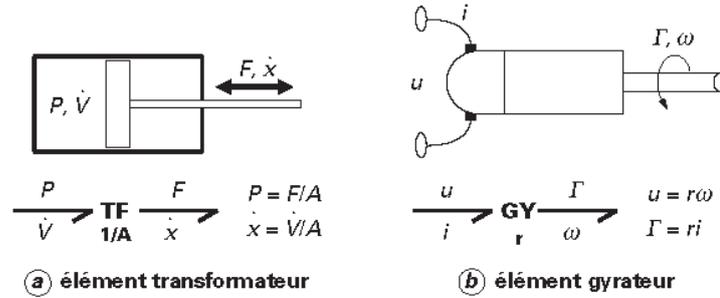


FIGURE 2.13 – Élément Transformateur et Gyrateur

2.4.5 Liens d'information

Lorsque aucune puissance n'intervient pas dans la modélisation d'un système physique ou lorsqu'une des deux variables effort ou flux est négligeable (puissance transmise négligeable), on utilise un lien d'information (*figure 2.14a*) et non un lien de puissance. Ce signal est représenté par une flèche entière. C'est le cas par exemple d'un signal fourni par un régulateur à une vanne automatique pour la régulation d'une variable. Les capteurs sont aussi considérés comme idéaux, ne consommant aucune puissance. Les capteurs appelés détecteurs de flux Df ou détecteur d'effort De suivant qu'ils mesurent la variable *effort* ou *flux* sont représentés respectivement par le symbole donné par les *figures 2.14b* et *c*. Le trait sur la flèche indique la causalité appliquée à l'élément. Ces notions de causalité sont développées dans la section suivante.

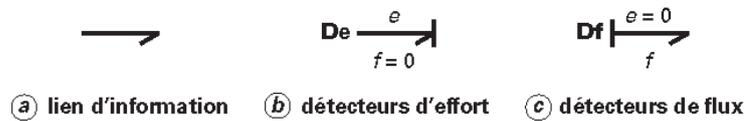


FIGURE 2.14 – Lien d'information, détecteurs d'effort et de flux

2.5 Causalités en Bond Graphs

Les éléments bond graphs présentés ci-dessus (§ 2.4) permettent de représenter l'architecture d'un système physique où apparaissent les échanges de puissance entre les éléments. Le modèle mathématique sera représenté par l'ensemble des équations mathématiques (algébriques, différentielles ou algébro-différentielles) déduites directement du modèle bond graph par les équations constitutives (des jonctions et des éléments). L'une des propriétés importantes du modèle bond graph est la causalité : en effet les bond graphs permettent de définir la structure de calcul et d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. Cela est un avantage évident sur les représentations graphiques.

Examinons la *figure 2.15*. Les deux systèmes **A** et **B** échangent de la puissance. Lors du calcul du modèle deux situations sont possibles :

- soit **A** applique un effort e à **B** qui réagit en envoyant à **A** un flux f (ce qui se traduit par le bloc diagramme *figure 2.15a1*) ;
- soit **A** fournit un flux f à **B** qui renvoie à **A** un effort e (ce qui se traduit par le bloc diagramme *figure 2.15b1*).

Ces deux schémas de simulations sont mis en évidence sur le modèle bond graph (*figures 2.15a2* et *2.15b2*) par la position du trait causal placé perpendiculairement à chaque lien, en suivant la convention schématisée par la *figure 2.15c*.

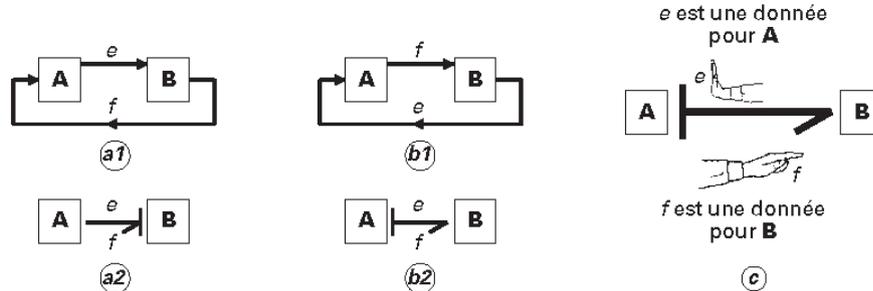


FIGURE 2.15 – Causalités en Bond Graphs

Le trait causal est placé près (respectivement loin) de l'élément pour lequel la valeur de la variable effort (respectivement flux) est une donnée.

La position de ce trait (qui concerne l'ordre de calcul) est indépendante du sens de la demi-flèche (qui montre la direction de la puissance).

Dans l'*Annexe A* sont résumées les règles de causalité des différents éléments bond graph.

Algorithme d'affectation des causalités

- Affecter la causalité obligatoire aux sources et aux éléments **R** non linéaires en respectant les contraintes de causalité aux jonctions (*Annexe A*).
- Affecter une causalité préférentielle intégrale aux éléments **I** et **C** en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.
- Compléter la causalité sur les éléments **R** linéaires.
- En cas de conflit de causalité sur une jonction reprendre à l'étape 2 et modifier la causalité sur l'élément **I** ou **C** cause du conflit.

2.6 Exemples de modélisation

2.6.1 Exemple 1

Considérons le mouvement d'une demi-caisse d'un véhicule (*figure 2.16*) soumise à l'effet des mouvements de la route sur les deux roues.

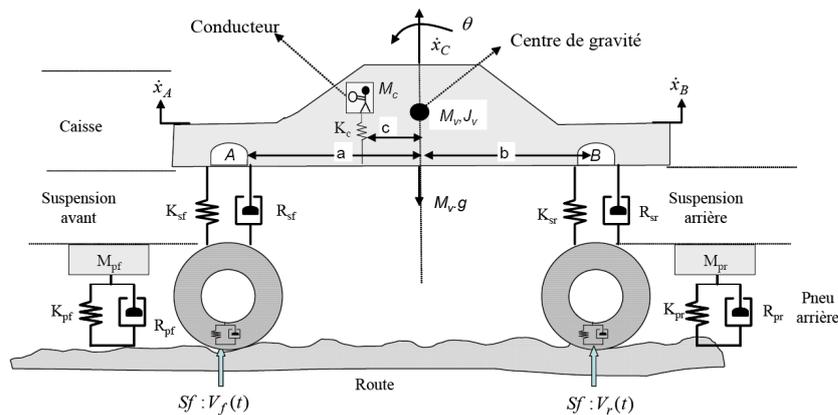


FIGURE 2.16 – Schéma de principe d'une demi-caisse d'un véhicule

Pour modéliser ce système en bond graph, on doit passer par l'étape de traduction du système considéré en phénomènes physique (résistif, capacitif,...). Le schéma mécanique du système considéré est donné par la *figure 2.17*.

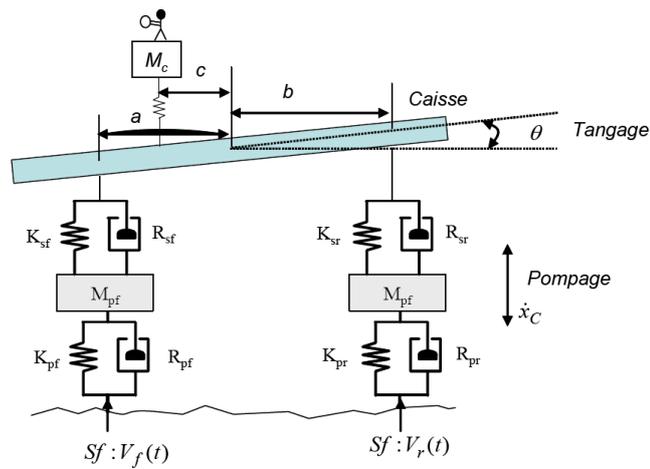


FIGURE 2.17 – Schéma mécanique de la suspension

Le modèle bond graph équivalent est représenté dans la *figure 2.18*.

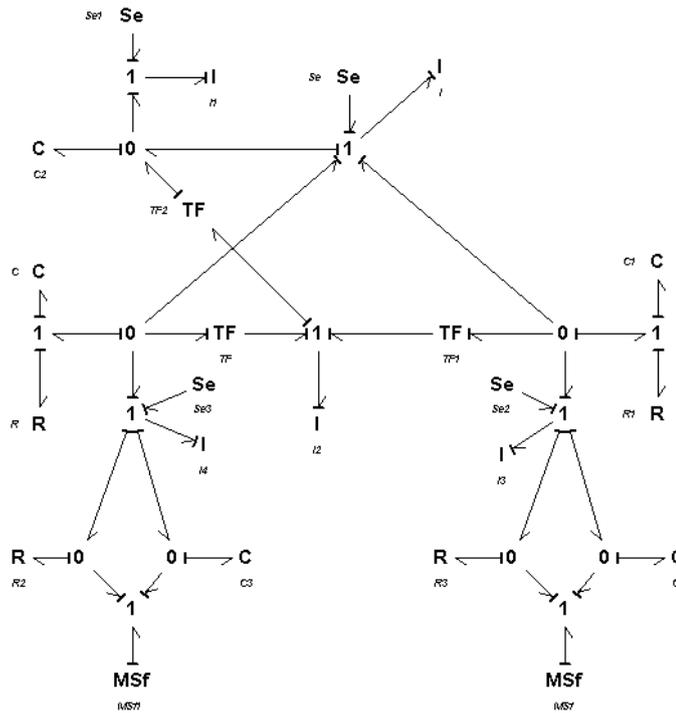


FIGURE 2.18 – Modèle Bond Graph de la suspension

Après l'ajout de quelques éléments pour la simulation(20-sim)[4], on trouve les résultats représentés dans les *figures 2.19* et *2.20*

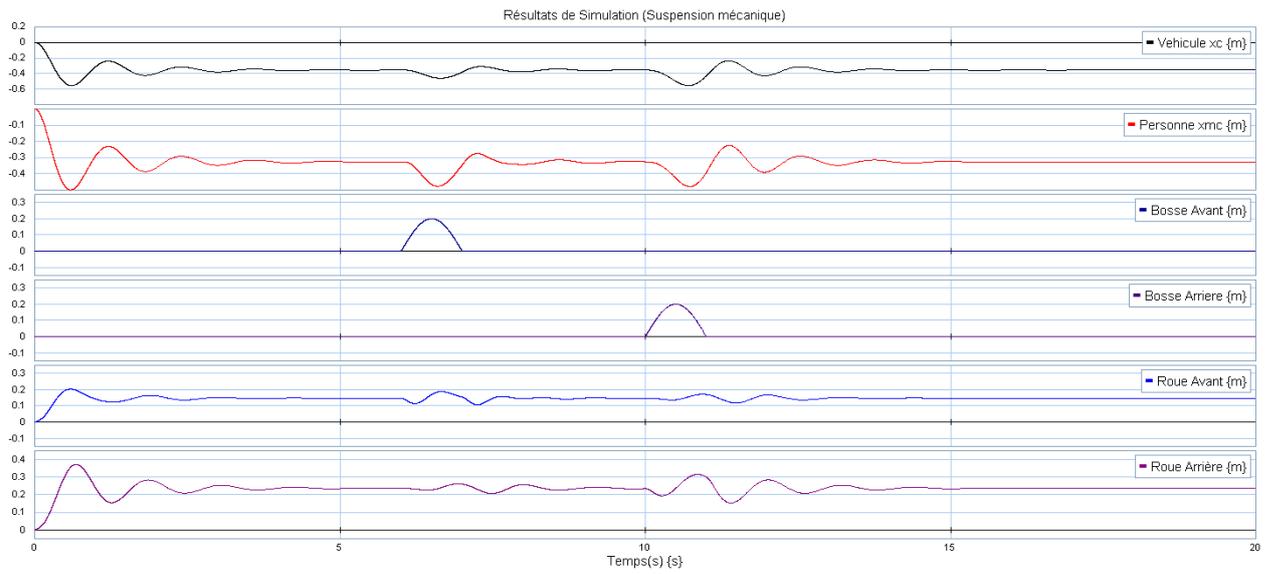


FIGURE 2.19 – Résultats de simulations de l'exemple de la suspension mécanique

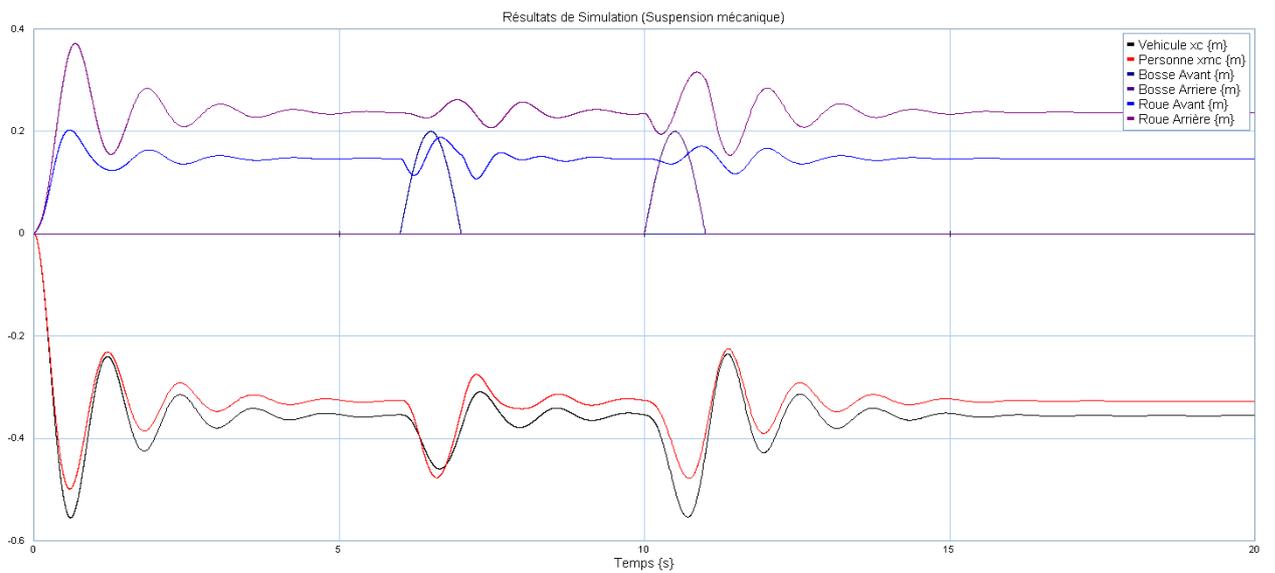


FIGURE 2.20 – Résultats de simulations de l'exemple de la suspension mécanique

2.6.2 Exemple 2

Soit le système hydraulique constitué de 2 cuves de la *figure 2.21a*.
Le modèle bond graph associé à ce système est représenté par la *figure 2.22*

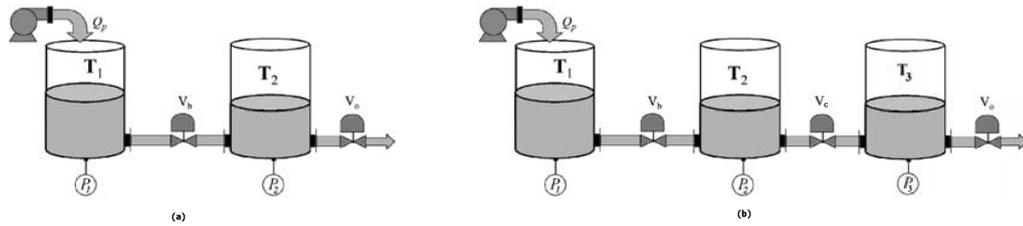


FIGURE 2.21 – Système Hydraulique (2 Cuves) (a) et à (3Cuves) (b)

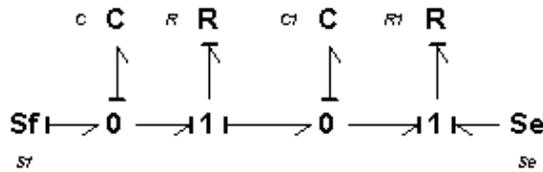


FIGURE 2.22 – Model bond Graph du Système Hydraulique (2 Cuves)

L'ajout d'une cuve pour ce système se traduit par un simple ajout de 2 éléments dans le modèle bond Graph de la *figure 2.22*, le modèle bond graph du système hydraulique à 3 cuves (*figure 2.21b*) est donné par la *figure 2.23*.

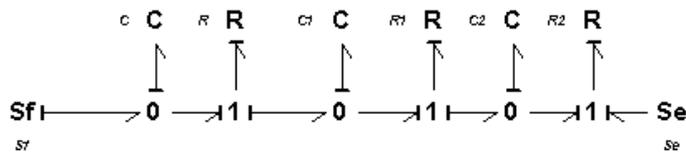


FIGURE 2.23 – Model bond Graph du Système Hydraulique (3 Cuves)

Le résultat de simulation du système à 3 cuves est représenté par la *figure 2.24*.

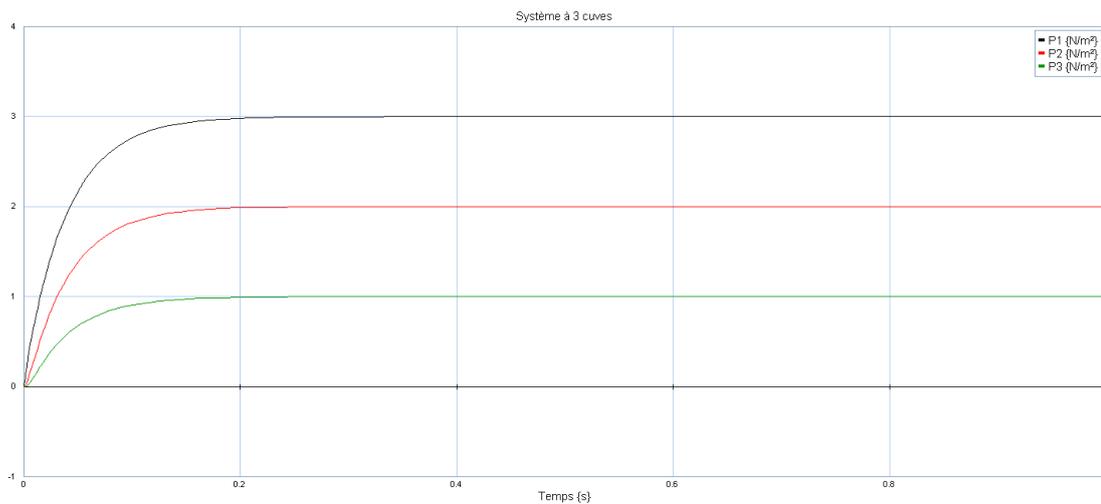


FIGURE 2.24 – Résultat de simulation du système hydraulique (3 Cuves)

2.7 Conclusion

La modélisation est une étape très importante dans un schéma de diagnostic, car les performances recherchées de détection et d'isolation de fautes dépendent fortement de la précision du modèle.

Le choix de l'outil bond graph pour le diagnostic, est dû à son aspect énergétique et multi physique. Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base de la modélisation des systèmes énergétiques par le langage Bond Graph. Le principe de causalité est aussi présenté, ce concept qui permet de transformer un modèle symbolique en modèle mathématique à fin de pouvoir le simuler par la suite. Des exemples de modèles Bond Graph ont été présentés à la fin du chapitre.

Dans le chapitre suivant on poursuit l'étude en présentant les méthodes de diagnostic à base des modèles Bond Graph.

3

Diagnostic Robuste par l'Approche Bond Graph

3.1 Introduction

Le diagnostic des systèmes par l'approche Bond Graph fait partie des méthodes basées sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système. Les méthodes analytiques font appel à une connaissance du système constituée par la formulation explicite d'un modèle analytique du système à surveiller. Le principe de base est fondé sur la prise d'informations, par le biais de capteurs, sur le processus à surveiller. La comparaison entre le comportement réel du processus et le comportement prédit par le modèle, fournit des informations contenues dans un ensemble de signaux indicateurs de défauts (résidus). L'analyse (temporelle ou fréquentielle) de ces signaux permet de détecter et éventuellement d'interpréter tout comportement anormal du système afin de localiser sa provenance.

D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph, un système de surveillance peut être illustré par la *figure 3.1*. On distingue essentiellement deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie (formée par le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde représente les signaux (le système d'information, c'est à dire les capteurs et le système de régulation).

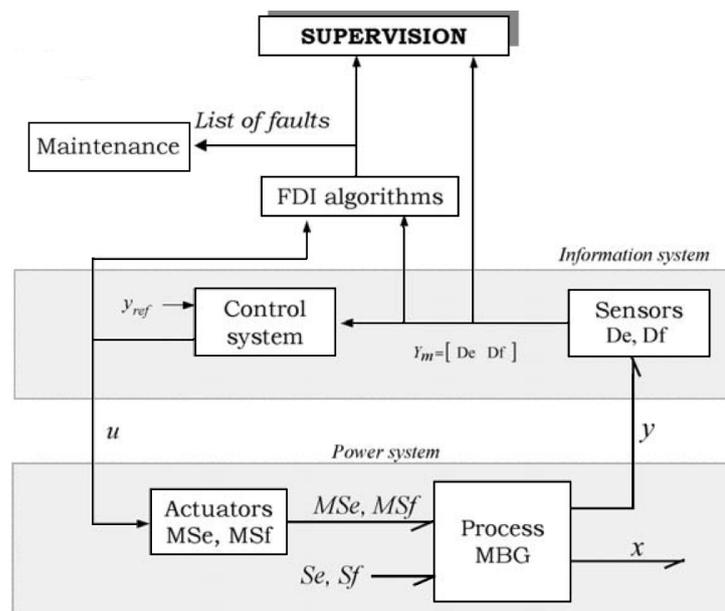


FIGURE 3.1 – Représentation bond graph d'un système de surveillance.

