

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Abou bekr Belkaid Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique
Filière :Automatique et informatique industrielle

Projet de Fin d'Etudes

Intitulé :

Supervision d'un système dynamique par les bonds graphs

Présenté par :

CHIKH BEKADA AICHA

Jury :

Mr. BENYAHYA Boumediène

UABB Tlemcen : Président

Mme. BENALLEL Mounira

UABB Tlemcen : Encadreur

Mr YACOUBI Boumediène

UABB Tlemcen : Examineur

Mr. HADJ ABDELKADER Amine

UABB Tlemcen : Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Toute histoire a une fin. Celle de cette 'mémoire' ne déroge pas à la règle. Il est de coutume dans un mémoire de thèse de débiter par la fin : voici donc venu le temps des remerciements.

Nous tenons tout d'abord à remercier le Bon Dieu le Tout Puissant Pour son aide et Pour la patience et la volonté Qu'il nous a Donnée pour réussir Ce Modeste Travail.

Au Terme de ce travail, nous voudrions aussi adresser nos sincères remerciements à Mme M. Benallel pour son encadrement et son encouragement tout au long de ce projet ainsi que Mr B. Benyahia.

Nous tenons, également à remercier les membres du jury Mr. BENYAHYA Boumediène, Mr. Hadj Abdelkadder et Mr. YAKOUBI Boumediène. Qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

CHIKH BEKADA Aicha



Dédicace



À ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

À mon cher Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

À mes sœur Ghizlene et Fatiha et mon frère Bachir

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Grand bisou.

À tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

À mes chers collègues

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Aïcha

Résumé — Dans ce mémoire nous avons étudié une nouvelle approche intégrée pour la supervision. Nous avons utilisé un seul outil pour la modélisation, la génération des indicateurs de défaillances, l'analyse de la surveillabilité en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance. Nous allons voir qu'il est possible de décrire un système physique par ses interactions énergétiques. Par la suite, on exposera le concept le plus fondamental du Bond Graph, c'est la causalité. Nous nous au diagnostic à base du modèle bond graph nous présenterons le l'application des outils développés de cet logiciel sous forme d'une boîte à outils dans le système sur le moteur à courant continue

Mots clés : supervision dynamique, MSF/MSE, FDI/FTC, Symbols Shakti, bond graph en BGI/BGD, RRAs.

Abstract— In this thesis we have studied a new integrated approach for supervision. We used a single tool for the modeling, the generation of fault indicators, the monitoring analysis in order to meet the specifications for the monitoring. We will see that it is possible to describe a physical system by its energetic interactions. Next, we will discuss the most fundamental concept of the Bond Graph, and that is causality. We make the diagnosis based on the model bond graph we will present the application of the tools developed from this software in the form of a toolbox in the system on the DC motor.

Keywords : dynamic supervision, MSF / MSE, FDI / FTC, Symbols Shakti, bond graph in BGI / BGD, RRAs.

ملخص : في هذه الرسالة قمنا بدراسة نهج متكامل جديد للإشراف. استخدمنا أداة واحدة للنمذجة ، وإنشاء مؤشرات الأعطال، وتحليل المراقبة من أجل تلبية مواصفات المراقبة. سنرى أنه من الممكن وصف نظام مادي من خلال تفاعلاته النشطة. بعد ذلك، سنناقش المفهوم الأساسي لرسم البياني للسندات وهو السببية. نقوم بإجراء التشخيص بناءً على الرسم البياني للسندات النموذجية، وسوف نقدم تطبيق الأدوات المطورة من هذا البرنامج في شكل صندوق أدوات في النظام على محرك التيار المستمر.