Le modèle bond graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graphs usuels (R , C , I , et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux). Les sources peuvent être simples (Se , Sf) ou modulées (MSe , MSf), c'est à dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien de puissance) traduite par les variables d'effort et de flux. Dans le second système (sys-

tème d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche) qui est le même utilisé dans les blocs diagrammes classiques. Les algorithmes de surveillance (de détection et d'isolation de fautes FDI) reçoivent les informations en ligne issues des capteurs (détecteurs d'effort De et de flux Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défaillants sont transmises au service de maintenance. Dans les sections suivantes les différentes approches de FDI par bond graph sont présentées. On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus : l'approche quantitative et l'approche qualitative.

3.1.1 L'approche qualitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph

Cette approche ne nécessite pas un modèle très précis. Contrairement aux représentations de connaissances conventionnelles permettant de décrire la structure du système et son état par le biais de divers outils (schéma bloc, équations différentielles, ...), les bond graphs qualitatifs ne décrivent explicitement que la localisation des composants du système et leurs interconnexions. Par la suite, la surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif s'avère plus simple en comparaison avec les méthodes quantitatives car elle ne nécessite pas un modèle précis.

Ces modèles qualitatifs sont construits sans aucune considération des paramètres du système. Ils se basent sur des valeurs qualitatives (à la place des valeurs numériques) définies par l'ensemble $\{[1] [+]$ $[0]$ $[-]$ $[-1]$ $[?]\}$ représentant la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Les opérateurs sont ainsi qualitatifs, ils peuvent être définis en utilisant les opérateurs des nombres réels : $\{+, -, x, \div, =\}$ [12]. On résout alors un système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique (et de son ordre) d'occurrence de la faute [9]. D'autres auteurs utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance [18]. L'avantage que présente cette approche est qu'elle ne nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres. Toutefois cette approche devient complexe pour les processus multiénergie et présente d'autres inconvénients comme la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations [12].

3.1.2 L'approche quantitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph

Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus et celui du modèle numérique. Contrairement à l'approche qualitative, l'approche quantitative se base sur des lois physiques et nécessite donc une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Les modèles quelque

soient leurs formes (fonction de transfert, équations d'état, ...) sont obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) [13] ou sur la base d'une identification statistique des paramètres [19], [10].

Dans la suite de ce chapitre, nous allons exposer les méthodes de diagnostic à base de modèles en utilisant l'approche Bond Graph.

3.2 Observateurs à entrée inconnue

Un observateur est défini comme à entrée inconnue, si le vecteur erreur d'estimation d'état tend vers zéro asymptotiquement sans prendre compte des entrées inconnues (ex : perturbation) dans le système [20]. Soit le système LTI suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t), \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

où $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ vecteur d'entrée mesurable, $\nu(t) \in \mathfrak{R}^q$ vecteur de l'entrée inconnue, $y(t) \in \mathfrak{R}^p$ est le vecteur de sortie. L'observateur à entrée inconnue de ce système est le suivant :

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Nz(t) + Ly(t) + Gu(t), \\ x_0(t) &= z(t) - Ey(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

où $z(t) \in \mathfrak{R}^n$ est le vecteur d'état, les matrices N , L , G et E ont des dimensions appropriées et sont déterminées de telle façon que $x_0(t)$ converge asymptotiquement vers $x(t)$.

La dynamique de l'erreur est donnée par :

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - x_0(t) \\ \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{x}_0(t) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t) - \dot{z}(t) + E\dot{y}(t) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t) - Nz(t) - Ly(t) - Gu(t) \\ &\quad + EC(Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t)) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t) - Nx_0(t) + NEy(t) - Ly(t) - Gu(t) \\ &\quad + EC(Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t)) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t) - Nx_0(t) + NECx(t) - Ly(t) - Gu(t) \\ &\quad + EC(Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t)) \\ &= Nx(t) - Nx_0(t) - (NP + LC - PA)x(t) - (G - PB)u(t) + PD\nu(t) \\ &= Ne(t) - (NP + LC - PA)x(t) - (G - PB)u(t) + PD\nu(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

où $P = I + EC$ et $I \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ la matrice unitaire. L'erreur converge vers zéro ssi :

$$PD = D + ECD = 0 \quad (3.4)$$

$$NP + LC - PA = 0 \quad (3.5)$$

$$G - PB = 0 \quad (3.6)$$

La solution de l'équation 4.15 pour E peut s'écrire sous la forme :

$$E = -D(CD)^+ + Y(I_p - (CD)(CD)^+), \quad (3.7)$$

où $(CD)^+$ est l'inverse généralisée de CD , $I_p \in \mathbb{R}^{p \times p}$ unitaire, Y est une matrice arbitraire de dimension appropriée. La matrice G peut être tirée de l'équation 4.6 comme suit :

$$G = PB = B + ECB \quad (3.8)$$

L'erreur d'état converge vers zéro si les pôles de N sont stables. Soit K tel que :

$$N = PA - KC \quad (3.9)$$

L'équation est vérifiée ssi :

$$K = L + NE \quad (3.10)$$

$N = PA - KC = PA - (L + NE)C = PA - LC - NEC$, $\Rightarrow N + NEC = PA - LC$ ou $N(I + EC) = NP = PA - LC$. Et comme P est connue, les poles de N peuvent être placés en choisissant soigneusement la matrice K (équation 3.9). Les gains en boucle fermée de l'observateur sont :

$$\begin{aligned} L &= K - NE \\ &= K - (PA - KC)E \\ &= K(I + CE) - PAE \end{aligned} \quad (3.11)$$

Le calcul des matrice N , G et L termine la construction de l'observateur à entrée inconnue d'ordre complet .

Pour isoler le défaut des perturbations on doit redéfinir le système d'équation 4.1 de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t), \\ y(t) &= Cx(t) + G_d d(t) + G_f f(t), \end{aligned} \quad (3.12)$$

où $x(t)$ est le vecteur d'état, $y(t)$ le vecteur de sortie, $u(t)$ le vecteur des entrées connues, $d(t)$ le vecteur des entrées inconnues (perturbation), $f(t)$ le vecteur de défauts, les matrices $A, B, C, D, E_d, E_f, G_d$ et G_f sont constantes. Un observateur à entrée inconnue avec son générateur de résidus est défini par :

$$\begin{aligned} \dot{x}_0(t) &= H_x x_0(t) + H_u u(t) + H_y y(t), \\ r(t) &= M_x x_0(t) + M_y y(t) \end{aligned} \quad (3.13)$$

où H_x, H_u, H_y, M_x et M_y ont des dimensions appropriées. Soit l'erreur définie par $e(t) = x_0(t) - Tx(t)$, où T est une matrice de transformation. L'erreur d'estimation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 \dot{e}(t) &= \dot{x}_0(t) - T\dot{x}(t) \\
 &= H_x x_0(t) + H_u u(t) + H_y y(t) - TAx(t) - TBu(t) \\
 &\quad - TE_d d(t) - TE_f f(t) \\
 &= H_x x_0(t) - H_x T x(t) + H_x T x(t) + H_u u(t) \\
 &\quad + H_y (Cx(t) + G_d d(t) + G_f f(t)) - TAx(t) - TBu(t) \\
 &\quad - TE_d d(t) - TE_f f(t) \\
 &= H_x (x_0(t) - Tx(t)) + (H_x T + H_y C - TA)x(t) + (H_u - TB)u(t) \\
 &\quad + (H_y G_d - TE_d)d(t) + (H_y G_f - TE_f)f(t) \\
 &= H_x e(t) + (H_x T + H_y C - TA)x(t) + (H_u - TB)u(t) \\
 &\quad + (H_y G_d - TE_d)d(t) + (H_y G_f - TE_f)f(t).
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Le vecteur résidus est donné par :

$$r(t) = M_x e(t) + (M_y C - M_x T)x(t) + M_y G_d d(t) + M_y G_f f(t). \tag{3.15}$$

La convergence asymptotique de l'erreur et le découplage des perturbations sont vérifiées avec les conditions suivantes :

$$\begin{aligned}
 H_x &\text{ est stable,} \\
 TA &= -(H_x T + H_y C), \\
 TB &= H_u, \\
 H_y G_d - TE_d &= 0, \\
 M_y C - M_x T &= 0, \\
 M_y G_d &= 0.
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

L'erreur d'estimation ainsi que les résidus sont définis par :

$$\begin{aligned}
 \dot{e}(t) &= H_x e(t) + (H_y G_f - TE_f)f(t), \\
 r(t) &= M_x e(t) + M_y G_f f(t).
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Et Comme H_x est stable, dans le cas sain (sans défauts) $e(t) \rightarrow 0$ et $r(t) \rightarrow 0$ quand $t \rightarrow \infty$.

3.2.1 Application avec l'approche Bond Graph

Considérons le système traité dans le chapitre 2 (*figure 3.2*)

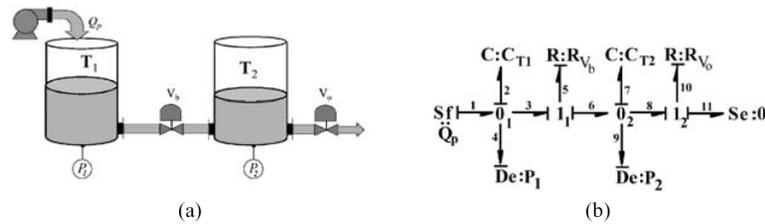


FIGURE 3.2 – Système à 2 cuves (a) Le Bond Graph équivalent (b).

Le modèle dans l'espace d'état est donné par :

$$\begin{Bmatrix} \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & \frac{1}{C_{T2}R_{vb}} \\ \frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & -\frac{1}{C_{T2}R_{vb}} - \frac{1}{C_{T2}R_{vo}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_2 \\ Q_7 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} Q_p. \quad (3.18)$$

On considère les éléments $C : C_{T1}$, $R : R_{vb}$, $C : C_{T2}$ et $R : R_{vo}$; des candidats de défauts, ce qui se traduit par : des fuites dans les cuves, et fuite/blocage dans la valve. Si le défaut est dans l'élément $R : R_{vb}$, alors la *figure 3.2b* montre que cet élément donne du flux au système. Cet élément peut être donc remplacé par une source de flux (*figure 3.3a*). Par la suite on procède à la construction d'un observateur à entrée inconnue (prenant en compte la nouvelle source de flux comme perturbation), alors le résidu prendra une valeur nulle si et seulement si l'élément $R : R_{vb}$ est en défaut. En suivant les même étapes, on peut construire l'observateur pour les autre combinaisons de défauts (*figure 3.3b et c*).

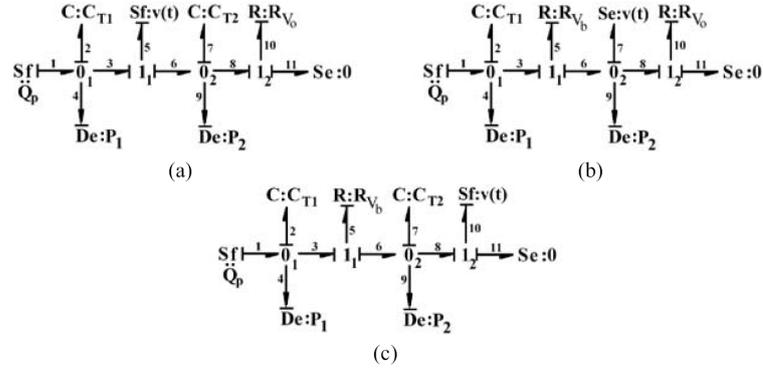


FIGURE 3.3 – Différents cas d'entrée inconnue pour les hypothèses de défauts considérées.

Pour la *figure 3.3a* le modèle dans l'espace d'état est le suivant :

$$\begin{Bmatrix} \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_{T2}R_{vo}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_2 \\ Q_7 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} Q_p + \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \nu(t). \quad (3.19)$$

Pour le modèle de la *figure 3.3b* :

$$\begin{Bmatrix} \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & 0 \\ \frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_2 \\ Q_7 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} Q_p + \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_{vb}} \\ -\frac{1}{R_{vb}} \end{bmatrix} \nu(t) \quad (3.20)$$

Et enfin la *figure 3.3c* donne :

$$\begin{Bmatrix} \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & \frac{1}{C_{T2}R_{vb}} \\ \frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & -\frac{1}{C_{T2}R_{vb}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_2 \\ Q_7 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} Q_p + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \nu(t). \quad (3.21)$$

On constate que la matrice A dans l'équation 3.18 est différente de celles trouvées dans les équations 3.19, 3.20, 3.21, dans chaque cas, on doit donc construire un observateur correspondant. Dans le cas du défaut dans l'élément $R : R_{vo}$, l'équation 3.18 peut être reformulée de la façon suivante :

$$\begin{Bmatrix} \dot{Q}_2 \\ \dot{Q}_7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & \frac{1}{C_{T2}R_{vb}} \\ \frac{1}{C_{T1}R_{vb}} & -\frac{1}{C_{T2}R_{vb}} - \frac{1}{C_{T2}R_{vo} + \Delta R_{vo}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_2 \\ Q_7 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} Q_p. \quad (3.22)$$

ou bien,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \Delta Ax(t), \\ &= Ax(t) + Bu(t) + D\nu(t), \end{aligned} \quad (3.23)$$

Où ΔA représente le chagement dans la matrice A dû à un défaut paramétrique, son effet se traduit par une entrée inconnue.

La formulation présentées dans l'équation 3.23 peut être implémentée dans le modèle Bond Graph par l'ajout approprié de sources d'effort et de flux. Le modèle Bond Graph modifié pour un défaut dans $R : R_{vb}$ et $C : C_{T2}$ respectivement est représenté dans les figures 3.4a et b.

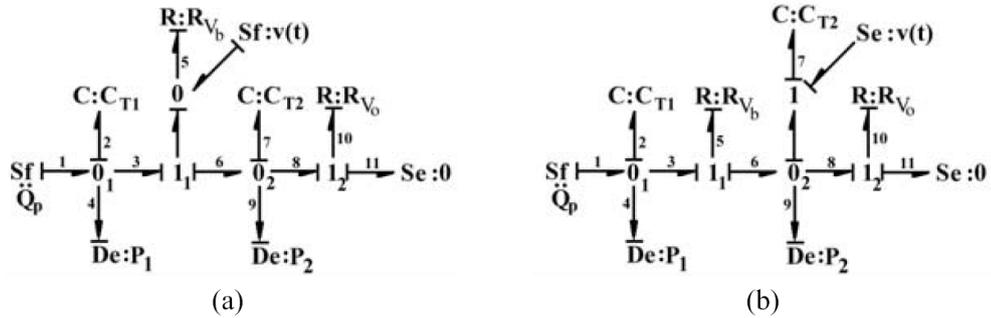


FIGURE 3.4 – Bond Graph avec entrées inconnues.

3.2.2 Conclusion

La représentation des entrées inconnues dans un modèle bond graph ne permet pas de généraliser la méthode pour concevoir des observateurs à entrées inconnues d'une façon directe (à partir du modèle bond graph). La construction des observateurs doit nécessairement passer par l'étape d'écriture des équations d'états à partir du modèle. Dans ces conditions, l'utilisation de l'approche Bond Graph n'est pas pratique. Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter d'autre approches pour un diagnostic à base du modèle Bond Graph.

3.3 Résidus dans l'espace de parité

Considérons le système LTI suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + G_d d(t) + G_f f(t), \end{aligned} \quad (3.24)$$

Dans les conditions de fonctionnement normal $f(t) = 0, \forall t$. On suppose dans un premier temps que $(d(t) = 0, f(t) = 0)$.

$$\begin{aligned} y(t) &= Cx(t) + Du(t) \\ \dot{y}(t) &= C\dot{x}(t) + D\dot{u}(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

En remplaçant $\dot{x} = Ax(t) + Bu(t)$ dans l'équation 3.25 et en dérivant jusqu'à l'ordre m :

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= CAx(t) + CBu(t) + D\dot{u}(t), \\ \ddot{y}(t) &= CA^2x(t) + CABu(t) + CB\dot{u}(t) + D\ddot{u}(t), \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ y^m(t) &= CA^m x(t) + CA^{m-1}Bu(t) + \dots + CBu^{m-1}(t) + Du^m(t), \end{aligned} \quad (3.26)$$

Si la matrice A est de plein rang, on peut alors appliquer le théorème de Caley-Hamilton (Chaque matrice satisfait son équation caractéristique, c-à-d : $\phi(A) = 0$, tel que : $\phi(s) = |sI - A| = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0$).

On a alors :

$$\begin{aligned} y^n(t) &= CA^n x(t) + CA^{n-1}Bu(t) + \dots + CBu^{n-1}(t) + Du^n(t), \\ &= -a_{n-1}CA^{n-1}x(t) - a_{n-2}CA^{n-2}x(t) - \dots - a_1CAx(t) \\ &\quad - a_0Cx(t) + CA^{n-1}Bu(t) + \dots + CBu^{n-1}(t) + Du^n(t), \\ &= -a_{n-1}(y^{n-1}(t) - CA^{n-2}Bu(t) - \dots - CBu^{n-2}(t) - Du^{n-1}(t)) \\ &\quad - a_{n-2}(y^{n-2}(t) - CA^{n-3}Bu(t) - \dots - CBu^{n-3}(t) - Du^{n-1}(t)) \\ &\quad - \dots \\ &\quad - a_0(y(t) - Du(t)) \\ &\quad + CA^{n-1}Bu(t) + \dots + CBu^{n-1}(t) + Du^n(t); \end{aligned} \quad (3.27)$$

ou bien :

$$\Phi_{ARR}((y(t), u(t)), (\dot{y}(t), \dot{u}(t)), \dots, (y^n(t), u^n(t))) = 0. \quad (3.28)$$

L'équation 3.28 définit un ensemble de contraintes entre entrées/sorties, qui sont par définition des Relations de Redondance Analytique.

3.3.1 Exemple d'application

Considérons le système masse-ressort-amortisseur et son modèle bond graph représentés par la *figure 3.5a* et *b*.

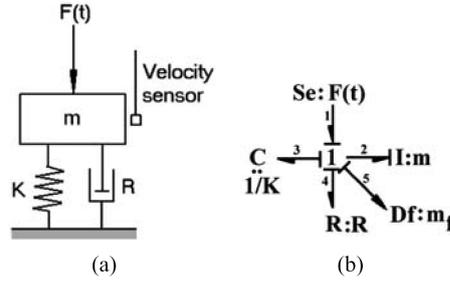


FIGURE 3.5 – Modèle Bond Graph d'un système masse-ressort-amortisseur.

Depuis le modèle bond graph, les équations dans l'espace d'état sont :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{m} & -K \\ \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \\ \{y_1\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases}$$
(3.29)

Où $x_1 = P_2$, $x_2 = Q_3$, $u(t) = F(t)$ et y_1 est la sortie du capteur de vitesse. En appliquant plusieurs dérivées de y_1 ,

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= \dot{x}_1/m = -(R/m^2)x_1 - (K/m)x_2 + u(t)/m \\ &= -(R/m)y_1 - (K/m)x_2 + u(t)/m, \\ \ddot{y}_1 &= -(R/m)\dot{y}_1 - (K/m)\dot{x}_2 + \dot{u}(t)/m \\ &= -(R/m)\dot{y}_1 - (K/m^2)x_1 + \dot{u}(t)/m \\ &= -(R/m)\dot{y}_1 - (K/m)y_1 + \dot{u}(t)/m, \end{aligned}$$
(3.30)

On obtient donc une RRA (Relation de Redondance Analytique) :

$$m\ddot{y}_1 + R\dot{y}_1 + Ky_1 - \dot{u}(t) = 0$$
(3.31)

Si on ajoute un capteur de déplacement verticale (y_2) :

$$\begin{cases} y_1 \\ y_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1/m & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} x_1 \\ x_2 \end{cases}$$
(3.32)

Nous obtenons alors les RRA suivantes :

$$\begin{aligned} my_1 + Ry_1 + Ky_2 - u(t) &= 0, \\ y_1 - \dot{y}_2 &= 0, \end{aligned}$$
(3.33)

3.3.2 Conclusion

Dans l'exemple précédent, le degré maximum des dérivées dans les RRA est " 1 ". La première relation de redondance analytique RRA1 est sensible à un décalage statique par rapport aux valeurs y_1 et y_2 , la RRA2 est sensible à un décalage statique dans y_1 . Si les RRA sont écrites avec un ordre supérieur de la dérivée, la détection du décalage dans les capteurs ne sera pas possible. Les dérivées supérieures d'un signal de bruit causera aussi des problèmes dans l'étape de décision.

3.4 Génération de Relations de Redondance Analytique

3.4.1 Représentation graphique des systèmes

Avant de présenter l'algorithme de génération des RRAs nous avons voulu d'abord mettre en évidence certaines représentations graphiques des systèmes dynamiques. Pour cela, nous avons choisi de procéder par un simple exemple montré à la *figure 3.6*.

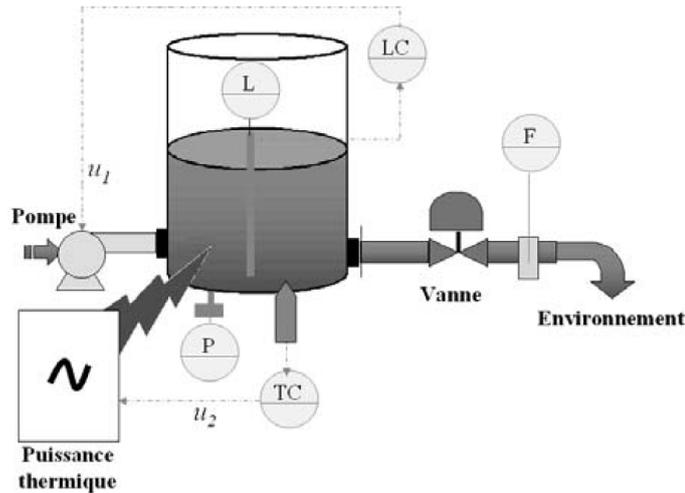


FIGURE 3.6 – Réservoir alimenté en eau par une pompe.

Représentation par un modèle structurel

Il est montré dans [3] que, du point de vue structurel, le modèle dynamique de tout système physique peut être représenté par la paire $[C, Z]$, avec $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ l'ensemble des variables et des paramètres du système, et $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ l'ensemble des contraintes.

La représentation structurelle exprime alors les relations qui existent entre les variables et les contraintes du processus. L'avantage de cette représentation est qu'elle permet de représenter n'importe quel système indépendamment de son modèle (qualitatif, quantitatif, statique, dynamique, règles, tables, etc.). Ainsi, la forme analytique du modèle du système n'est pas forcément nécessaire.

En appliquant la description donnée dans [3], les contraintes correspondant à la partie hydraulique du système de la *figure 3.6* sont données au *tableau 3.1*.

Dans le *tableau 3.1*, $M(t)$ représente la masse totale dans le réservoir, $q_i(t)$ le débit d'entrée, $q_o(t)$ le débit de sortie, $u(t)$ la commande du régulateur de niveau, C_d le coefficient de décharge de la vanne, A la section du réservoir et Φ_{PI} la fonction correspondant au régulateur de niveau.

En plus de ces relations, une huitième contrainte peut être ajoutée en introduisant la dérivée de la variable $M(t)$:

TABLE 3.1 – Modèle structurel de la partie hydraulique

Composant	Contrainte	Modèle
Reservoir	c_1	$\dot{M}(t) = q_i(t) - q_0(t)$
Pompe	c_2	$q_i(t) = \alpha u(t)$
Vanne	c_3	$q_0(t) = C_d \cdot \sqrt{M(t)}$
Capteur de niveau	c_4	$L(t) = \frac{M(t)}{\rho \cdot A}$
Capteur de pression	c_5	$P(t) = M(t) \cdot \frac{\rho}{A}$
Capteur de débit	c_6	$F(t) = q_0(t)$
Régulateur de niveau	c_7	$u(t) = \Phi_{PI}(M(t))$

$$c_8 : \dot{M}(t) = \frac{dM(t)}{dt}$$

L'ensemble des contraintes C et l'ensemble des variables Z du système physique sont donc déterminés comme suit :

$$\begin{aligned} C &= \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\} \\ Z &= \{M(t), \dot{M}(t), q_i(t), q_0(t), u(t), L(t), P(t), F(t)\}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

A noter que le modèle structurel est utilisé pour déterminer les propriétés structurelles des systèmes (observabilité, commandabilité, surveillabilité et reconfigurabilité) indépendamment de valeurs numériques des paramètres.

Représentation par un digraphe

Considérons le modèle de l'exemple de la *figure 3.6* sous la forme d'équations d'état suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) = -C_d \cdot \sqrt{x(t)} + \alpha \cdot u(t), \\ y(t) &= g(x(t), u(t)) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho \cdot A} \cdot x(t) \\ \frac{\rho}{A} \cdot x(t) \\ C_d \cdot \sqrt{x(t)} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Le digraphe correspondant au système d'équations (3.35) est une représentation graphique dans laquelle les sommets sont les entrées, les sorties et les états du système ; et les liens entre les sommets sont définis par les règles suivantes :

- il existe un lien du sommet x_k (respectivement du sommet u_l) vers le sommet x_i si et seulement si la variable d'état x_k (respectivement la variable d'entrée u_l) apparaît dans la fonction f_i .
- il existe un lien du sommet x_k vers le sommet y_j si et seulement si la variable d'état x_k apparaît dans la fonction g_j .

Le digraphe associé aux équations (3.35) est donné à la *figure 3.7*.

La représentation par digraphe est une abstraction du modèle dynamique du moment que les sommets peuvent être interprétés comme étant des influences mutuelles entre

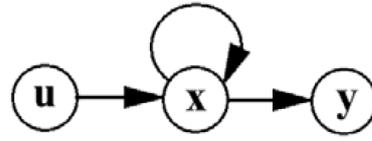


FIGURE 3.7 – Le digraphe correspondant aux équations 3.35.

les variables du système. L'inconvénient de cette forme de représentation est qu'elle ne représente pas les contraintes algébriques du modèle.

Représentation par un graph biparti

A la différence du digraphe, le graphe biparti permet de représenter la structure du système en utilisant deux ensembles de sommets : les contraintes C et les variables Z et un ensemble de liens définis par la règle suivante :

- il existe un lien entre le sommet $c_i \in C$ et le sommet $z_j \in Z$ si et seulement si la variable z_j apparaît dans la contrainte c_i (contrainte différentielle ou de mesure). Dans ce cas, la structure, S , du modèle est une relation binaire définie comme suit :

$$S : C \times Z \rightarrow \{0, 1\}$$

$$(c_i, z_j) \rightarrow S(c_i, z_j) = \begin{cases} 1 & \text{ssi } z_j \text{ apparaît dans } c_i, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (3.36)$$

La relation 3.36 conduit alors à ce qu'on appelle la matrice d'incidence du système. Celle qui correspond à notre système et qui est obtenue à partir des contraintes et des variables données par l'Eq. (3.34) est montrée au *tableau 3.2*.

TABLE 3.2 – Matrices d'incidence du processus hydraulique

	$M(t)$	$\dot{M}(t)$	$q_i(t)$	$q_0(t)$	$u(t)$	$L(t)$	$P(t)$	$F(t)$
c_1		1	1	1				
c_2			1		1			
c_3	1			1				
c_4	1					1		
c_5	1						1	
c_6				1				1
c_7	1				1			
c_8	×	1						

Dans le *tableau 3.2* les cellules vides correspondent à la valeur 0 et le symbole \times signifie que dans la contrainte c_8 seule la forme différentielle est permise.

Les deux représentations graphiques précédentes (digraphe et graphe biparti) sont intéressantes dans le cas où les contraintes (et les variables) correspondant au processus physique sont disponibles. Dans le cas contraire, l'utilisateur doit les générer en utilisant

des méthodes de modélisation. Pour le cas des systèmes simples, cette tâche est facile à réaliser. Cependant, pour les systèmes complexes (qui est souvent le cas) l'obtention de ces relations n'est pas une chose triviale. Par exemple, si on ajoute les phénomènes thermiques à la partie hydraulique du système de la *figure 3.6* on constate qu'il devient relativement difficile de générer les équations physiques du processus. C'est pourquoi la représentation bond graph en tant qu'outil de modélisation, d'analyse et de synthèse s'avère être utile pour la représentation des processus multi-énergies.

Représentation par bond graph

Le modèle bond graph, en causalité dérivée, correspondant à la partie hydraulique du système physique de la *figure 3.6* est montré à la *figure 3.8*.

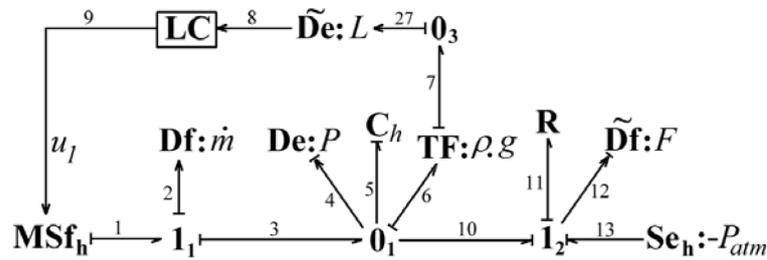


FIGURE 3.8 – Modèle bond graph de l'exemple de la *figure 3.6*.

En utilisant la représentation bond graph, l'ensemble des variables Z (connues K et inconnues X) et l'ensemble des contraintes C peuvent être déduits directement du modèle bond graph du processus.

Les contraintes

Les contraintes C peuvent être vues comme n'importe quelles relations qui relient les variables et les paramètres du système. Elles sont représentées par les contraintes structurelles (F_J), de comportement (F_B), de mesure (F_Y), du système de commande (F_C) et des sources contrôlées (F_A).

$$C = \{F_J, F_B, F_Y, F_C, F_A\}$$

– Les équations structurelles F_J

Elles représentent l'ensemble des lois de conservation (de masse, d'énergie, etc.) et/ou des équations d'équilibre. Elles sont déduites des équations aux jonctions. Le nombre d'équations F_J est égal au nombre d'équations dans les "jonction 0" plus celles des "jonction 1" plus celles des éléments 2-ports (transformateur TF , et gyrateur GY).

$$F_J = \{F_{J0}\} \cup \{F_{J1}\} \cup \{F_{TF}\} \cup \{F_{GY}\},$$

$F_J \in \mathfrak{R}^{n_j+2 \times n_{2p}}$, n_j est le nombre de jonctions 0 et 1, et n_{2p} est le nombre d'éléments 2-ports (TF et GY). Sur le modèle bond graph de la *figure 3.8*, les contraintes F_J sont :

$$\begin{aligned} F_{j0_1} &: f_6 = f_3 - f_4 - f_5 - f_{10}, \\ F_{j1_2} &: e_{12} = e_{10} - e_{11} + e_{13}, \\ F_{j0_3} &: f_{27} = f_7, \\ F_{TF} &: e_6 = \rho g e_7, \\ F_{TF} &: f_7 = \rho g f_6, \\ F_{j1_1} &: e_1 = e_2 + e_3, \end{aligned} \tag{3.37}$$

– **Les équations de comportement F_B**

Les lois physiques exprimant la façon dont l'énergie est transformée représentent le modèle de comportement. Dans le modèle bond graph, elles décrivent les phénomènes physiques au niveau des éléments bond graphs (R , C , et I), et sont appelées "lois constitutives".

$$F_B = \{F_C\} \cup \{F_I\} \cup \{F_R\}, \tag{3.38}$$

$F_B \in \mathfrak{R}^{n_e}$, n_e est le nombre total des liens de puissance dans les éléments bond graph, R , C et I . Les équations de comportement du modèle bond graph de la *figure 3.8* sont celles des éléments C_h et R .

$$\begin{aligned} f_5 &= C_h \cdot \frac{de_5}{dt}, \\ e_{11} &= \Phi_R(f_{11}), \end{aligned} \tag{3.39}$$

où Φ_R est une fonction correspondant à la caractéristique de la vanne. Le paramètre C_h est donné par la relation suivante :

$$C_h = \frac{A}{g}, \tag{3.40}$$

avec A la section du réservoir et g la constante de gravité.

– **Le modèle des mesures F_Y**

Il décrit les mesures disponibles sur le modèle bond graph. Ce modèle exprime la façon dont les capteurs transforment les variables d'état du processus en signaux de sortie qui peuvent être utilisés dans l'élaboration des lois de commande et dans la détection et l'isolation des défaillances. Sur un modèle bond graph les capteurs sont représentés par des détecteurs de flux (Df) et d'effort (De) :

$$F_Y = \{F_{De}\} \cup \{F_{Df}\},$$

$F_Y \in \mathfrak{R}^{n_s}$, n_s est le nombre de détecteurs (ou capteurs). Dans notre cas, les équations de mesure sont :

$$\begin{aligned} e_5 &= e_6 = \rho g e_7 = \rho g L, \\ e_4 &= e_6 \Rightarrow P = \rho g L, \\ f_{11} &= f_{12} = F, \\ f_2 &= f_1. \end{aligned} \tag{3.41}$$

– **Le modèle des algorithmes de commande F_C**

Il décrit les algorithmes de commande dans lesquels les entrées des régulateurs sont les valeurs des consignes et de mesure des capteurs. Les sorties des régulateurs agissent sur les actionneurs représentés par des sources modulées d'effort (MSe) ou de flux (MSf).

$$F_C(u_{ref}, Y_m, \theta_{reg}) = 0, \tag{3.42}$$

où θ_{reg} est un paramètre du régulateur (gain, temps d'intégration, etc.), u_{ref} , et Y_m représentent respectivement la consigne et les sorties des capteurs. On a donc $F_C \in \mathfrak{R}^{n_r}$ avec n_r le nombre de régulateurs.

Contrairement aux équations structurelles et de comportement qui utilisent les variables de puissance effort-flux comme variables d'entrée-sortie, les loi de commande et de mesure utilisent les signaux d'information.

La sortie u_1 de l'algorithme de commande du régulateur de niveau d'eau utilisé dans l'exemple de la *figure 3.8* est donnée par l'équation suivante :

$$u_1 = \Phi_{LC}(L_{ref}, L), \tag{3.43}$$

où L_{ref} est la consigne de niveau et Φ_{LC} la loi de commande du régulateur LC .

– **Modèle des sources contrôlées F_A**

Ces modèles décrivent les sources d'énergie contrôlées ou modulées par les signaux de commande (pompe régulée, source de tension commandée, etc.). Les signaux d'entrée u sont fournis par les régulateurs et les signaux de sortie sont les variables régulées MSe et MSf .

$$F_{A1}(MSf, u) = 0, F_{A2}(MSe, u) = 0$$

$F_A \in \mathfrak{R}^{n_a}$ où n_a est le nombre total de sources (modulées ou non). La contrainte relative à la source modulée MSf_h de notre exemple correspond à celle donnée par l'équation suivante :

$$f_1 = \Phi_{Pompe}(u_1), \tag{3.44}$$

où Φ_{Pompe} représente la caractéristique de la pompe.

Le nombre total de contraintes sur un modèle bond graph est donc :

$$C \in \mathfrak{R}^{n_j + 2 \times n_{2p} + n_e + n_s + n_a + n_r}$$

Les variables

L'ensemble des contraintes F s'appliquent à l'ensemble des variables Z : connues (K) et inconnues (X).

$$Z = X \cup K \quad (3.45)$$

Les variables inconnues X sont les variables de puissance (flux et effort) supportées par les liens de puissance du modèle bond graph. Le vecteur X contenant toutes les variables de puissance est :

$$X(t) = \{e_1(t), f_1(t)\} \cup \{e_2(t), f_2(t)\} \dots \cup \{e_{n_c}(t), f_{n_c}(t)\} \quad (3.46)$$

avec n_c le nombre de liens de puissance. La dimension de X est donc $2 \times n_c \Rightarrow X \in \mathfrak{R}^{2 \times n_c}$.

Les variables inconnues de notre exemple sont les variables effort et flux des liens de puissance sur le modèle bond graph de la *figure 3.8*.

Le sous-ensemble K des variables connues contient les valeurs des sources, les sorties des régulateurs (u), et les variables mesurées par les capteurs (Y_m).

$$K = MS_e \cup MS_f \cup Se \cup Sf \cup Y_m \quad (3.47)$$

Finalement, $K \in \mathfrak{R}^l$ avec $l = n_s + n_a$. Donc $Z = l + 2 \times n_c \Rightarrow Z \in \mathfrak{R}^{l+2 \times n_c}$. Pour le modèle bond graph (3.8) de l'exemple d'application on a

$$K = \{MSf_h, Se : -P_{atm}, Df : \dot{m}, De : P, De : \rho g L, Df : F, u_1\} \quad (3.48)$$

Les paramètres

$\theta \in \mathfrak{R}^p$ est le vecteur des paramètres. Dans le modèle bond graph les paramètres correspondent aux caractéristiques des éléments R , C et I , i.e. le coefficient de flux, la valeur de la capacité (qui peut être variable), les paramètres de supervision (tel que la consigne u_{ref}), etc..

3.4.2 Génération de RRAs en utilisant le graphe biparti

Sur un graphe biparti, la génération de RRAs repose essentiellement sur l'élimination des variables inconnues X en utilisant les contraintes C [3]. Rappelons que l'ensemble des variables Z du système se compose de deux sous-ensembles : les variables connues K et les variables inconnues X . En outre, il a été montré dans [3] que tout système S peut être structurellement décomposé en trois sous-systèmes : un sous-système surdéterminé dont le nombre de variables Z est supérieur au nombre de contraintes C ($Z > C$), un sous-système juste-déterminé ($Z = C$) et un sous-système surdéterminé ($Z < C$).

Pour l'élimination des variables inconnues, la notion de couplage entre les variables et les contraintes est très importante. Le couplage est alors une causalité qui permet

de construire la matrice d'incidence et de calculer les variables inconnues à partir des contraintes du système.

Ainsi, les variables qui ne sont pas couplées ne peuvent pas être calculées et celles qui peuvent être couplées de différentes façons peuvent être calculées différemment donnant lieu à des relations de compatibilité utilisées pour la surveillance du processus. Ces relations sont alors appelées RRAs.

Une RRA est une contrainte calculée à partir d'un sous système surdéterminé et observable et exprimée en termes de variables connues du process. Elle a la forme symbolique suivante :

$$f(K) = 0 \tag{3.49}$$

L'évaluation numérique d'une RRA conduit à un résidu r :

$$r - f(K) = 0 \tag{3.50}$$

dont la valeur numérique en l'absence de défaillances doit être nulle.

Le modèle structurel de l'exemple de la *figure 3.6* (*tableau 3.1*) présente huit contraintes et huit variables (dont cinq sont inconnues : les cinq premières colonnes du *tableau 3.3*). On a donc un système surdéterminé qui, en plus, ne présente ni de boucles différentielles ni de relations non inversibles. Par ailleurs, le couplage (représenté sur le *tableau 3.3* par le symbole ©) est maximal (complet) par rapport aux variables inconnues mais pas par rapport aux contraintes. Les variables inconnues peuvent donc être éliminées (à travers les contraintes couplées) et remplacées dans celles qui ne le sont pas pour donner lieu à des relations comportant seulement des variables connues (RRAs). Pour cet exemple, trois RRAs correspondant au trois contraintes non couplées peuvent donc être obtenues.

TABLE 3.3 – Matrices d'incidence et couplage des variables

	$M(t)$	$\dot{M}(t)$	$q_i(t)$	$q_0(t)$	$u(t)$	$L(t)$	$P(t)$	$F(t)$
c_1		1	©	1				
c_2			1		1			
c_3	1			©				
c_4	©					1		
c_5	1						1	
c_6				1				1
c_7	1				©			
c_8	×	©						

La génération de RRAs est montrée sur le graphe biparti orienté de la *figure 3.9*. Sur ce graphe, les variables d'entrée $L(t)$, $P(t)$ et $F(t)$ sont des variables mesurées par les capteurs, et les cinq variables inconnues sont calculées à partir des contraintes c_1 , c_3 , c_4 , c_7 et c_8 . Les trois RRAs générées correspondent aux trois contraintes non couplées : c_2 , c_5 et c_6 (double lignes dans la *figure 3.9*).

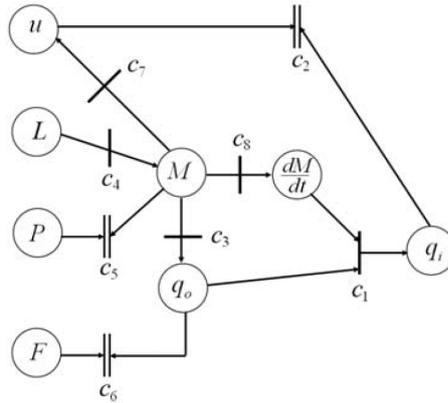


FIGURE 3.9 – Génération des RRAs à partir d'un graphe biparti orienté.

La génération des RRAs en utilisant le graphe biparti est relativement simple et facile pour cet exemple. Toutefois, si on analyse la façon avec laquelle les variables inconnues ont été éliminées, on s'aperçoit que pour des systèmes complexes cette méthode présente un inconvénient. En effet, en présence d'un grand nombre de contraintes, le choix du couplage permettant l'élimination des variables inconnues n'est pas évident.

3.4.3 Génération de RRAs en utilisant le bond graph

Le but derrière l'utilisation de la représentation bond graph est d'utiliser un seul outil pour la modélisation, la génération des RRAs, l'analyse structurelle et de surveillabilité et le placement de capteurs.

Un système de surveillance par bond graph peut être représenté par le schéma de la *figure 3.1*. On distingue essentiellement deux parties : le modèle bond graph et le système d'information. Le modèle bond graph représente la partie énergétique du processus physique. Il comporte le processus et l'ensemble des actionneurs. Ces derniers sont modélisés par des sources (d'effort ou de flux). Les sources peuvent être simples Se , Sf (pompe, chauffage, pression d'alimentation, etc.) ou modulées MSe , MSf (sources commandées par un signal externe fourni par un régulateur ou un utilisateur). Les capteurs et le système de commande (PID , ToR , etc.) forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien) qui traduit les variables de puissance (l'effort et le flux). Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est représentée par un lien d'information.