الكلمات الدالة : اشراف ديناميكي ، عزل الكشف عن الخطأ مصدر، القوة المعدل ،مصدر التدفق المعدل ،الرسم البياني للسندات

*Liste des
abréviations*

BG	Bond graph
De	Détecteur d'effort
Df	Détecteur de flux
Se	Source d'effort
Sf	Source de flux
R	Résistance
C	capacité
I	Inertie
GY	gyrateur
TF	transformateur
MSe	Sources modulées d'effort
MSf	Sources modulées de flux
MGY	Gyrateur modulé
MTF	Transformateur modulé
SSe	Source de signal
RRA	relation de redondance analytique
FDI	fault detection isolation
FTC	Fault tolerant control
BGI	Bond graph en causalité intégrale
BGD	Bond graph en causalité dérivé
e	effort
f	flux
k	gain
p	puissance
T	Temps
MSF	Matrice de Signature des Fautes

	TABLE DES FIGURES
--	-------------------

1.1	inspirée de [8], les parties importantes d'un SAP	11
1.2	Différents types de défauts d'un système physique.	14
1.3	L'effet de différents types de défauts capteur sur les mesures.	15
1.4	Représentation graphique des défauts actionneur les plus répandues [14].	15
1.5	Évolution temporelle d'un défaut : a) abrupt, b) graduel et c) intermittent.	16
1.6	Transition d'un état de bon fonctionnement à un état de panne.	18
1.7	Une classification des méthodes de diagnostic.	19
1.8	Principe des méthodes de diagnostic avec modèles.	20
1.9	Principe de diagnostic basé sur la génération des résidus.	20
1.10	Principe des méthodes de classification.	25
1.11	Schéma du diagnostic utilisant des techniques de classification	26
1.12	Schéma général d'un neurone	27
1.13	structure de diagnostic mono modèle.	29
1.14	structure de diagnostic multi-modèle	29
1.15	schéma de diagnostique préalable	30
1.16	redondances avec les structure séries et parallèles.	32
1.17	Schéma usuel pour la détection et la localisation de défauts	32
1.18	Zones temporelles pour le calcul d'indicateurs de performance du diagnostic	33
2.1	Élément (a), éléments et ports (b), bond graph (c)	36
2.2	Informations fournies par une représentation bond graph	37
2.3	Le sens de transmission de la puissance.	37
2.4	Équivalences des variables généralisées dans des domaines physiques	37
2.5	variables généralisées pseudo bond graph	38
2.6	Source de flux et d'effort	39
2.7	les sources effort et flux et les sources modulé d'effort et flux.	40
2.8	Relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs	40
2.9	Élément résistif	40
2.10	Modèle BG de l'élément résistif (électrique (u, i)et domaine mécanique(f, v)	41
2.11	Élément R à 1 port, représentation spécifique au domaine physique	41
2.12	Élément de capacité	41
2.13	Modèle BG de l'élément de capacité : domaine électrique	41
2.14	Représentation graphique de l'élément C.	42
2.15	Énergie stockée par un élément C dans le cas linéaire (a) et non linéaire (b)	42
2.16	Élément I à 1 port, représentation générale	42
2.17	BG de l'élément inertiel D. électrique (u, i)et D . mécanique(f, v)	43