La génération des RRAs par la méthodologie bond graph repose sur les mêmes principes que dans le graphe biparti, à savoir l'élimination des variables inconnues dans un sous système surdéterminé et observable. Sur un modèle bond graph, l'observabilité peut être vérifiée en utilisant les propriétés structurelles développées dans [6]. Les variables connues K sont celles des détecteurs et des sources et les variables inconnues X sont celles des liens de puissances dans les éléments C , I et R . L'élimination des variables inconnues est

systematique sur un modèle bond graph grâce à ses propriétés causales et au parcours des chemins causaux.

Dans ce qui suit, la démarche développée consiste à générer de façon algorithmique et systematique les RRAs, les résidus correspondants et la matrice de signature des défaillances.

Dans une représentation par bond graph, la relation de l'Eq. (3.49) relative à la définition d'une RRA devient :

$$f(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, \theta_m) = 0 \quad (3.51)$$

avec θ_m l'ensemble des paramètres mesurés ou estimés du système.

L'algorithme que nous présentons ici permet de générer l'ensemble des RRAs possibles à partir d'un modèle bond graph d'un système donné. Le modèle est d'abord mis en causalité dérivée préférentielle (avec inversion des détecteurs si possible). Cela permet d'éviter les conditions initiales de l'état et de considérer les sources et les détecteurs comme des entrées du modèle. Les RRAs, sous forme différentielle, sont alors directement déduites des expressions des lois des jonctions 0 et 1 du modèle bond graph en causalité dérivée.

Algorithme de génération de RRAs par bond graph

L'algorithme suivant permet de générer des RRAs de façon systematique à partir d'un modèle bond graph. Voici, dans l'ordre, les étapes à suivre :

1. mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle (en inversant la causalité des détecteurs si possible),
2. écrire les équations du modèle obtenu : de comportement F_B , des jonctions F_J , de mesure F_Y , des sources F_A , et de commande F_C ,
3. pour toute équation de jonction 0 et 1 contenant au moins un détecteur :
 - éliminer les variables inconnues en parcourant les chemins causaux sur le bond graph,
 - 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)
4. une RRA est obtenue à partir de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande,
5. refaire les étapes 3 et 4.

- si les RRAs obtenues sont strictement différentes de celles déjà obtenues alors les garder, sinon continuer jusqu'à ce que toutes les équations des jonctions et celles des régulateurs soient explorées.

Appliquons maintenant cet algorithme sur notre exemple d'application donné à la *figure 3.6*. Le modèle bond graph en causalité dérivée correspondant à la partie hydraulique du système est donné à la *figure 3.8*. Les différentes contraintes analytiques du modèle sont données par les équations 3.37, 3.39, 3.41, 3.43 et 3.44. Par ailleurs, il est important de noter que dans cet algorithme, nous considérons que les sorties des sources

et des régulateurs sont connues (mesurées).

L'étape 3 de l'algorithme consiste à éliminer les variables inconnues de chaque équation de jonction. Choisissons comme première équation celle correspondant à la jonction 0_1 . On a donc :

$$f_6 = f_3 - f_4 - f_5 - f_{10} \quad (3.52)$$

Dans cette équation, le sous-ensemble des variables inconnues est $X = f_6, f_3, f_4, f_5, f_{10}$. Ces variables peuvent être éliminées en parcourant les chemins causaux sur le modèle bond graph de la figure 3.8. f_4 et f_6 correspondent respectivement aux variables flux des détecteurs de pression $De : P$ et de niveau $De : L$ et par conséquent, leurs valeurs sont nulles ($f_6 = f_4 = 0$). f_3 peut être déterminé à partir du chemin causal $MSf_h : \Phi_{Pump}(u_1) \rightarrow f_1 \rightarrow f_3$ (voir figure 3.8), puisque la sortie de l'actionneur est considérée dans notre cas comme étant connue ($MSf = \Phi_{Pump}(u_1)$). On peut donc écrire :

$$f_3 = \Phi_{Pump}(u_1)$$

Le chemin causal $Df : F \rightarrow f_{12} \rightarrow f_{10}$ permet de déterminer la variable f_{10} :

$$f_{10} = F$$

tandis que la variable f_5 est calculée à partir de la relation constitutive de l'élément C_h :

$$f_5 = C_h \frac{de_5}{dt}$$

où C_h est donné par l'Eq. (3.40) et e_5 est déterminé en parcourant le chemin causal $De : L \rightarrow e_{27} \rightarrow e_7 \rightarrow e_6 \rightarrow e_5 \Rightarrow e_5 = \rho.g.L$. On a donc :

$$f_5 = \frac{A}{g} \rho g \frac{dL}{dt} = A\rho\dot{L}$$

Toutes les variables inconnues de l'Eq. (3.52) sont éliminées, la première relation de redondance analytique suivante est alors obtenue :

$$RRA_1 : \Phi_{Pump}(u_1) - \rho A\dot{L} - F = 0 \quad (3.53)$$

En procédant de la même façon que pour l'Eq. (3.52), une deuxième RRA peut être générée à partir de l'équation de la jonction 1_2 . Dans cette équation, $e_{12} = 0$ puisqu'elle correspond à la variable effort d'un détecteur de flux ($Df : F$). On peut donc écrire :

$$e_{12} = e_{10} - e_{11} + e_{13} \Rightarrow e_{10} - e_{11} + e_{13} = 0 \quad (3.54)$$

le chemin causal $De : L \rightarrow e_{27} \rightarrow e_7 \rightarrow e_6 \rightarrow e_{10}$ permet de calculer e_{10} . La variable e_{13} représente la pression atmosphérique de l'environnement ambiant, tandis que e_{11} peut être obtenue à partir de la relation constitutive de l'élément R :

$$e_{10} = \rho g L$$

$$e_{13} = -P_{atm}$$

$$e_{11} = \Phi_R(f_{11}) = \Phi_R(F)$$

La deuxième RRA qui est structurellement indépendante de la première est donc

$$RRA_2 : \rho g L - \Phi_R(F) - P_{atm} = 0 \quad (3.55)$$

Les RRAs précédentes (Eq. (3.53) et Eq. (3.55)) sont toutes les deux obtenues à partir des jonctions correspondant au phénomène hydraulique du processus.

Matrice de signature des défaillances

La structure des RRAs forme une matrice binaire S_{ji} qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique (capteurs, actionneurs, régulateurs, éléments physiques). Les éléments de la matrice sont définis comme suit :

$$S_{ji} = \begin{cases} S_{ji} = 1, & \text{si la } i^{\text{ème}} \text{ RRA contient des variables du } j^{\text{ème}} \text{ composant} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.56)$$

La matrice S_{ji} est appelée la matrice de signature des défaillances qui fournit la logique pour la localisation des défaillances détectées durant le fonctionnement du système. L'objectif de la procédure de localisation (isolation) est de fournir à l'opérateur la liste des composants défaillants. Chaque composant a une signature représentée par un vecteur ligne de la matrice et qui ne prend pas en compte les valeurs affectées aux variables D_b (détectabilité) et I_b (isolabilité). Une défaillance d'un composant est détectable si la variable associée au composant est présente dans au moins une RRA (ou résidu r correspondant). Cette défaillance est localisable si et seulement si sa signature est unique, i.e. différente des signatures des autres composants. A partir du cahier des charges demandé, on peut fixer la liste des composants à surveiller. Il est évident que les performances du système de surveillance (concernant l'isolabilité) dépend du nombre d'éléments à surveiller et des différences de leurs signatures de défaillance. Pour construire la matrice des signatures, certains composants sont supprimés de la matrice dès lors qu'ils sont considérés comme infaillibles.

Procédure de détection et d'isolation des défaillances

Une fois les relations de redondance analytique obtenues et la matrice de signature de défaillances générée, la procédure de décision est la prochaine étape dans la conception d'un système de surveillance. Elle consiste à rendre la détection et la localisation des défaillances robuste, fiable et efficace. En général, la logique suivie pour conclure si oui ou non une défaillance est apparue, dépend du type de connaissance disponible concernant le processus, de l'approche utilisée et du type des défaillances traitées. Un large éventail d'algorithmes de décision est donné dans [1].

La procédure de décision est appliquée sur l'ensemble des résidus r (Eq. (3.50)) pour générer un vecteur de cohérence binaire $V = [v_1 v_2 \dots v_n]$, qui indique si oui ou non une défaillance est présente sur le processus. Chaque élément v_i de V est obtenu en appliquant la procédure de décision correspondante $\Phi_i(r_i)$, i.e. $v_i = \Phi_i(r_i)$. Ainsi, une alarme est générée lorsque $v_i = 1 \Rightarrow V \neq [00 \dots 0]$.

Théoriquement, si le système est en bon fonctionnement, la valeur de chaque résidu r_i ($i = 1, \dots, n$) doit être nulle. Mais en pratique, et dans le cas le plus simple, $|\Psi_{\Delta T}(r_i)|$ est borné par une petite quantité ϵ_i , avec $\Psi_{\Delta T}$ le pré-traitement sur chaque résidu (i.e. une moyenne glissante sur un intervalle de temps ΔT). Le paramètre ϵ_i est un seuil fixé (par expérience par exemple). En effet, en pratique les valeurs des résidus en fonctionnement normal ne sont jamais nulles. Ceci étant dû aux erreurs de modélisation ainsi qu'aux bruits des mesures. Pour décider de la présence d'une défaillance, chaque résidu traité est comparé à une valeur de seuil ϵ_i , fixée a priori. Dans le cas le plus simple, chaque élément v_i de V est obtenu en utilisant la condition suivante :

$$v_i = \begin{cases} S_{ji} = 1, & \text{si } |\Psi_{\Delta T}(r_i)| > \epsilon_i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.57)$$

3.5 Diagnostic robuste par l'approche Bond Graph

3.5.1 Représentation LFT

Les transformations linéaires fractionnelles (LFT) sont des objets génériques très utilisés dans la modélisation des systèmes incertains. L'universalité des LFT est due au fait que toute expression rationnelle peut s'écrire sous cette forme [26]. Cette forme de représentation est très utilisée pour la synthèse des lois de commande des systèmes incertains utilisant le principe de la μ -analyse. Elle consiste à séparer la partie nominale d'un modèle de sa partie incertaine comme illustré dans la *figure* 3.10. Les valeurs nominales sont regroupées dans une matrice augmentée notée M , supposée propre, et les incertitudes quel que soit leur type (incertitudes paramétriques structurées et non structurées, incertitudes de modélisation, bruits de mesures...) sont réunies dans une matrice Δ de structure diagonale.

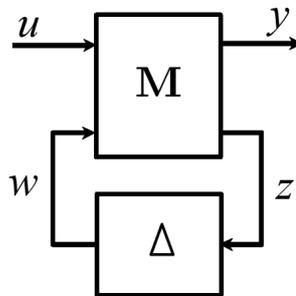


FIGURE 3.10 – Représentation LFT.

3.5.2 Modélisation des éléments Bond Graph incertains

Les modèles BG déterministes d'un élément physique R en causalité résistance et conductance sont respectivement donnés par les *Figures 3.11(a)* et *(b)*.



FIGURE 3.11 – Élément R déterministe en causalité résistance (a) et causalité conductance (b)

Élément Bond Graph avec une incertitude additive

En introduisant une incertitude de façon additive sur l'élément R en causalité résistance on obtient :

$$e_R = (R_n + \Delta R)f_R = R_n f_R + \Delta R f_R = e_n + e_{inc} \quad (3.58)$$

avec R_n la valeur nominale de l'élément R et ΔR l'incertitude additive sur le paramètre. e_R et f_R sont respectivement l'effort et le flux dans l'élément R . $e_n = R_n \cdot f_R$ et $e_{inc} = \Delta R \cdot f_R$ représentent respectivement l'effort apporté par le paramètre nominal et l'effort introduit par l'incertitude additive. L'équation (3.58), montre clairement que l'effort introduit par l'incertitude additive ΔR est indépendant de la valeur nominale du paramètre R_n . Cette forme de représentation est donc valable pour les systèmes linéaires à paramètres constants. Le modèle bond graph équivalent au modèle mathématique de l'équation (3.58) est donné par la *Figure 3.12 (a)*, et la *Figure 3.12 (b)* montre le modèle bond graph de l'élément R en causalité conductance.

L'approche bond graph permet d'anticiper les problèmes de simulation et de génération de RRAs robustes.

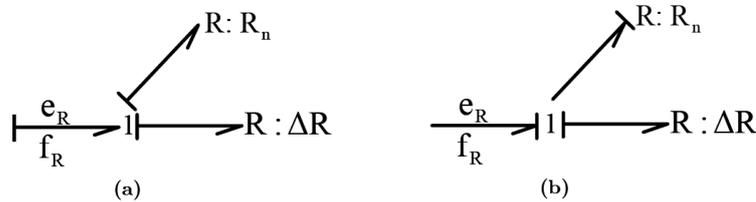


FIGURE 3.12 – Élément R en causalité résistance avec incertitude additive (a). en causalité conductance (b).

En effet, dans le cas où l'incertitude est introduite de façon additive sous forme d'un élément BG (Bond Graph), les propriétés structurelles du modèle incertain empêchent la

génération automatique des RRAs robustes, et génère des erreurs dans la simulation du modèle. Pour illustrer cette particularité, analysons les modèles BG des éléments C et I en causalité intégrale et dérivée des figures 3.13 et 3.14.

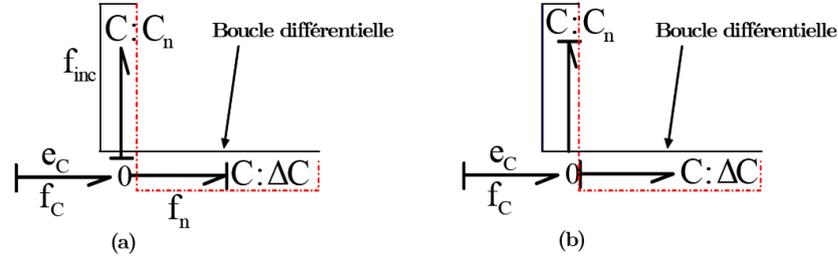


FIGURE 3.13 – Élément C en causalité intégrale avec incertitude additive (a). en causalité dérivée (b)

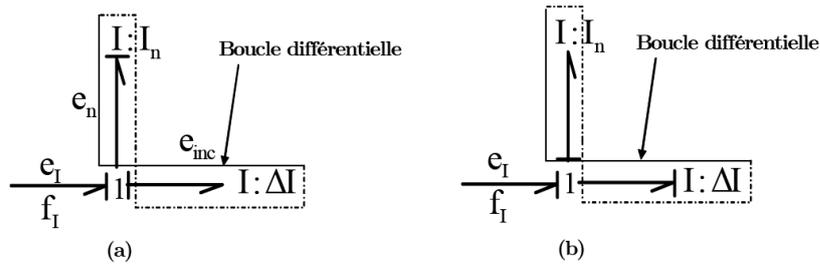


FIGURE 3.14 – Élément I en causalité intégrale avec incertitude additive (a). en causalité dérivée (b)

Les modèles BG des éléments C et I en causalité intégrale des Figures 3.13(a) et 3.14(a) montrent que l'incertitude représentée par un élément bond graph est causalement liée au paramètre nominal et n'a aucun lien causal avec le reste du modèle. Cette situation donne lieu à une boucle différentielle entre l'élément nominal et l'incertitude. Ainsi, sur des modèles complexes, où le nombre d'incertitudes paramétriques est important, la simulation de la dynamique du modèle devient pratiquement impossible à cause des boucles algébro-différentielles. Lorsque les modèles BG des éléments C et I sont mis en causalité dérivée (Figures 3.13 (b) et 3.14 (b)), le paramètre nominal (C_n et I_n) passe en causalité dérivée et le paramètre correspondant à l'incertitude (ΔC et ΔI) passe en causalité intégrale, mais la boucle différentielle reste toujours présente. Le problème des boucles algébro-différentielles restera donc présent quelle que soit la causalité adoptée pour développer le schéma de diagnostic.

Élément Bond Graph avec une incertitude multiplicative

L'introduction d'une incertitude de façon multiplicative sur l'élément R en causalité résistance donne :

$$e_R = R_n(1 + \delta_R)f_R = R_n f_R + \delta_R R_n f_R = e_n + \delta_R e_n = e_n + e_{inc} \quad (3.59)$$

avec R_n la valeur nominale de l'élément R et δ_R l'incertitude multiplicative sur le paramètre. e_R et f_R sont respectivement l'effort et le flux dans le paramètre R . $e_n = R_n f_R$ et $e_{inc} = \delta_R R_n f_R$ représentent respectivement l'effort apporté par le paramètre nominal et l'effort introduit par l'incertitude multiplicative. Contrairement à l'effort introduit par une incertitude additive par rapport au paramètre (équation (3.58)), l'effort apporté par une incertitude multiplicative (équation (2.3 3.58)) est une fonction de l'effort apporté par le paramètre nominal.

L'introduction d'une incertitude multiplicative sur l'élément R en causalité conductance donne :

$$f_R = \frac{1}{R_n} \left(1 + \delta_{\frac{1}{R}}\right) e_R = \frac{1}{R_n} e_R + \delta_{\frac{1}{R}} \frac{1}{R_n} e_R = f_n + \delta_{\frac{1}{R}} f_n = f_n + f_{inc} \quad (3.60)$$

avec $\delta_{\frac{1}{R}} = \frac{-\Delta R}{R_n + \Delta R}$ l'incertitude multiplicative sur l'élément R en causalité conductance. e_R et f_R sont respectivement l'effort et le flux dans l'élément R en causalité conductance. $f_n = \frac{1}{R_n} e_R$ et $f_{inc} = \delta_{\frac{1}{R}} \frac{1}{R_n} e_R$ représentent respectivement le flux apporté par le paramètre nominal et le flux introduit par l'incertitude multiplicative.

Les modèles bloc diagramme équivalents aux équations (3.59) et (3.60) sont respectivement donnés par les Figures (3.15)(a) et (b)

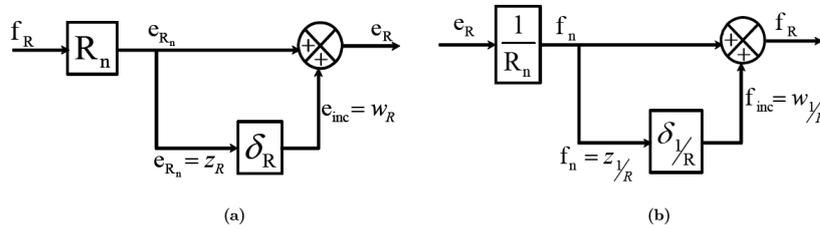


FIGURE 3.15 – Modèle bloc diagramme LFT d'un élément R en causalité résistance avec incertitude multiplicative (a). en causalité conductance (b).

A partir des équations (3.59) et (3.60), on peut construire les modèles bond graphs des Figures 3.16 (a) et (b).

Le passage d'un modèle BG déterministe à un modèle incertain sous forme LFT consiste donc à introduire des sources modulées d'effort ou de flux, qui sont ajoutées respectivement au niveau des jonctions 1 ou 0. Ainsi, le modèle reste causalement correct et ses propriétés structurelles ne sont pas modifiées (commandabilité, observabilité, . . .). De plus, ces sources modulées sont causalement liées au reste du modèle, où leur apport énergétique se propage sous forme d'effort ou de flux, et s'ajoute au bilan énergétique au niveau des jonctions. Cette forme standard est donc la mieux adaptée au diagnostic des systèmes à paramètres incertains [7].

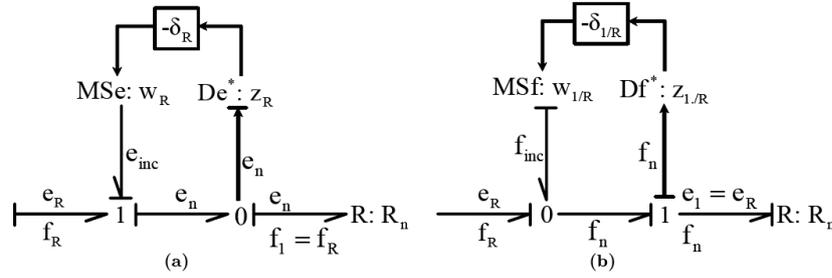


FIGURE 3.16 – Modèle BG-LFT d'un élément R en causalité résistance avec incertitude multiplicative (a). en causalité conductance (b).