2.18	Élément I à 1 port, représentation domaine électrique et mécanique	43
2.19	Éléments de base de bond graph résume les éléments bond graph	43
2.20	Élément TF (a) : Transformateur électrique.(b) : Piston hydraulique.(c) : Levier.	44
2.21	représentation BG d'un GY.	45
2.22	Élément de jonction «0»	45
2.23	Jonction 0 (a) : S. mécanique.(b) : S. électrique.(c) : S. hydraulique	45
2.24	Élément de jonction «1»	46
2.25	Jonction 1 (s. mécanique, s. électrique, Système hydraulique).	46
2.26	les symboles et la lois générique de chaque type de jonction.	46
2.27	Lien d'information, détecteurs d'effort et de flux.	47
2.28	Bond graph du Circuit électrique	48
2.29	Bond graph d'un système mécanique	49
2.30	simplification de BG de système mécanique	49
2.31	Causalités en bond graph	50
2.32	Contraintes causales	50
2.33	Exemple d'application des étapes d'affectation	51
2.34	Source d'effort SE	51
2.35	Source de flux Sf	51
2.36	Jonctions 0 avec causalité	51
2.37	Jonctions 1 avec causalité	52
2.38	Jonction TF avec la causalité	52
2.39	Jonction TF avec la causalité	52
2.40	Jonction GY avec la causalité	52
2.41	Jonction TF avec la causalité	52
2.42	Règles de causalités de différents éléments de bond graph	54
2.43	Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f .	54
2.44	Chemin causal mixte direct.	55
2.45	Chemin causal mixte indirect.	55
2.46	Chaîne d'action	55
2.47	Boucle causal en suivant l'effort ou le flux	55
2.48	Maille	55
2.49	Boucle causale.	56
2.50	Exemple chemin causal	56
2.51	C en causalité intégrale	56
2.52	C en causalité dérivée	57
2.53	Causalité intégrale pour l'élément I	57
2.54	Causalité dérivée pour l'élément I	57
2.55	Causalité résistance pour l'élément R	57
2.56	Causalité conductance pour l'élément R	57
2.57	(b) bond graphe associé (BGI), (c) BGD	59
2.58	La non unicité de la causalité entre les éléments R1 et R2, (a) ou (b).	60
2.59	Causalité unique.	60
3.1	Schéma de principe de la supervision	63
3.2	Représentation bond graph d'un système de surveillance.	63
3.3	Schéma physique d'un moteur à courant continu (a, b, c, d : types d'excitations).	64
3.4	Bond graph à mots du MCC	65
3.5	Exemple d'illustration pour la génération des RRAs	69
3.6	Modèle BG en causalité Intégrale	69

3.7	Modèle BG en causalité dérivée	70
4.1	Interface graphique de la partie BondPad du logiciel SYMBOLS 2000	74
4.2	Fenêtre du simulateur	75
4.3	Fenêtre de compilation	75
4.4	étapes d'obtention des équations de système	79
4.5	moteur à courant continu	79
4.6	Modèle bond graph du moteur à courant continu	80
4.7	Modèle bond graph du MCC à excitation série avec les équation	88
4.8	Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation série	89
4.9	Modèle bond graph du MCC à excitation séparé avec ses équation	90
4.10	Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée	90
4.11	Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (sans conflit)	91
4.12	Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (sans conflit)	92

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Matrice des signatures des fautes	71
3.2	Matrice de signature des fautes MSf de l'exemple étudié	71
3.3	Matrice de signature du système	72
4.1	Paramètres du MCC à excitation série.	89
4.2	Paramètres du MCC à excitation séparé	90
4.3	Paramètres du MCC à excitation shunte	92

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	8
1 Les différentes méthodes de diagnostic	10
1.1 Introduction	10
1.2 Concepts et terminologie	11
1.2.1 Les Systèmes Automatisés de Production(SAP)	11
1.2.2 Un composant	12
1.2.3 Fonctionnement normal d'un système	12
1.2.4 Une anomalie	12
1.2.5 Un défaut	12
1.2.6 Dégradation	12
1.2.7 Défaillance	12
1.2.8 Panne	13
1.2.9 Symptôme, Observation, Mesure	13
1.2.10 Surveillance et diagnostic	13
1.3 Types, localisation, identification de défauts	14
1.3.1 Types défauts	14
1.4 L'évolution temporelle	16
1.4.1 L'évolution temporelle abrupte	16
1.4.2 Le comportement intermittent	16
1.4.3 Le comportement graduel	16
1.5 Localisation de défauts	17
1.5.1 Identification de défauts	17
1.6 Mode de fonctionnement	17
1.6.1 Mode de fonctionnement normal (nominal)	18
1.6.2 Mode de fonctionnement dégradé	18
1.6.3 Mode de défaillance	18
1.7 Le diagnostic et ces méthodes	18
1.7.1 Définition de diagnostic	18
1.7.2 Tache diagnostique (diagnostic de quoi)	18
1.7.3 Classification des méthodes de diagnostic	19
1.7.4 Choix et moyens de contrôle de diagnostic	29
1.7.5 Moyens pour le diagnostic[48]	30
1.7.6 Architecture de diagnostic	32
1.7.7 Performance et robustesse	33