Modèles BG-LFT des éléments de stockage d'énergie

Éléments I et C en causalité dérivée

La loi caractéristique de l'élément incertain I en causalité dérivée avec une incertitude multiplicative est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} e_I &= I_n(1 + \delta_I) \frac{df_I}{dt} \\ e_I &= I_n \frac{df_I}{dt} + \delta_I \left(I_n \frac{df_I}{dt} \right) \\ e_I &= I_n \frac{df_I}{dt} - w_I \end{aligned} \quad (3.61)$$

avec $\delta_I = \frac{\Delta I}{I_n}$, I_n la valeur nominale de l'élément I , δ_I l'incertitude multiplicative sur le paramètre, et ΔI l'incertitude additive sur le paramètre. w_I l'entrée fictive qui représente l'incertitude sur l'effort à la sortie de l'élément I . e_I et f_I sont respectivement l'effort et le flux dans l'élément incertain I . La loi caractéristique de l'élément incertain C en causalité dérivée avec une incertitude multiplicative est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} f_C &= C_n(1 + \delta_C) \frac{de_C}{dt} \\ f_C &= C_n \frac{de_C}{dt} + \delta_C \left(C_n \frac{de_C}{dt} \right) \\ f_C &= C_n \frac{de_C}{dt} - w_C \end{aligned} \quad (3.62)$$

avec $\delta_C = \frac{\Delta C}{C_n}$, C_n la valeur nominale de l'élément C , δ_C l'incertitude multiplicative sur le paramètre, et ΔC l'incertitude additive sur le paramètre. w_C l'entrée fictive qui représente l'incertitude sur le flux à la sortie de l'élément C . e_C et f_C sont respectivement l'effort et le flux dans l'élément incertain C .

Les modèles bond graph sous la forme LFT des éléments I et C en causalité dérivée équivalents aux équations (3.61) et (3.62) sont respectivement donnés en *figures* 3.17 (a) et (b)

Éléments I et C en causalité intégrale

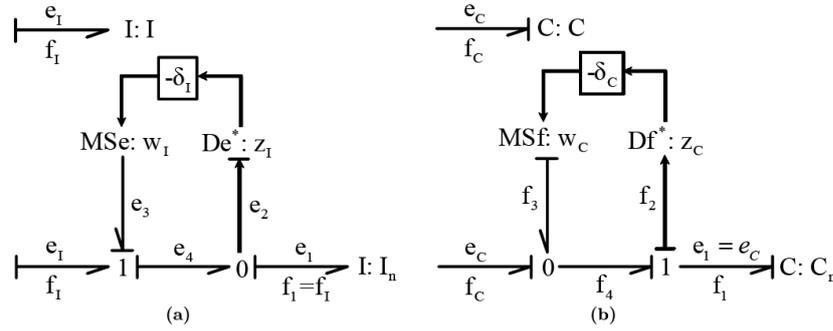


FIGURE 3.17 – Élément I en causalité dérivée préférentielle (a). Élément C en causalité dérivée préférentielle (b).

La loi caractéristique de l'élément incertain I en causalité intégrale avec une incertitude multiplicative est donnée comme suit :

$$\begin{aligned}
 f_I &= \frac{1}{I_n}(1 + \delta_{\frac{1}{I}} \int e_I dt + f_{I_0}) \\
 f_I &= \frac{1}{I_n} \int e_I dt + \delta_{\frac{1}{I}} \left(\frac{1}{I_n} \int e_I dt + f_{I_0} \right) \\
 f_I &= \frac{1}{I_n} \int e_I dt - w_{\frac{1}{I}} + f_{I_0}
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

avec $\delta_{\frac{1}{I}} = \frac{-\Delta I}{I_n + \Delta I}$, $w_{\frac{1}{I}}$ l'entrée fictive qui représente l'incertitude sur le flux à la sortie de l'élément I . f_{I_0} est une constante qui représente les conditions initiales.

La loi caractéristique de l'élément incertain C en causalité intégrale avec une incertitude multiplicative est donnée comme suit :

$$\begin{aligned}
 e_C &= \frac{1}{C_n}(1 + \delta_{\frac{1}{C}} \int f_C dt + e_{C_0}) \\
 e_C &= \frac{1}{C_n} \int f_C dt + \delta_{\frac{1}{C}} \left(\frac{1}{C_n} \int f_C dt + e_{C_0} \right) \\
 e_C &= \frac{1}{C_n} \int f_C dt - w_{\frac{1}{C}} + e_{C_0}
 \end{aligned} \tag{3.64}$$

avec $\delta_{\frac{1}{C}} = \frac{-\Delta C}{C_n + \Delta C}$, $w_{\frac{1}{C}}$ l'entrée fictive qui représente l'incertitude sur l'effort à la sortie de l'élément C . e_{C_0} est une constante qui représente les conditions initiales.

Les modèles bond graphs LFT des éléments I et C en causalité intégrale équivalents aux équations (3.63) et (3.64) sont respectivement donnés en figures 3.18 (a) et (b).

Modèles BG-LFT des éléments conservatifs de puissance

Les éléments transformateurs de puissance utilisés en bond graph sont : le transformateur noté TF , le gyrateur noté GY . Le transformateur TF conserve la puissance, mais relie les efforts entre eux et les flux entre eux. Le gyrateur GY conserve la puissance, mais relie les efforts aux flux.

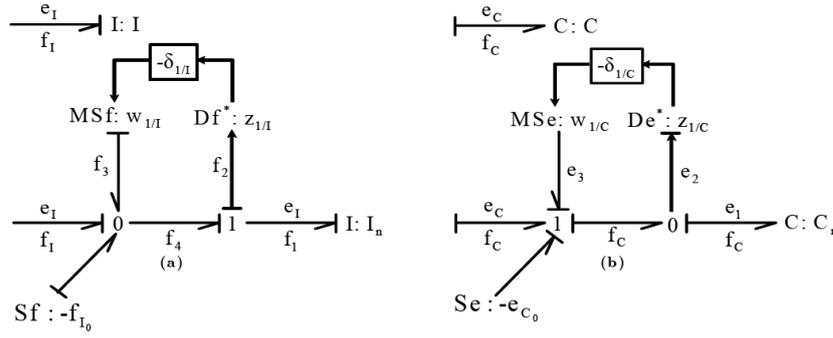


FIGURE 3.18 – Élément I en causalité intégrale préférentielle (a). Élément C en causalité intégrale préférentielle (b).

Élément TF

La loi caractéristique de l'élément incertain TF en causalité m s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned}
 e_1 &= m_n(1 + \delta_m)e_2 \\
 e_1 &= m_n e_2 + m_n(\delta_m e_2) \\
 e_1 &= m_n(e_2 - w_b) \text{ avec } w_b = -\delta_m e_2 \\
 f_2 &= m_n(1 + \delta_m)f_1 \\
 f_2 &= m_n f_1 + m_n(\delta_m f_1) \\
 f_2 &= m_n(f_1 - w_a) \text{ avec } w_a = \delta_m f_1
 \end{aligned} \tag{3.65}$$

avec $\delta_m = \frac{\Delta m}{m_n}$.

m_n , δ_m et Δm représentent respectivement la valeur nominale, l'incertitude multiplicative et l'incertitude additive sur le module de l'élément TF . e_1 , f_1 et e_2 , f_2 , sont respectivement l'effort et le flux à l'entrée et à la sortie de l'élément TF . w_a , w_b sont des entrées fictives. Le modèle bond graph de l'élément TF en causalité m avec incertitude multiplicative est donné par la *figure 3.19 (a)*. La loi caractéristique de l'élément incertain TF en causalité $\frac{1}{m}$ est donnée comme suit :

$$\begin{aligned}
 e_2 &= \frac{1}{m_n}(1 + \delta_{\frac{1}{m}})e_1 \\
 e_2 &= \frac{1}{m_n}(e_1 - w_a) \text{ avec } w_a = \delta_{\frac{1}{m}} e_1 \\
 f_1 &= \frac{1}{m_n}(1 + \delta_{\frac{1}{m}})f_2 \\
 f_1 &= \frac{1}{m_n}(f_2 - w_b) \text{ avec } w_b = -\delta_{\frac{1}{m}} f_2
 \end{aligned} \tag{3.66}$$

avec $\delta_{\frac{1}{m}} = \frac{-\Delta m}{m_n + \Delta m}$.

Le modèle bond graph de l'élément TF en causalité $\frac{1}{m}$ avec incertitude multiplicative est donné par la *figure 3.19 (b)*.

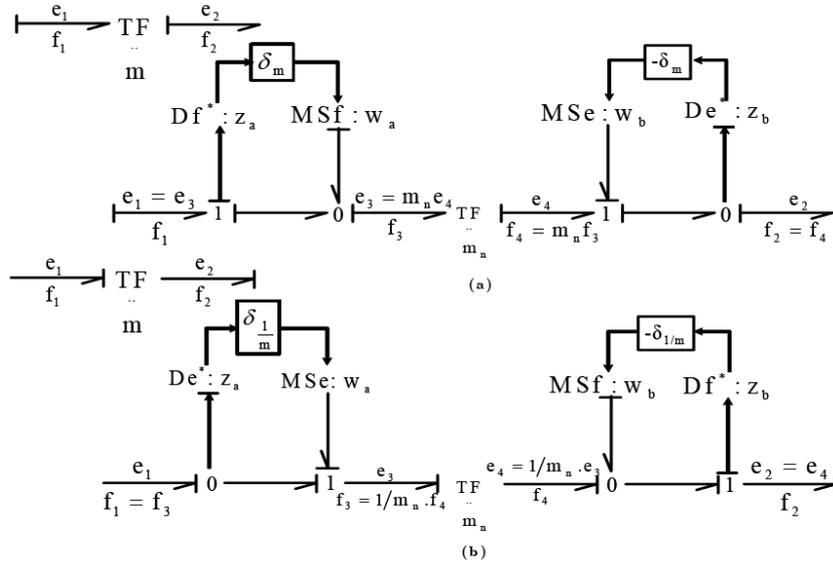


FIGURE 3.19 – Elément TF avec les deux types de causalité.

Elément GY

La loi caractéristique de l'élément incertain GY en causalité r est donnée par l'expression (3.67) :

$$\begin{aligned}
 e_1 &= r_n(1 + \delta_r)f_2 \\
 e_1 &= r_n(f_2 - w_b) \text{ avec } w_b = -\delta_r f_2 \\
 e_2 &= r_n(1 + \delta_r)f_1 \\
 e_2 &= r_n(f_1 + w_a) \text{ avec } w_a = \delta_r f_1
 \end{aligned} \tag{3.67}$$

avec $\delta_r = \frac{\Delta r}{r}$.

r_n , δ_r et Δr représentent respectivement la valeur nominale, l'incertitude multiplicative et l'incertitude additive sur le module de l'élément GY . e_1 , f_1 et e_2 , f_2 , sont respectivement l'effort et le flux à l'entrée et à la sortie de l'élément GY. w_a , w_b sont des entrées fictives.

Le modèle bond graph de l'élément GY en causalité r avec incertitude multiplicative est donné par la *figure 3.20 (a)*.

La loi caractéristique de l'élément incertain GY en causalité $\frac{1}{r}$ est donnée par l'expression (3.68) :

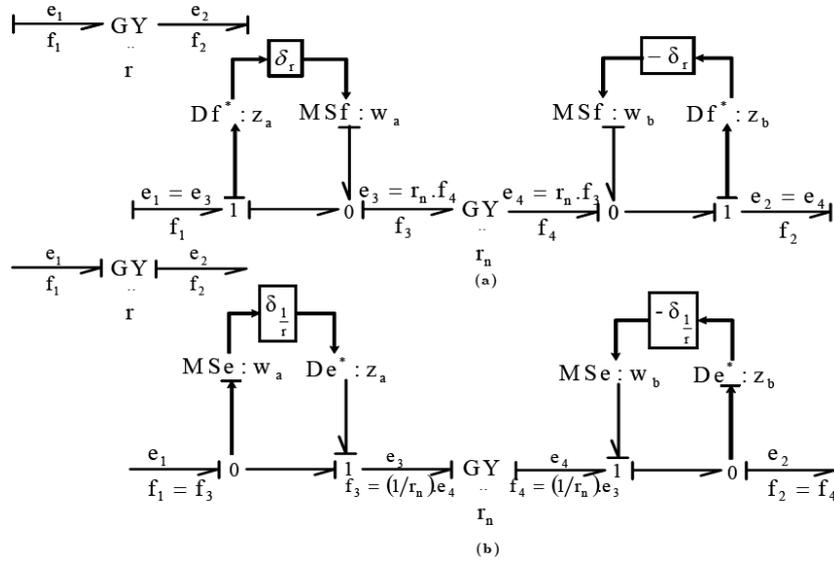


FIGURE 3.20 – Élément GY avec les deux types de causalité.

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \frac{1}{r_n}(1 + \delta_{\frac{1}{r}})e_2 \\
 f_1 &= \frac{1}{r_n}(e_2 - w_b) \text{ avec } w_b = -\delta_{\frac{1}{r}}e_2 \\
 f_2 &= \frac{1}{r_n}(1 + \delta_{\frac{1}{r}})e_1 \\
 f_2 &= \frac{1}{r_n}(e_1 + w_a) \text{ avec } w_a = \delta_{\frac{1}{r}}e_1
 \end{aligned} \tag{3.68}$$

avec $\delta_{\frac{1}{r}} = \frac{-\Delta r}{r_n + \Delta r}$.

Le modèle bond graph de l'élément GY en causalité $\frac{1}{r}$ avec incertitude multiplicative est donné par la *figure 3.20* (b).

3.5.3 Construction d'un modèle BG-LFT

La méthode consiste à remplacer chacun des éléments incertains par son BG-LFT. Le BG-LFT complet peut alors se représenter par le schéma de la *figure 3.21*, où apparaît la structure standard de la *figure 3.10*.

Sur un modèle bond graph, chaque élément correspond à un composant matériel ou un phénomène physique bien précis, facilitant ainsi l'identification des valeurs numériques des paramètres et des incertitudes, puis le passage à la forme LFT se fait par un simple ajout de sources modulées d'effort et de flux sur le modèle. Les variables d'état sur un modèle bond graph sont liées aux éléments dynamiques I et C , et l'aspect causal et structurel du modèle permet la génération automatique d'un modèle d'état incertain sous la forme standard 3.10.

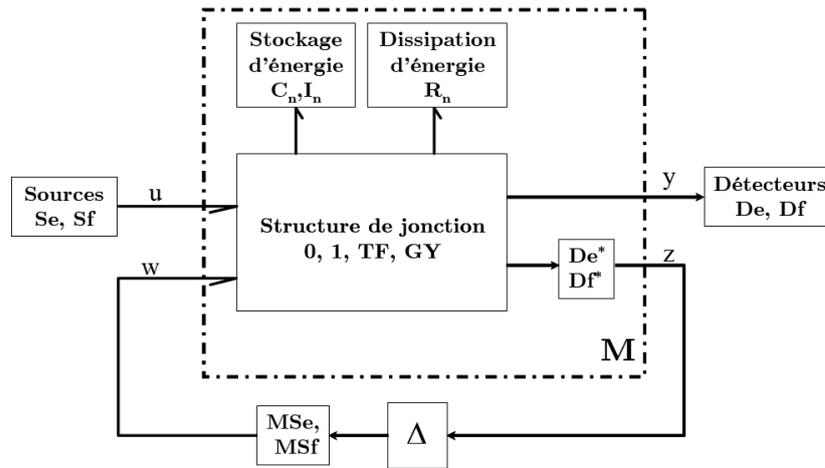


FIGURE 3.21 – Représentation d'un BG-LFT.

Exemple

Soit le circuit R, C, I suivant (Figure 3.22) :

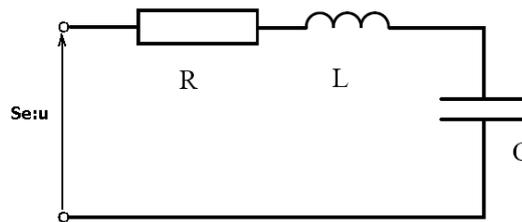


FIGURE 3.22 – Circuit électrique R, C, I .

Le modèle bond graph déterministe du système est donné par la *figure ??*

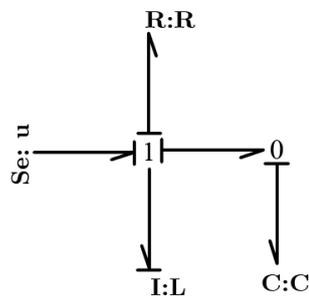


FIGURE 3.23 – Modèle BG déterministe en causalité intégrale d'un circuit R, C, I .

Le modèle bond graph incertain sous forme LFT est obtenu en remplaçant chaque élément incertain par son modèle BG-LFT ; on obtient alors le modèle BG-LFT de la

figure 3.24. Les incertitudes paramétriques δ_R , $\delta_{\frac{1}{R}}$, $\delta_{\frac{1}{C}}$ correspondent à des composants matériels bien précis. Les interactions entre les efforts (ou les flux) introduits par les paramètres nominaux et les incertitudes sont assurées par les contraintes causales et structurelles du modèle ; les efforts (ou les flux) se propagent en suivant des chemins causaux et s'ajoutent au niveau d'une jonction 1 (ou d'une jonction 0).

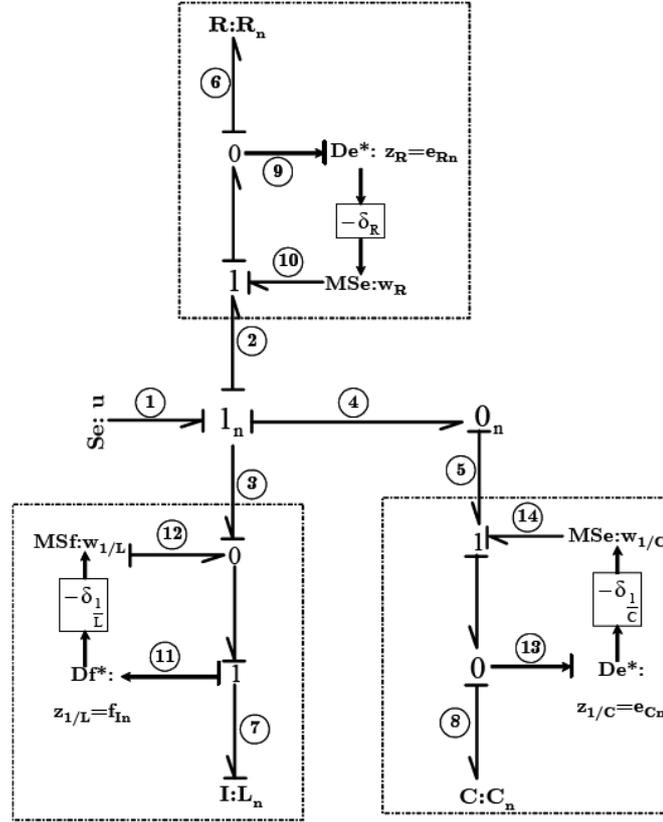


FIGURE 3.24 – Modèle BG-LFT en causalité intégrale d'un circuit R, C, I.

3.6 Génération de résidus robustes

3.6.1 Forme générale de la RRA incertaine

La génération des relations de redondance analytique robustes à partir d'un modèle bond graph propre, observable et sur-déterminé se résume par les étapes suivantes :

- 1ère étape : Vérification de l'état du couplage sur le modèle bond graph déterministe en causalité dérivée préférentielle ; si le système est sur-déterminé, alors poursuivre les étapes suivantes ;
- 2ème étape : Le modèle bond graph est mis sous forme LFT ;

- 3ème étape : L'expression symbolique de la RRA est déduite à partir des équations aux jonctions. Cette première forme sera exprimée par :

$$\Sigma b_i f_{i_n} + \Sigma S f + \Sigma w_i = 0 \quad (3.69)$$

Pour une jonction 0 :

$$\Sigma b_i e_{i_n} + \Sigma S e + \Sigma w_i = 0 \quad (3.70)$$

Pour une jonction 1.

Avec $\Sigma S f$ la somme des sources de flux liées à la jonction 0 , $\Sigma S e$ la somme des sources de flux liées à la jonction 1, et $b = \pm 1$ suivant que la demi-flèche entre ou sort de la jonction.

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

- 4ème étape : Les variables inconnues sont éliminées en parcourant les chemins caux entre les détecteurs ou les sources et les variables inconnues ;
- 5ème étape : Après élimination des variables inconnues, les RRAs incertaines sont sous forme :

$$RRA : \Phi \left(\Sigma S e, \Sigma S f, D e, D f, \widetilde{D} e, \widetilde{D} f, \Sigma w_i, R_n, C_n, I_n, T F_n, G Y_n \right) = 0 \quad (3.71)$$

où $T F_n$ et $G Y_n$ sont respectivement les valeurs nominales des modules des éléments $T F$ et $G Y$. R_n, C_n et I_n sont les valeurs nominales des éléments R, C et I. Σw_i est la somme des entrées modulées correspondant aux incertitudes sur les éléments liés à la jonction.