2	Les bonds graph	34
2.1	Introduction	34
2.2	Représentation du langage bond graph	35
2.2.1	Qu'est-ce qu'un bond graph ?	35
2.2.2	Éléments de base pour l'énergétique [50]	35
2.2.3	Les éléments bond graph	35
2.2.4	Les ports	35
2.2.5	Bond graph	36
2.2.6	Liens de puissance	36
2.3	Type de bond graph	36
2.3.1	Vrai bond graph	36
2.3.2	Pseudo bond graph	36
2.3.3	Informations fournies par une représentation bond graph [52]	37
2.4	Les variables généralisées	37
2.4.1	Variables de puissance et d'énergie en vrai bond graph	37
2.4.2	Variables de puissance et d'énergie en pseudo bond graph [53]	38
2.4.3	Les éléments bond graphs [54]	39
2.5	Construction de modèles Bond Graph pour les domaines "hydraulique, mécanique, électrique"	47
2.5.1	Introduction	47
2.5.2	Algorithme 1	47
2.5.3	Algorithme 2	48
2.5.4	Algorithme 3	48
2.5.5	Règle de simplification	49
2.5.6	La causalité	49
2.5.7	Propriétés causales d'un bond graph	56
2.6	Analyse et de dimensionnement avec bond graph	58
2.6.1	Analyses structurelles	58
2.6.2	Analyse de la causalité	59
2.6.3	Analyses formelles	60
2.6.4	Analyses numériques	60
3	Diagnostic avec les bonds graph	62
3.1	Introduction	62
3.2	La modélisation par les bonds graph	64
3.2.1	Bond Graph	65
3.3	Méthodologie Bond Graph pour la surveillance	65
3.3.1	Surveillance des systèmes par bond graph	66
3.3.2	Placement de capteurs	67
3.4	PROCÉDURE GÉNÉRATION des RRAs	68
3.4.1	Algorithme de génération des RRAs	69
3.4.2	Exemple d'application d'algorithme des RRAs	69
3.4.3	Les propositions important pour les relations de redondance	70
3.5	Matrice de signature des défaillances	70
3.5.1	Procédure de détection et d'isolation des défaillances	72
4	Les concepts de logiciel SYMBOL SHAKTI, et la conception du MCC avec FDIPad, BONDPad et simulation	73
4.1	Introduction	73
4.2	Modules du symbols Shakti	73

4.2.1	Le module BondPad (constructeur de modèles graphiques)	74
4.2.2	Le module du simulateur (interface de simulation)	74
4.2.3	Le module de commande “Controls”	75
4.2.4	Le module “FDIPad”	75
4.3	Création et Incorporation des Capsules sous Symbols	76
4.3.1	Caractéristiques des capsules	76
4.3.2	Définition des (P&ID)	81
4.3.3	Étude Structurale	82
4.3.4	Diagnostic par bond graph du moteur	83
4.4	Les étapes de création des capsules de notre application sur le MCC	85
4.5	Application 2 : simulation du moteur courant continue à excitation série, séparé, shunte	87
4.5.1	Moteur à excitation série	87
4.5.2	Moteur à excitation séparé	89
4.5.3	Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation shunte	91
	CONCLUSION GÉNÉRALE	93
	RÉFÉRENCES	94

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Si le contrôle et la régulation industrielle sont largement maîtrisés par le monde industriel, la surveillance en ligne est peu développée. Une ambiguïté dans sa définition la réduit souvent à des tâches de suivi de paramètres (dit monitoring) ou de gestion d'alarmes par un seuillage des variables. L'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts en ligne, connus sous l'expression anglaise Fault Detection and Isolation (FDI), qui consistent principalement à comparer le comportement réel du système avec des comportements de référence décrivant le fonctionnement normal (pour la détection des défauts), ou décrivant différents genres de défauts (pour l'analyse et l'isolation des pannes), tout en minimisant les fausses alarmes, les non-détections ainsi que les retards dans la détection des défauts. La dégradation des performances des algorithmes de surveillance est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques des modèles et à leurs variations aléatoires.

Pour un développement des méthodes de surveillance, se basant sur les différentes informations disponibles pour décrire le comportement des systèmes, plusieurs travaux ont été réalisés. Deux types de méthodes sont utilisés, les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. L'approche qualitative consiste à répartir l'espace paramétrique en plusieurs classes correspondant à des modes de fonctionnement connus, puis de déterminer par apprentissage les relations mathématiques entre les effets (observations des experts, mesures de capteurs et données statistiques), et les causes (les défauts). Mais il n'est généralement pas possible d'identifier tous les modes de fonctionnement possibles du système, à cause de la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques et de leurs variations aléatoires. Il s'agit alors pour un ingénieur, dès qu'il s'agit de concevoir un système hétérogène, vu comme un «complexe d'éléments» d'utiliser un langage unifié pour sa représentation architecturale, sa modélisation, sa simulation et la conception d'algorithmes de supervision par des outils logiciels appropriés. Ces quatre niveaux de connaissance : technologique, physique, mathématique et algorithmique sont représentés par un seul outil : les bonds graphs, aujourd'hui largement utilisé par les grandes industries.

Le travail proposé a pour but d'une part de présenter d'une façon pédagogique l'outil bond graph pour la modélisation des systèmes énergétiques et de montrer d'autre part comment à l'aide d'outils logiciels (SYMBOLS 2000) et conviviaux, on peut générer sous forme formelle et d'une façon générique des modèles dynamiques destinés à la supervision des procédés complexes.

L'objectif du travail de recherche développé dans ce mémoire est donc : l'utilisation des bond graphs pour la conception, sous forme d'une boîte à outils, d'un générateur de modèles dynamiques formels des procédés énergétiques afin de les surveiller. Nous proposons de mettre à la disposition de l'utilisateur un outil lui permettant de surveiller le processus sans avoir qui

reste une tâche complexe surtout pour les modèles non linéaires.

Ces procédures ont été alors automatisées à l'aide d'une boîte à outils appelée ModelBuilder [5]. Cette dernière est présentée avec une interface graphique de telle sorte que l'utilisateur puisse aisément construire les modèles dynamiques et architecturaux de la plupart des processus thermofluides et générer les RRAs et la surveillabilité du processus. Dans ce contexte, le mémoire comporte quatre chapitres et organisé de la façon suivante :

- **Chapitre 1** : Ce chapitre présente des techniques de diagnostic à base de modèles et sans 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 au diagnostic à base du modèle bond graph. Au début, on présente le principe de diagnostic et méthodologie bond graph pour la surveillance. Par la suite, on expose les approches qualitative et quantitative pour la surveillance utilisant les bonds graph toujours, après on fait rappel aux étapes de diagnostic par bond graph, on passe à la procédure de génération des RRAs qui sont détaillés dans ce chapitre. et le calcul de matrice de signature de défaillance et on termine avec la procédure de détection et d'isolation de défaillances.
- **Chapitre 4** : Dans le quatrième et dernier chapitre du présent mémoire, nous présenterons le logiciel SYMBOLS SHAKTI, et l'application des outils développés de cet logiciel sous forme d'une boîte à outils dans le système sur le moteur à courant continu, nous présentons les capsules de cette application, et après on a simulé les 3 types du moteur série, shuntent et séparé qui nous à permettent de tester les fonctionnalités de la boîte à outils et de valider l'approche et les algorithmes développés. Enfin, une conclusion générale.

CHAPITRE 1

LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC

1.1 Introduction

Détecter, identifier et localiser un mode de fonctionnement anormal permettra d'introduire une commande capable de revenir à un mode de fonctionnement plus adapté à la mission pour laquelle ce système a été conçu, c'est ce qui permet par le diagnostic des défaillances des systèmes industriels. Il est donc un élément essentiel d'un système de production ou d'un système conçu pour être utilisé par un tiers. La redondance matérielle est très répandue dans les domaines où la sûreté de fonctionnement est cruciale pour la sécurité des personnes et de l'environnement, comme dans l'aéronautique et le nucléaire. Les principaux inconvénients de la redondance matérielle sont liés au coût dû à la multiplication des éléments [1].