3.6.2 Génération des seuils adaptatifs

La RRAs générée est constituée de deux parties bien séparées grâce à l'utilisation du modèle LFT, une partie nominale noté r :

$$r = \Phi \left(\Sigma S e, \Sigma S f, D e, D f, \widetilde{D} e, \widetilde{D} f, \Sigma w_i, R_n, C_n, I_n, T F_n, G Y_n \right) \quad (3.72)$$

et une partie incertaine noté $b = \Sigma w_i$ avec :

$$w_i = \Phi \left(D e, D f, \widetilde{D} e, \widetilde{D} f, R_n, C_n, I_n, T F_n, G Y_n, \delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_T F, \delta_G Y \right) \quad (3.73)$$

où $\delta_R, \delta_I, \delta_C, \delta_T F, \delta_G Y$ sont respectivement les valeurs des incertitudes multiplicatives sur les éléments $R, I, C, T F$ et $G Y$

La partie incertaine de la RRA sera utilisée pour générer des seuils adaptatifs de fonctionnement normal sous forme d'une enveloppe qui contient le résidu en absence de défauts. Une incertitude paramétrique peut être définie comme une légère déviation du paramètre de sa valeur nominale, sans aucun effet sur le bon fonctionnement du système. Elle peut être constante ou variable et elle peut varier aléatoirement dans un sens positif comme dans un sens négatif. Compte tenu de cette nature des incertitudes paramétriques,

et en utilisant les propriétés de la valeur absolue d'un réel, l'effort (ou le flux) w_i apporté par une incertitude paramétrique peut être bornée en prenant sa valeur absolue.

$$|w_i| = |\delta_i e_{i_n}|$$

$$|w_i| = |\delta_i f_{i_n}|$$

En effet en démarrant de la RRA de l'équation (3.72), et on remplaçant r par sa valeur (équation (3.73)) dans la RRA on obtient :

$$r + \Sigma w_i = 0 \Rightarrow r = -\Sigma w_i$$

En posant :

$$a = \Sigma |w_i|$$

on a alors $r \leq a$.

Puisque la variation du résidu est l'image de la variation des incertitudes en absence de défauts, il peut alors varier dans un sens positif comme dans un sens négatif. Il est donc nécessaire de générer un seuil inférieur (négatif) noté $-a$.

$$-a \leq r \leq a \tag{3.74}$$

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de diagnostic par l'approche Bond Graph, l'utilisation des observateurs à entrée inconnue ne permet pas d'obtenir une représentation du défaut déduite directement du modèle Bond Graph. Les relations de redondance analytique générées en utilisant la méthode basée sur l'espace de parité sont dépendants de la connaissance du degré de dérivations à appliquer. Les avantages que présente l'utilisation de la dernière méthode sont : la simplicité de la compréhension des (RRAs) puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph, et puis le passage à la forme LFT se fait par un simple ajout de sources modulées d'effort et de flux sur le modèle, image du processus physique, les RRAs sont déduites directement de la représentation graphique, elles peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique.

4

Application et Résultats de Simulations

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont permis de présenter les méthodes de diagnostic à base des modèles bond graph. Dans ce chapitre, nous allons illustrer avec des exemples d'applications la technique basée sur la génération des relations de redondance analytique. Le système de la *figure 4.1* représente une plateforme académique de test des techniques de diagnostic, il est constitué de 3 cuves, 3 vannes et une source de flux.

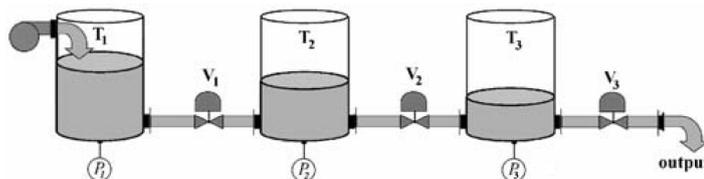


FIGURE 4.1 – Système hydraulique à 3 cuves

Le modèle bond graph correspondant est donné par la *figure 4.2*

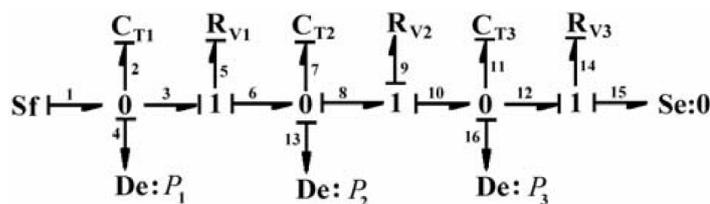


FIGURE 4.2 – Modèle Bond Graph du système hydraulique à 3 cuves

Les relations de redondance analytique générées à partir du modèle de la *figure 4.2* sont :

$$ARR_1 = S_f - \phi_{C_{T1}}(P_1) - \phi_{R_{V1}}(P_1, P_2) = 0 \quad (4.1)$$

Avec :

$$\phi_{C_{T1}}(P_1) = \frac{A_1}{g} \frac{dP_1}{dt}$$

$$\phi_{R_{V1}}(P_1, P_2) = C_{db} \cdot \text{sign}(P_1 - P_2) \sqrt{|P_1 - P_2|}$$

$$ARR_2 = \phi_{R_{V1}}(P_1, P_2) - \phi_{C_{T2}}(P_2) - \phi_{R_{V2}}(P_2, P_3) = 0 \quad (4.2)$$

Avec :

$$\phi_{C_{T2}}(P_2) = \frac{A_2}{g} \frac{dP_2}{dt}$$

$$\phi_{R_{V2}}(P_2, P_3) = C_{db} \cdot \text{sign}(P_2 - P_3) \sqrt{|P_2 - P_3|}$$

$$ARR_3 = \phi_{RV_2}(P_2, P_3) - \phi_{CT_3}(P_3) - \phi_{RV_3}(P_3) = 0 \quad (4.3)$$

Avec :

$$\phi_{CT_3}(P_3) = \frac{A_3}{g} \frac{dP_3}{dt}$$

$$\phi_{RV_3}(P_3) = C_{do} \cdot \text{sign}(P_3) \sqrt{|P_3|}$$

Les 3 résidus représentés dans la *figure 4.3* sont le résultat de l'introduction d'un défaut du type "fuite" de $t = 0.25$ à $t = 0.75$ au niveau de la cuve N°1.

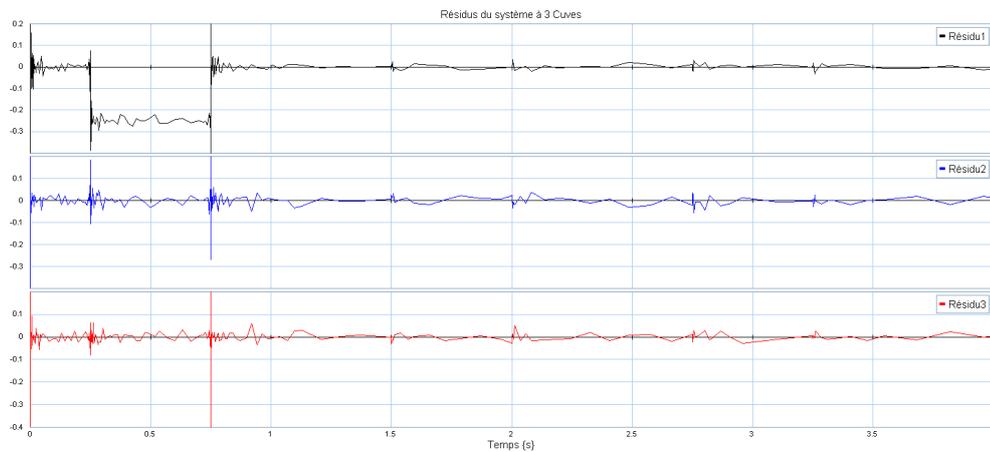


FIGURE 4.3 – Résidus résultants d'un défaut de fuite sur la cuve1

L'introduction du même type de défaut dans la cuve N°2 donne les résultats de la *figure 4.4*

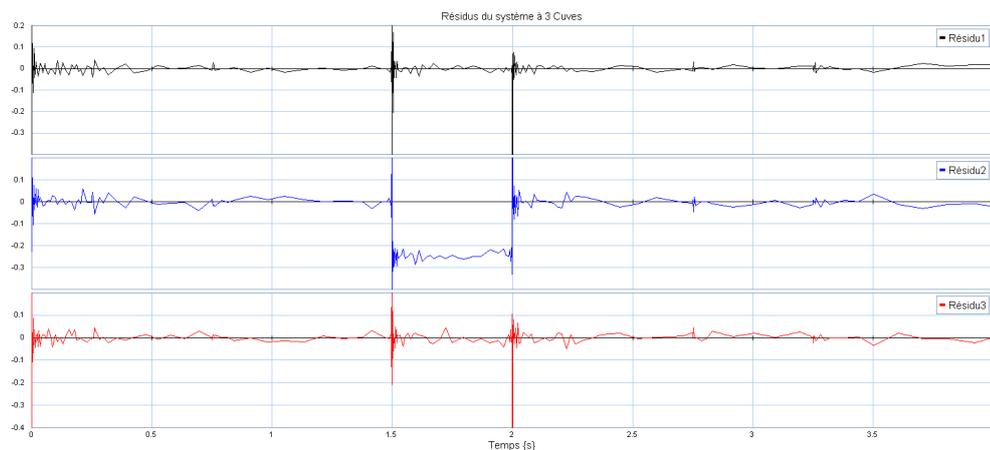


FIGURE 4.4 – Résidus résultant d'un défaut de fuite sur la cuve 2

Le même défaut que les deux précédents est introduit sur la cuve 3, ce qui donne les résidus représentés par la *figure 4.5*

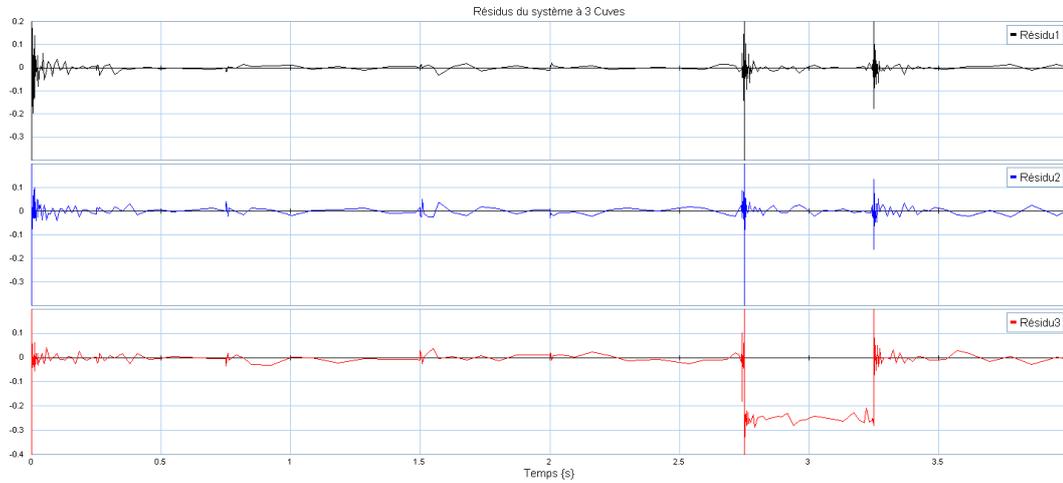


FIGURE 4.5 – Résidus résultant d'un défaut de fuite sur la cuve 3

Le résultat d'un défaut combiné sur les trois cuves en même temps est donné par la *figure 4.6*

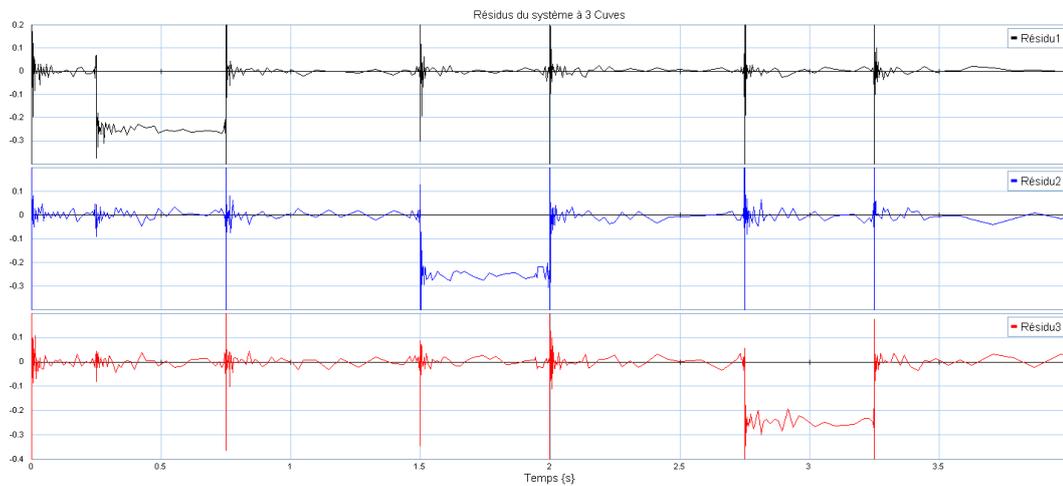


FIGURE 4.6 – Résidus résultant de défauts combinés sur les cuve 1,2 et 3

La réponse du système en présence des trois défauts simultanés est représentée dans la *figure 4.7*

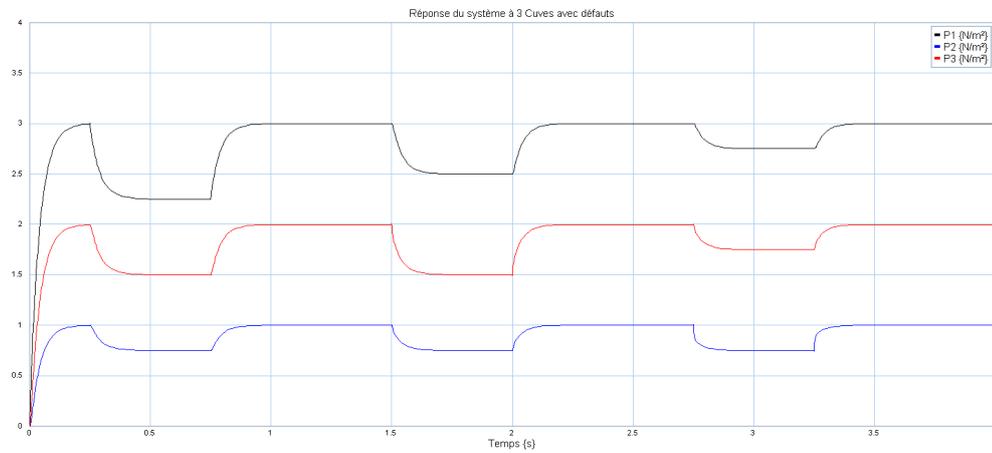


FIGURE 4.7 – Réponse du système pour 3 défauts combinés sur les cuves 1,2 et 3

4.1.1 Discussions

Les résultats d'application de la méthode de diagnostic à base du modèle bond graph ont prouvé l'efficacité de la technique dans la détection et l'isolation des défauts dans un système simple.

- La détection : le résidu est nul tant qu'il n'y a pas de défaut dans le système, l'introduction d'un défaut fait passer le résidu à une valeur non nulle.
- L'isolation : le passage du résidu_{*i*} à une valeurs non nulle (ou supérieur au seuil) est le résultat d'un défaut dans la cuve_{*i*} correspondante.

4.2 Cas d'étude d'un Moteur Asynchrone

4.2.1 Modèle Bond Graph du moteur asynchrone

Le modèle bond graph du moteur asynchrone à cage est donné par la *figure 4.8*

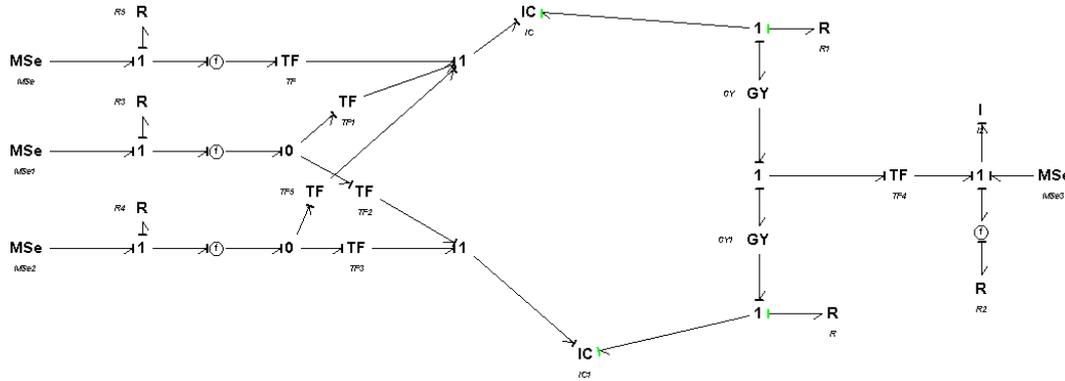


FIGURE 4.8 – Modèle bond graph du moteur asynchrone à cage

La simulation du modèle présenté ci-dessus donne les résultats (i_{s_a} , i_{s_b} , i_{s_c} et la vitesse angulaire) (*figure 4.9*) :

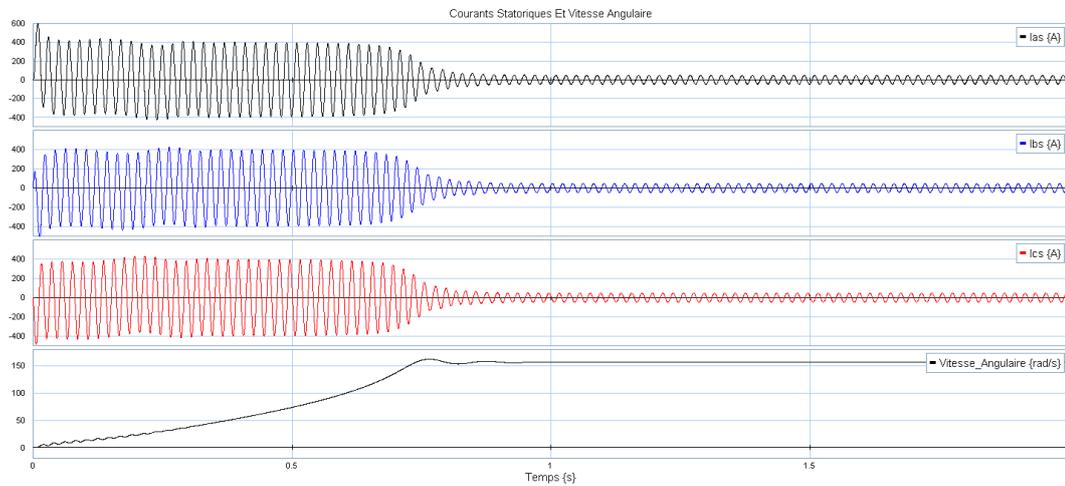


FIGURE 4.9 – Les courants statoriques et la vitesse angulaire du MAS

Le couple en absence de charge est représenté dans la *figure 4.10* :

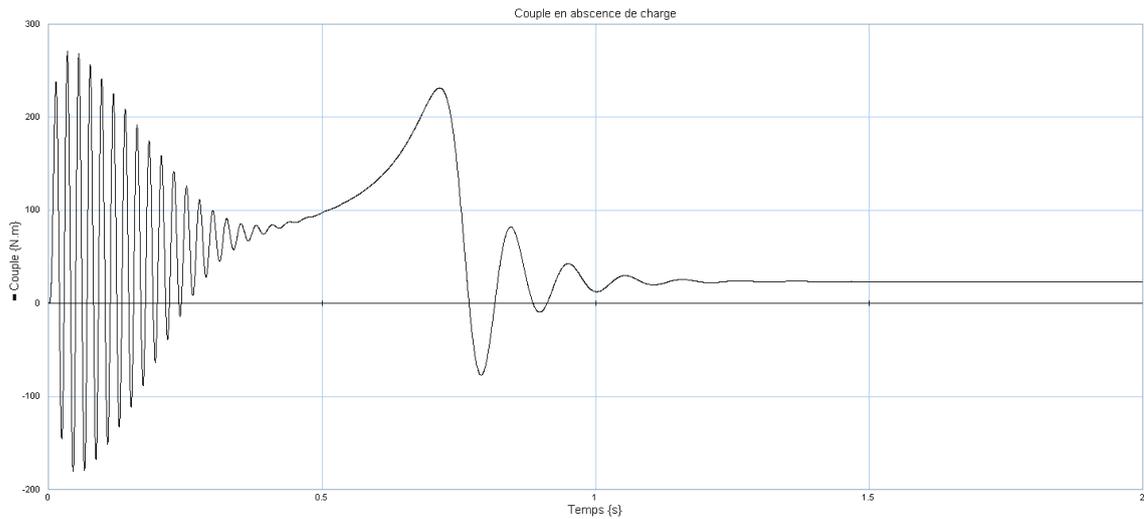


FIGURE 4.10 – Le couple en absence de charge

Le couple en fonction de la vitesse angulaire *figure 4.11*

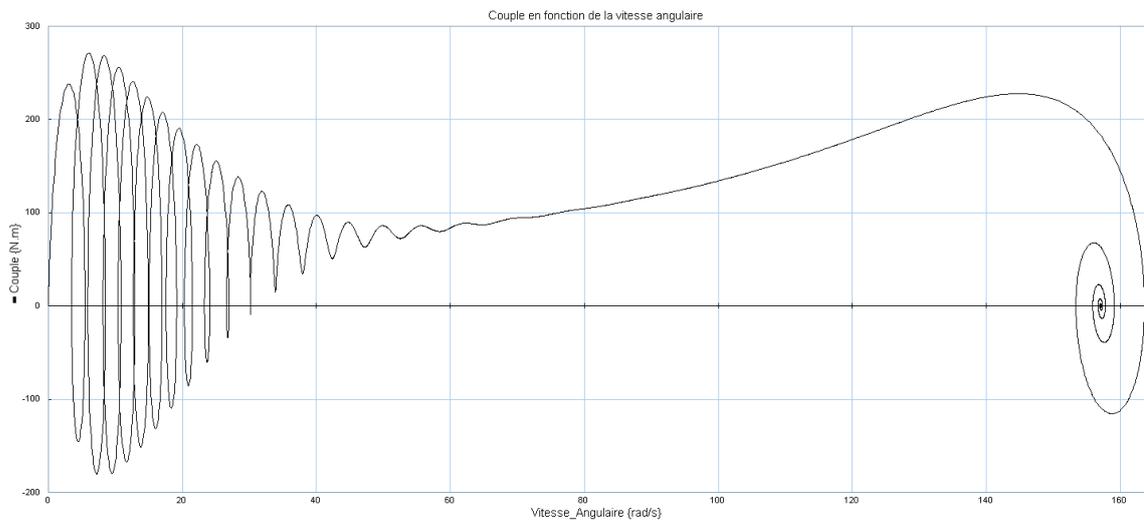


FIGURE 4.11 – Le couple en fonction de la vitesse angulaire en absence de charge

Le développement de l'étape de modélisation du moteur asynchrone est détaillé dans la référence [17].

Cependant, pour introduire des défauts dans le rotor du moteur asynchrone, on est amené à représenter l'expression des courants dans chaque barre. Le modèle bond graph présenté dans le paragraphe suivant va nous permettre d'appliquer les méthodes de diagnostic étudiées dans les chapitres précédants.

4.2.2 Modèle BG du moteur asynchrone à cage pour le diagnostic

Le modèle bond graph de la *figure 4.12* va nous permettre d'introduire des défauts (Cassure de barre, court-circuit de spires dans une bobine,...) dans le moteur asynchrone. (L'étape de modélisation est détaillée dans [17],[28] et [29])

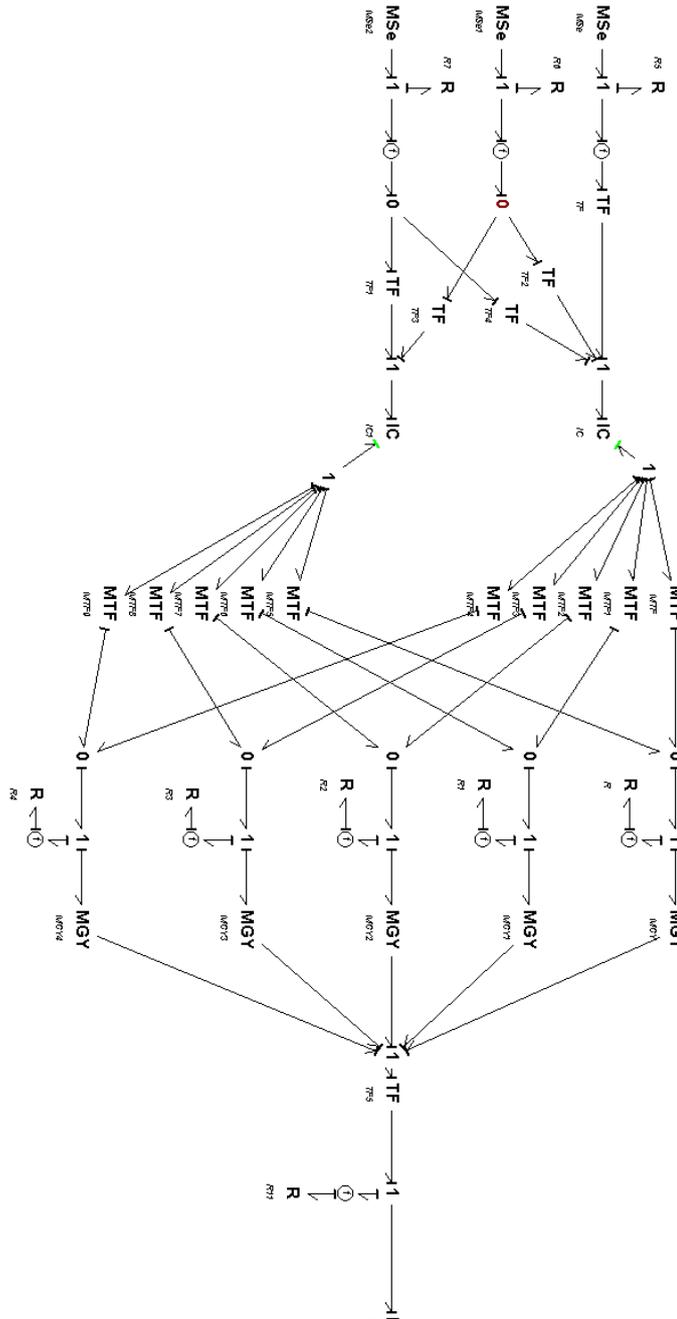


FIGURE 4.12 – Modèle BG du moteur asynchrone pour le diagnostic

Les courants statoriques dans le repère bi-phasé sont :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} \\ 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/m_1 & 1/m_2 & 1/m_3 \\ 0 & 1/m_4 & 1/m_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Les tensions statoriques sont données par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s d/dt & 0 & L_m d/dt & 0 \\ 0 & R_s + L_s d/dt & 0 & L_m d/dt \\ L_m d/dt & L_m \omega_r & R_r + L_r d/dt & L_r \omega_r \\ -L_m \omega_r & L_m d/dt & -L_r \omega_r & R_r + L_r d/dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Le couple électromagnétique pour un moteur asynchrone à P poles est donné par :

$$T_e = \frac{P}{2} [i_{\alpha r} (L_m i_{\beta s} + L_r i_{\beta r}) - i_{\beta r} (L_m i_{\alpha s} + L_r i_{\alpha r})] \quad (4.6)$$

L'équation mécanique est :

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + c\omega + T_L \quad (4.7)$$

tel que :

J	Le moment d'inertie = $0.4kg \cdot m^2$
c	Le frottement de l'arbre + roulements = $0.15N \cdot s/m$
T_L	Le Couple de charge.
$V_{\alpha s}, V_{\beta s}$	Tensions statoriques des axes α et β dans le repère de Park.
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$	Courants statoriques des axes α et β dans le repère de Park.
$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$	Courants rotoriques des axes α et β dans le repère de Park.
R_s	Résistance statorique = 0.0788Ω
R_{r1}, \dots, R_{r5}	Résistances des barres rotoriques = 0.0408Ω
L_s	Inductance statorique = $0.0153H$
L_r	Inductance rotorique = $0.0159H$
L_m	Inductance mutuelle = $0.0147H$
P	Nombre de paire de poles = 2
n	Nombre de barres rotoriques = 5

L'équation caractérisant l'élément IC de la *figure 4.12* est donnée par :

$$\phi_{IC} = \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha s} \\ \lambda_{\alpha r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\alpha r} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

L'expression des courants dans chaque barre rotorique est la suivante [17] :

$$i_{rk} = m \left[i_{\alpha r} \cos \left\{ \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right\} + i_{\beta r} \sin \left\{ \theta + \frac{2(k-1)\pi}{n} \right\} \right] \quad (4.9)$$

tel que :

$$m = \sqrt{\frac{2}{n}}$$

On pose :

$$mr_k = m \cdot \cos\left\{\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right\} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4.10)$$

$$mr_{k+n} = m \cdot \sin\left\{\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right\} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad \text{Avec } n=5 \quad (4.11)$$

Les mr_k représentent les modules des transformateurs modulés de la *figure 4.12*.

En remplaçant l'expression des courants dans l'équation du couple électromagnétique 4.6 :

$$T_e = \sum_{k=1}^5 T_k = \frac{P}{2} \sum_{k=1}^5 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{5}} \left[\lambda_{\beta r} \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \lambda_{\alpha r} \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \right] i_{rk} \quad (4.12)$$

On pose :

$$r_k = \sqrt{\frac{2}{n}} \left[\lambda_{\beta r} \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \lambda_{\alpha r} \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \right] \quad (4.13)$$

Les r_k représentent les modules des gyrateurs $MGY \rightarrow MGY4$ de la *figure 4.12*

Les courants statoriques et la vitesse angulaire sont représentés dans la *figure 4.13*

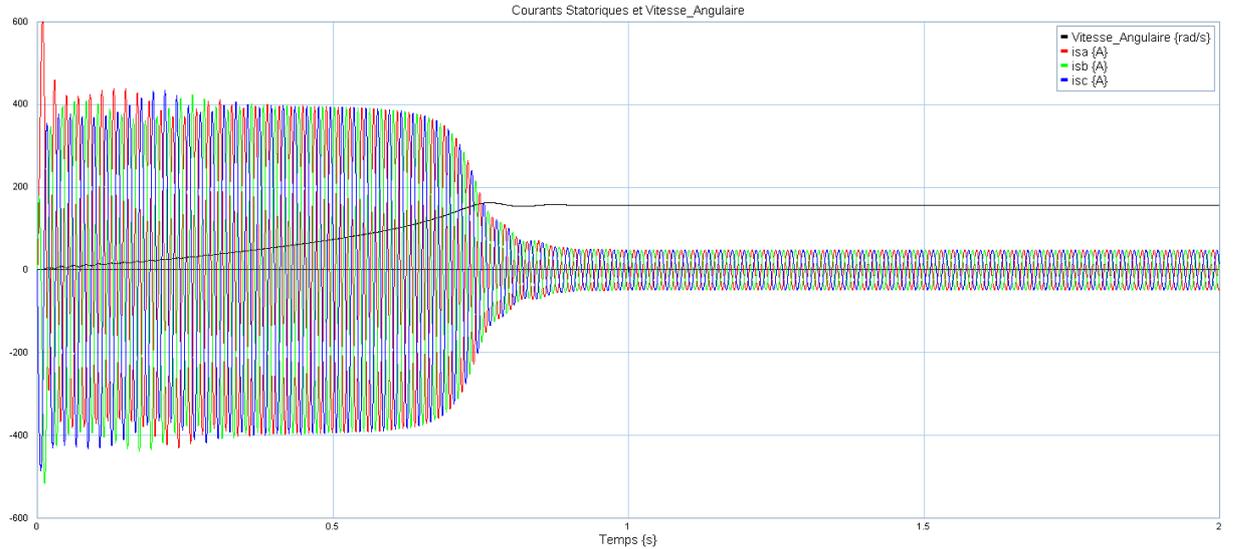


FIGURE 4.13 – Courants statoriques et vitesse du moteur asynchrone sain

Les courants rotoriques du moteur asynchrone à cage sain sont représentés dans la *figure 4.14*

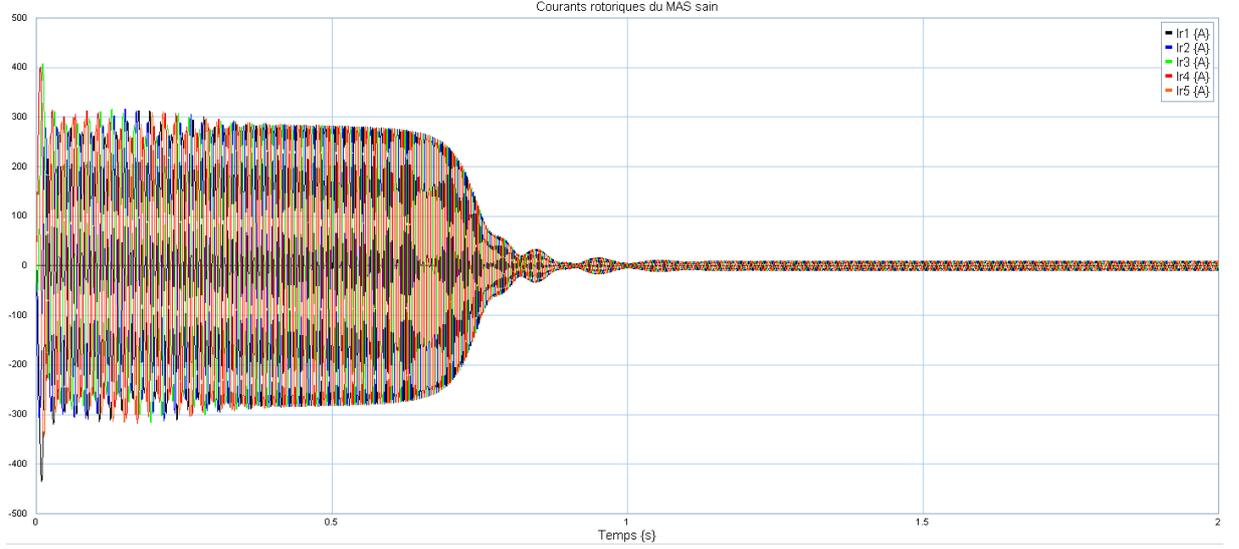


FIGURE 4.14 – Courants rotoriques du moteur asynchrone sain

4.2.3 Diagnostic du moteur asynchrone

L'application de la méthode présentée dans le chapitre précédent sur le modèle de la *figure 4.12* résulte par la génération des relations de redondance analytique suivantes :

$$RRA_1 = V_a - \phi_{R_{sa}} - m_1 \left(\phi_{I_1} - \frac{1}{m_2} (V_b - \phi_{R_{sb}}) - \frac{1}{m_3} (V_c - \phi_{R_{sc}}) \right) = 0 \quad (4.14)$$

$$RRA_2 = \phi_{I_2} + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5 = 0 \quad (4.15)$$

Avec :

$$\phi_{IC} = \begin{bmatrix} \phi_{I_1} \\ \phi_{I_2} \end{bmatrix}$$

$$\phi_i = m_{r_i} \left(\phi_{R_{r_i}} + \frac{r_i}{m_6} \omega \right)$$

Les résidus d'un moteur asynchrone sans défaut sont représentés dans la *figure 4.15*

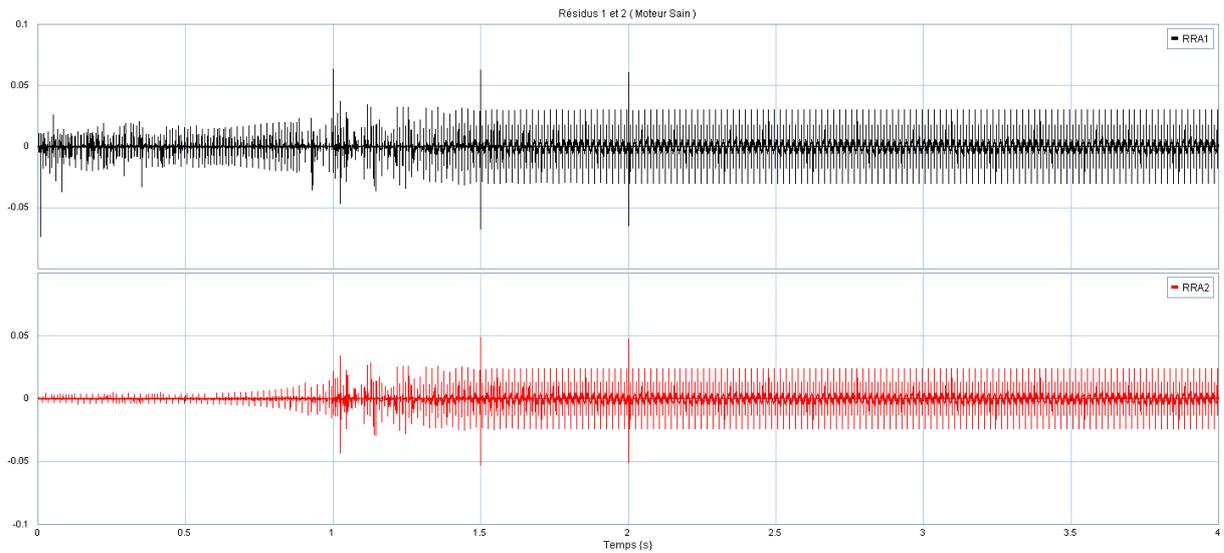


FIGURE 4.15 – Résidus d'un moteur asynchrone sain

Une cassure de barre à l'instant ($t = 1.5s$) au niveau du rotor du moteur asynchrone à cage produit les résidus suivants (figure 4.16) :

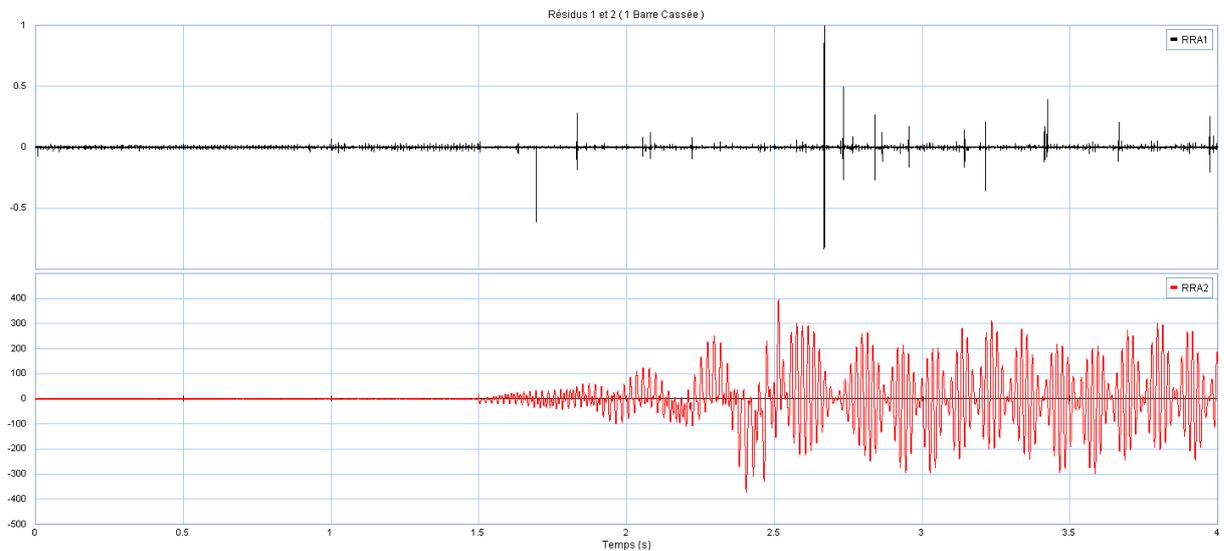


FIGURE 4.16 – Résidus d'un moteur asynchrone avec 1 barre cassée

Les courants rotoriques sont représentés dans la *figure 4.17* :

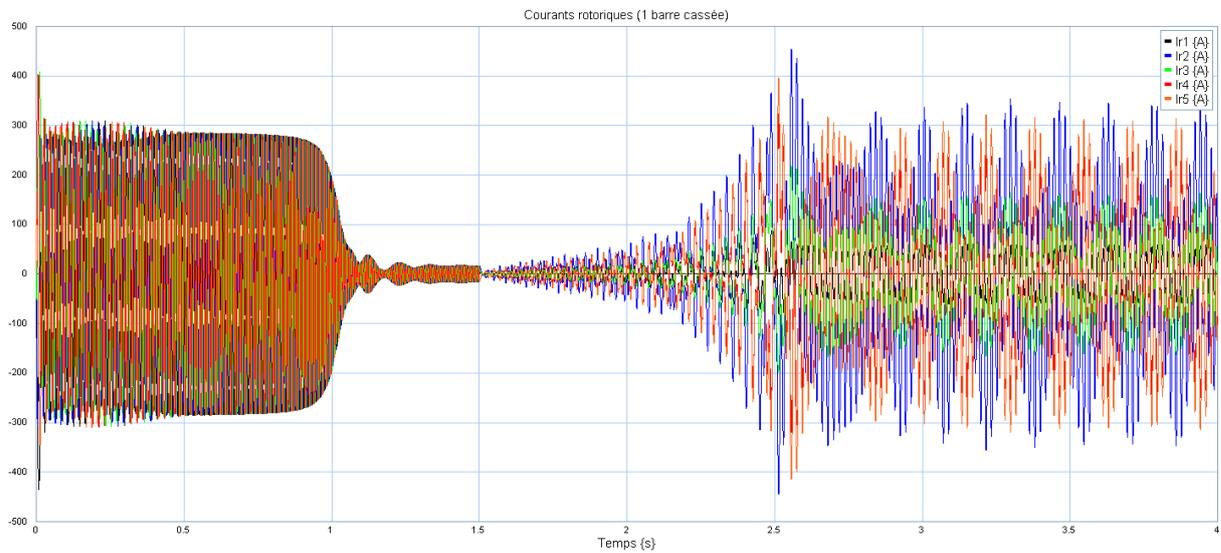


FIGURE 4.17 – Courants rotoriques d'un moteur asynchrone avec 1 barre cassée

Un court-circuit des spires à ($t = 1.5s$) d'une bobine statorique produit les résidus représenté par la *figure 4.18*

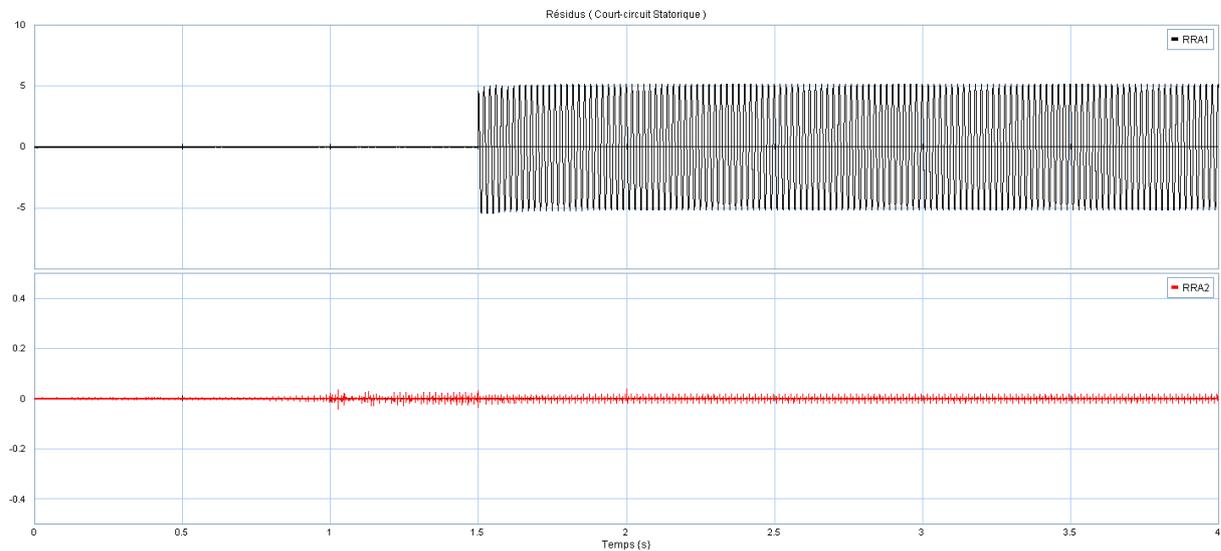


FIGURE 4.18 – Résidus avec court-circuit dans les spires d'une bobine statorique

Discussions

Un défaut sur le moteur asynchrone est détecté par le passage des résidus obtenu à partir des RRAs à une valeur non-nulle. L'isolation est obtenue par la sensibilité de chacune des RRAs à un défaut en particulier.