Dans le domaine des calculateurs numériques, les progrès réalisés permettent aujourd'hui la mise en œuvre dans le milieu industriel des méthodes modernes de l'automatique et de l'intelligence artificielle. Ces nouvelles approches permettent d'éliminer en partie, voire même en totalité, la redondance matérielle pour le diagnostic des systèmes industriels. Les deux grandes familles des méthodes de diagnostic :

- les méthodes basées sur la modélisation des systèmes, appelées méthodes quantitatives.
- les méthodes basées sur l'intelligence artificielle, appelées méthodes qualitatives.

L'utilisation d'une des deux méthodes est dictée par le type de connaissance dont on dispose pour l'accomplissement de telle ou telle étape du diagnostic. L'utilisation conjointe des deux approches permet l'exploitation de l'ensemble des informations disponibles concernant le fonctionnement du système, ainsi que l'amélioration des performances de la procédure de détection et d'isolation des défauts [1].

Avant d'accéder à n'importe quel diagnostic, il est indispensable d'identifier les changements imprévus (défauts) du système avant qu'ils ne conduisent à une incapacité totale (défaillance). La redondance matérielle (capteurs ou actionneurs multiples réalisant la même fonction) est classée parmi les premières méthodes de détection de défaut utilisées, elle est associée à de simples logiques à seuils [1]. Bien que ces techniques soient encore largement répandues dans l'industrie [2, 3], elles engendrent une augmentation des coûts et de la masse de l'engin conduisant à une réduction potentiellement significative de l'autonomie. Il est donc souvent plus judicieux de faire appel à de la redondance analytique, c'est-à-dire à l'exploitation de relations entre les grandeurs mesurées ou estimées. Les méthodes développées à partir de ce concept sont communément appelées à base de modèles, où le terme modèle sous-entend dynamique et à base de connaissance, souvent sous la forme d'un ensemble d'équations différentielles en représentation d'état.

L'automatisation des systèmes industriels (ASI) vise à renforcer les performances de production ainsi que la qualité du produit à travers sa traçabilité et la réduction des coûts de sa fabrication. Dans cette disposition, les systèmes de surveillance des équipements industriels jouent un rôle important pour maintenir la disponibilité des machines et les lignes de production.

Un système de surveillance observe régulièrement l'évolution des équipements à travers des données quantifiables et/ou qualifiables collectées à partir du système surveillé. Ces informations permettent de signaler au bon moment à l'opérateur les écarts détectés par rapport au comportement nominal prévu. Ceci permettra de mettre en œuvre les actions préventives et correctives. Plusieurs chercheurs ont abordé la thématique de la surveillance industrielle (SI) mettant ainsi en évidence l'intérêt manifesté par la communauté scientifiques ainsi que les industriels par rapport à cette problématique [3]. Les approches de surveillance sont généralement divisées en deux catégories : les approches de surveillance avec modèles et les approches de surveillance sans modèles. Les premières se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent généralement les techniques de l'automatique. Dans la deuxième catégorie de méthodologies, le modèle du procédé est inexistant ou difficile à obtenir, et elles se basent ainsi sur des techniques statistiques ou issues du domaine de l'intelligence Artificielle (IA). De nombreuses méthodes ont été proposées dans cette optique et une revue de celles-ci peut être obtenue via les ouvrages de référence [4, 5] et les articles de synthèse [6, 7].

Après un rappel des divers concepts et terminologie propre au diagnostic, nous présenterons le diagnostic dans le cadre d'une procédure plus complète désignée sous le nom de supervision, puis nous l'aborderons indépendamment de toutes méthodologies.

1.2 Concepts et terminologie

Il est intéressant, dans un premier temps, de rappeler les principaux termes utilisés en Diagnostic des systèmes.