Un défaut sur le rotor (Cassure de barre) est isolé par le passage du résidu 2 (RRA2) à une valeur non nulle (*figure 4.16*). Un défaut sur le stator (Court-circuit) est isolé par le du résidu 1 (RRA1) à une valeur non nulle (*figure 4.18*).

4.2.4 Diagnostic robuste du moteur asynchrone à cage

Le modèle Bond Graph incertain d'un moteur asynchrone à cage est représenté par la *figure 4.19* :

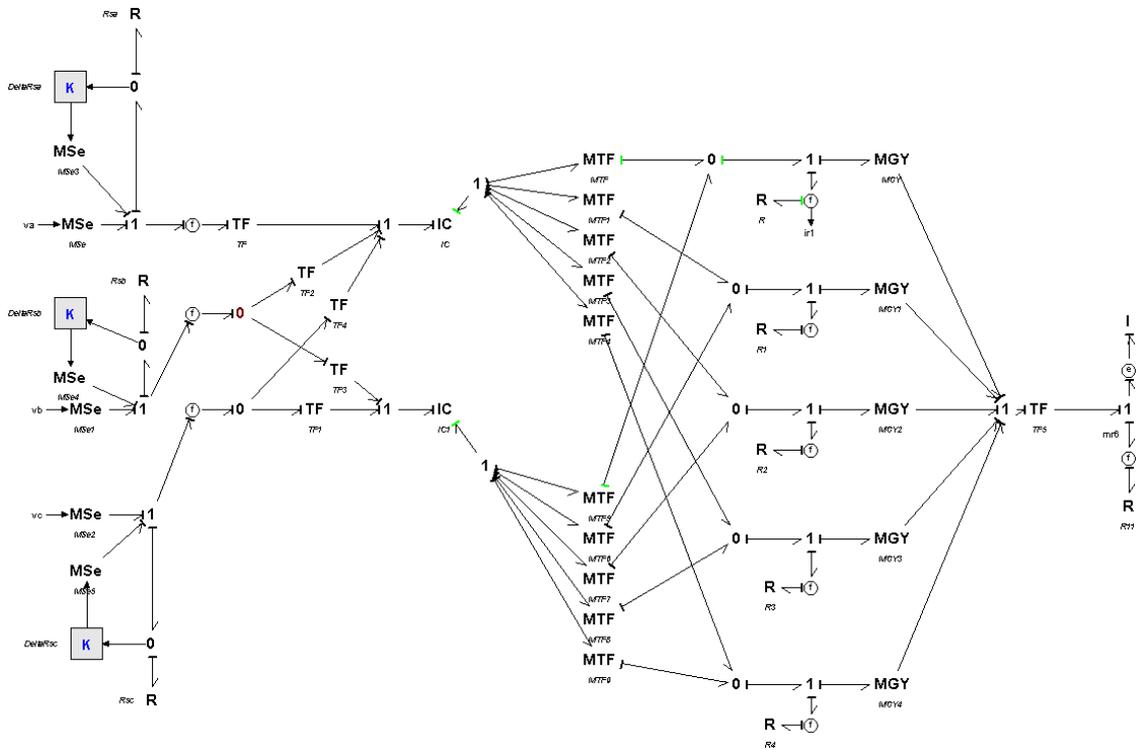


FIGURE 4.19 – Modèle BG-LFT du moteur asynchrone à cage

Une déviation dans la valeur de la résistance d'une bobine statorique entraine une variation du résidu 2, l'alarme n'est pas déclenchée tant qu'il n'y a pas de dépassement de la valeur des seuils adaptatifs ($\pm a$) (*figure 4.20*).

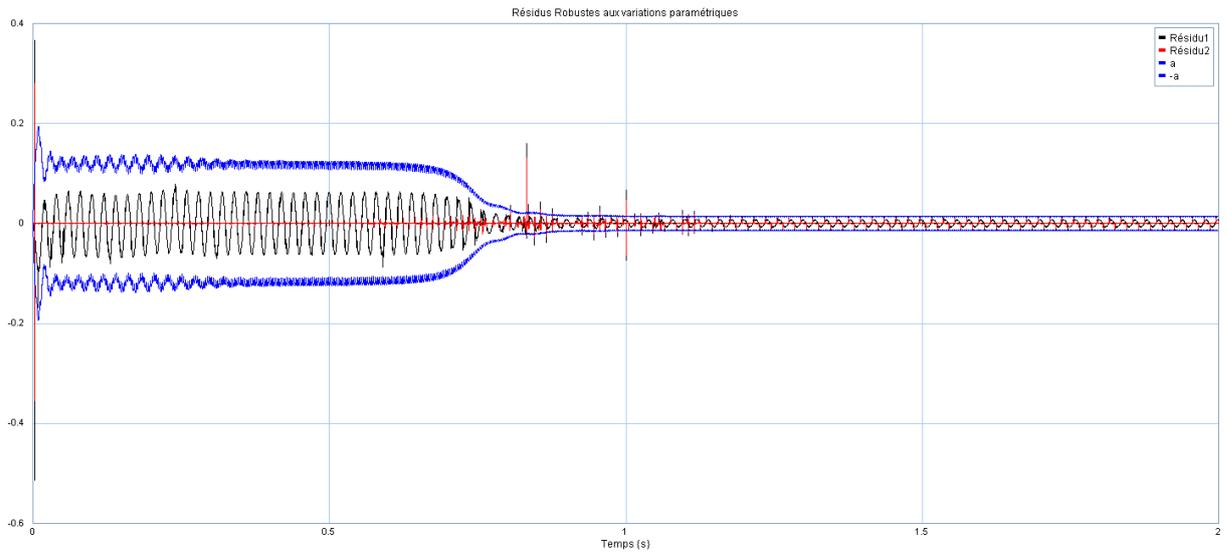


FIGURE 4.20 – Résidus robustes aux variations paramétriques

L'indice de détection D nous permet par la suite de détecter le défaut. Un court-circuit dans une bobine statorique est détecté et isolé par le passage de l'indice de détection D à une valeur positive (figure 4.21).

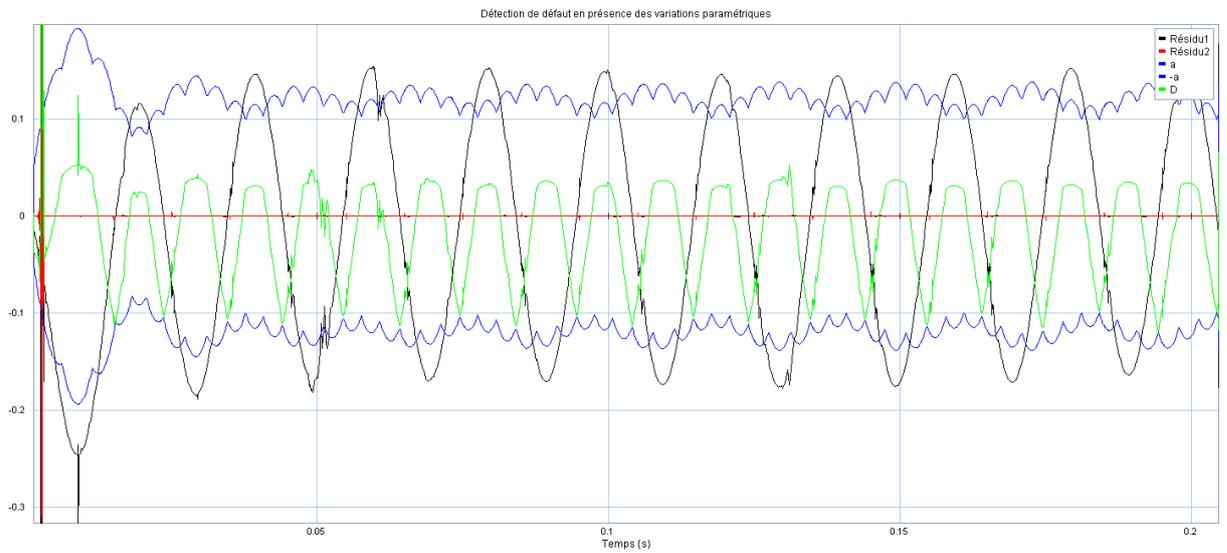


FIGURE 4.21 – Détection de défaut en présence des variations paramétriques

4.3 Conclusion

La modélisation BG LFT et le diagnostic robuste d'un moteur asynchrone à cage sont présentés dans ce chapitre. L'interaction des différents phénomènes est prise en considération grâce aux propriétés énergétiques de l'outil bond graph. L'utilisation de la forme LFT pour modéliser les éléments bond graphs a permis de générer, à partir du modèle, les résidus et les seuils adaptatifs de fonctionnement normal. L'indice de détection permet de détecter les défauts avec prise en charge des variations paramétriques dans le système à surveiller.

Conclusions générales et perspectives

Conclusions

Dans le contexte économique actuel, la performance des entreprises doit être toujours croissante. Celles-ci doivent produire toujours mieux, à moindre coût et dans des conditions de sécurité de plus en plus sévères. De plus, les procédés sont de plus en plus complexes et de plus en plus informatisés. Ainsi, il est de moins en moins évident ou intuitif de savoir si tout se passe bien dans un procédé. Dans ce but, la surveillance des procédés permet la détection et le diagnostic d'anomalies (de fautes). Ainsi, plus une faute est rapidement détectée, et correctement diagnostiquée, et plus la production du procédé sera conforme aux exigences requises, dans les conditions de sécurité requises. Nous avons ainsi présenté une méthode de diagnostic robuste par bond graph permettant d'inclure dans un seul et même outil : la modélisation et le diagnostic.

Dans le premier chapitre, nous avons pu voir rapidement les principales approches possibles (méthodes à base de modèles analytiques, méthodes à base de connaissances) pour la surveillance des systèmes. En ciblant notre étude sur les méthodes à base de modèles, nous avons alors passé en revue quelques méthodes de détection et de diagnostic. Nous avons alors, sur la base de plusieurs critères, effectué un choix parmi les méthodes à base de modèles. Ce choix s'est porté sur le bond graph. Le choix de l'outil bond graph est dû à son aspect énergétique et multi physique.

Suite au choix de cet outil, nous avons présenté le bond graph de manière approfondie dans le second chapitre. Après l'introduction des éléments de base du langage bond graph, nous avons présenté le principe fondamental de causalité. Suite à cette présentation du bond graph, nous avons illustré cette partie du mémoire par des exemples de modélisation.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la réalisation, en utilisant les bond graph, des différentes phases du diagnostic robuste des systèmes. Dans un premier temps, nous avons considéré le diagnostic à base d'observateurs à entrée inconnue. Ainsi, nous avons montré qu'il est difficile (et pas pratique) d'utiliser cette méthode avec un modèle bond graph parcequ'on doit exprimer les équations d'états depuis le modèle graphique pour pouvoir, par la suite, utiliser les observateurs d'une manière classique. Suite à cela, nous avons passé à l'utilisation d'une technique basée sur l'espace de parité. Nous avons déduit, à l'aide d'un exemple d'illustration que la détermination de l'ordre de dérivation des relations de redondance analytique n'est pas fixé, ce qui pose des problèmes au niveau de l'étape de décision. Ces résultats nous ont orientés vers l'utilisation

des relations de redondance analytique générées après l'analyse structurelle à l'aide du modèle bond graph du système considéré. Enfin, nous avons exposé de manière détaillée le principe du diagnostic robuste, en tenant compte des erreurs de modélisation. La représentation BG-LFT du modèle, permet de générer des relations de redondance analytiques robuste aux variations paramétriques. Ainsi, nous avons présenté une méthode capable de détecter un défaut sans avoir de fausses alarmes résultantes d'une variation paramétrique du procédé par rapport au modèle bond graph.

Le dernier chapitre a permis d'illustrer la méthode présentée sur des exemples d'application. Nous avons alors pu voir les performances de la technique dans des cas plus complexes.

Perspectives

Les perspectives de ces travaux sont nombreuses. Concernant le diagnostic, souvent les systèmes complexes sont non linéaires et non stationnaires, d'où la difficulté de développer des algorithmes de diagnostic couvrant toute leurs plages de fonctionnement. Le diagnostic robuste des systèmes non stationnaires est une thématique de perspective, qui peut être développée par une approche multi-modèle. La difficulté dans ce genre d'approche se situe dans la transition discontinue entre les modèles qui génère de fausses alarmes.

Une autre perspective évidente tient au fait qu'une détection d'un défaut et son isolation ne suffisent pas pour contourner l'état dégradé dans laquelle se trouve le système. On doit, par la suite reconfiguré le contrôleur pour qu'il prend en charge le défaut, et ainsi guidé le système vers un point de fonctionnement optimal.

Pour conclure, nous estimons que le bond graph est un outil prometteur dans le domaine de la surveillance des procédés complexes, une nouvelle voie malheureusement très peu exploitée jusqu'à présent et qui mériterait d'être davantage approfondie dans l'avenir.

A

Affectation de causalités

TABLE A.1 – Règles de causalités des différents éléments Bond Graph

Élément	Symbole	Équation causale	Bloc diagramme	Règle
Source d'effort Se		e donné		L'effort (ou flux) imposé par la source d'effort (ou de flux) est une donnée connue pour le système.
Source de flux Sf		f donné		Règle : la causalité est obligatoire.
Jonction 0		$\begin{cases} e_2 = e_1 \\ e_3 = e_1 \\ e_4 = e_1 \\ f_1 = -f_2 + f_3 - f_4 \end{cases}$		Un seul effort peut donner sa valeur aux autres, (ici e_1). Règle : un seul trait causal près de la jonction 0 .
Jonction 1		$\begin{cases} f_2 = f_1 \\ f_3 = f_1 \\ f_4 = f_1 \\ e_1 = -e_2 + e_3 - e_4 \end{cases}$		Un seul flux peut donner sa valeur aux autres, (ici f_1). Règle : un seul lien sans trait causal près de la jonction 1 .
TF		$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$		Un effort et un flux sont imposés au TF . Règle : un seul trait près de TF .
GY		$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \\ f_2 = \frac{1}{r} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r} e_2 \end{cases}$		Deux flux ou deux efforts sont imposés au GY . Règle : deux traits ou aucun trait près de GY .
C		$e = \Phi_C(\int f dt) = \Phi_C(q)$ $f = \frac{d}{dt}(\Phi_C^{-1}(e))$		Causalité préférentielle intégrale. Causalité dérivée.
I		$f = \Phi_I(\int e dt) = \Phi_I(p)$ $e = \frac{d}{dt}(\Phi_I^{-1}(f))$		Causalité préférentielle intégrale. Causalité dérivée.
R		$e = \Phi_R(f)$ $f = \Phi_R^{-1}(e)$		Causalité résistance. Causalité conductance.

Bibliographie

- [1] M. Basseville and I.V. Nikiforov. *Detection of Abrupt Changes : Theory and Application*. Prentice Hall, ISBN 0-13-126780-9, 1993.
- [2] R. V. Beard. *Failure Accommodation in Linear Systems Through Self-Reorganization*. PhD dissertation, MIT, Dep, Aero, Astro Cambridge, février 1971.
- [3] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. *Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Springer-Verlag, 2003.
- [4] J. F. Broenink. 20-sim software for hierarchical bond-graph/block-diagram models. *Simulation Practice and Theory*, Volume 7, Number 5, 15 December 1999 , pp. 481-492(12).
- [5] L.G. Chittaro, C. Guido, E. Tasso et E. Toppano. Functional and teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical system : A case study in diagnosis. In *IEEE Trans. On Syst. Man and Cybernetics*, volume 23, 1993.
- [6] G. Dauphin-Tanguy, A. Rahmani, and C. Sueur. Bond graph aided design of controlled systems. *Simulation Practice and Theory*, 7(5-6) :493-513, 1999.
- [7] A. Djeziri. *Diagnostic des systèmes incertains par l'approche bond graph*. Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 17 décembre 2007.
- [8] B. Dubuisson. *Diagnostic et Reconnaissance Des Formes*. Hermes, Paris, 1990.
- [9] P.J. Feenstra, P.J. Mosterman, G. Biswas, P.C. Breedveld, Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of complex flow processes, in : *Proc. ICBGM'01, Simulation Series*, vol. 33, no. 1, 2001, pp. 77-82, ISBN : 1-56555-103-6.
- [10] P.M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results. *Automatica*, 26(3) :459-474, 1990.
- [11] S. Gentil. *Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus*. In *Actes de L'école D'été D'automatique de Grenoble*, Grenoble, France, 2-6 septembre 1996.
- [12] C. Ghiaus. Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. *Energy and buildings*, 30 :221-232, 1999.

-
- [13] P. Haves, T. Salsbury et J. Wright. Condition monitoring in HVAC sub-systems using first principles models. *ASHRAE Transactions (Part 1)*, pages 519-527, 1996.
- [14] R. Iserman. Process fault detection based on modeling and estimation methods. *A Survey Automatica*, 20(4) :387-404, 1984.
- [15] R. Iserman et B. Freyermuth. Process Fault Diagnosis Based on process Model Knowledge-Part I : Principe For Fault Diagnosis With Parameter Estimation. *Transaction of the ASME*, 113 :620-626, 1991.
- [16] Isermann, R. and P. Balle (1997). Trends in the Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes, *Control Engineering Practice*, 5(5), pp. 709-719.
- [17] J. Kim and M. Bryant. Bond graph model of a squirrel cage induction motor with direct physical correspondence, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 122, pp. 461-469, September 2000.
- [18] T. Kohda, H. Katsube, H. Fujihara et K. Inoue. Identification of system failure causes using bond graph models. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceedings*, 5 :269-274, 1993.
- [19] W. Lee, C. Park et G. Kelly. Fault detection in an air-handling unit using residual and recursive parameter identification methods. *ASHRAE Transactions (Part 1)*, pages 528-539, 1996.
- [20] S. F. Lin et A. P. Wang. Design of Observers with unknown inputs using eigenstructure assignment. *International Journal of Systems Science*, 31(6) :705-711, 2000.
- [21] D. G. Luenberger,. An Introduction to Observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol AC-16, n°6, pp 596-602, décembre 1971.
- [22] D. Maquin ET J. Ragot. *Diagnostic Des Systèmes Linéaires*. Hermes, Paris, France, hermes edition, 2000.
- [23] P. Millot. *Supervision Des Procédés Automatisés et Ergonomie*. Editions Hermes, Paris, 1988.
- [24] B. Ould Bouamama et G. Dauphin-Tanguy. Modélisation par Bond Graph. *Eléments de Base pour l'énergétique. Techniques de l'Ingénieurs*, 16 pages BE8280, 2008.
- [25] B. Ould Bouamama, M. BAYART et B. CONRARD. FDI smart actuators using bond graphs and external models. In *World Congress on Automatic Control IFAC*, Barcelona, Spain, July, 21-26 2002.
- [26] A. Oustaloup. (1994). *La robustesse*. Hermès ISBN. 2-86601-442-1.
- [27] J. Ragot et D. Maquin. An algorithm for obtaining redundancy equation of LTI systems. *Automatica*, 30(3) :537-542, 1994.
- [28] B. Umesh Rai et L. Umanand. Bond graph model of doubly fed three phase induction motor using the Axis Rotator element for frame transformation. *Simulation Modelling Practice and Theory Volume 16, Issue 10, November 2008, Pages 1704-1712*.

-
- [29] B. Umesh Rai et L. Umanand. Generalised bond graph model of a rotating machine. *International Journal of Power Electronics* 2009 - Vol.1, No.4 pp. 397 - 413.
- [30] A. S. Willsky. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. *Automatica*, Vol 12, pp 601-611, 1976.