1.2.1 Les Systèmes Automatisés de Production (SAP)

Durant ces dernières décennies, Les exigences croissantes en termes de rendement, de capacité et de disponibilité des systèmes industriels ont fortement participé au développement du processus d'automatisation des systèmes industriels. Cette automatisation vise à augmenter les cadences de production tout en réduisant le temps de maintenance et conservant une certaine flexibilité pour pouvoir s'adapter à la production des nouveaux produits. Un Système Automatisé de Production (SAP) permet de remplir, de manière automatique, des fonctions, répondant à certains besoins spécifiques, précédemment assurées par l'homme. Comme il est illustré dans la figure 1.1, un SAP est composé d'une Partie Commande (PC) et d'une Partie Opérative (PO) [8].

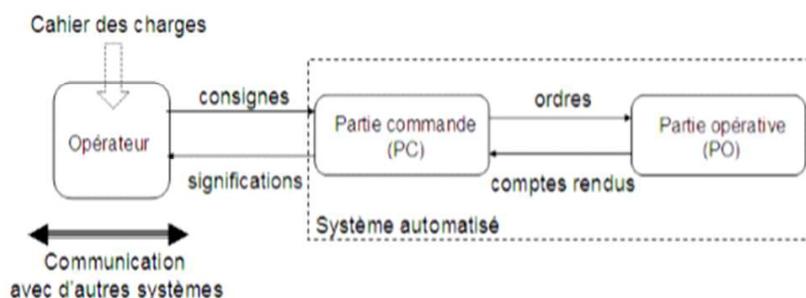


FIGURE 1.1 – inspirée de [8], les parties importantes d'un SAP

1.2.2 Un composant

C'est un élément discret d'un équipement. Il présente l'unité de description minimale de l'analyse systémique, et aussi l'élément de base qui est interconnecté avec d'autres composants de même nature ou de nature différente dans un espace mitoyen ou lointain.

1.2.3 Fonctionnement normal d'un système

Le fonctionnement d'un système est dit normal lorsque le système est capable de fournir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.

1.2.4 Une anomalie

Une anomalie permet de décrire tout ce qui n'est pas conforme à une référence.

1.2.5 Un défaut

Un défaut est une modification inattendue d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système à surveiller par rapport au fonctionnement acceptable ou habituel. D'une autre définition, c'est une déviation du système par rapport à son comportement normal, qui l'empêche de remplir sa fonction. Un défaut est donc une anomalie qui concerne une ou plusieurs propriétés du système, pouvant aboutir à une défaillance et parfois même à une panne. Il peut être annonciateur d'une défaillance, à savoir l'interruption permanente de la capacité du système à accomplir sa mission, compte tenu de ses conditions de Fonctionnement .Défauts (en anglais, isolation), qui a pour but de les classer en fonction de leur type et de leur emplacement dans le système. Enfin, l'identification (ou estimation) de défauts vise à caractériser leurs amplitudes et leurs évolutions temporelles.

1.2.6 Dégradation

Tout état qui se définit par une évolution irréversible des caractéristiques d'un système est une dégradation. La dégradation peut être liée à des facteurs directs, tels que l'usage, le temps . . . , ou à des facteurs indirects, tels que débit, l'humidité, la température. . . Elle peut aboutir à une défaillance, quand les performances du système sont en dessous d'un seuil d'arrêt définie par les spécifications fonctionnelles.

1.2.7 Défaillance

Une défaillance est une anomalie altérant ou empêchant l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée. Elle correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. Par abus de langage, cet état de panne on pourra l'appeler mode de défaillance.

En plus une défaillance implique l'existence d'un défaut, puisqu'elle aboutit à un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique de référence. Inversement, un défaut ne conduit pas nécessairement à une défaillance. En effet, le système peut très bien conserver son aptitude à assurer une fonction requise, si les défauts qui l'affectent n'ont pas d'impacts significatifs sur la mission. Si une défaillance peut conduire à une cessation de l'exécution de la mission principale du système, ce dernier est déclaré en état de panne. Ainsi, la panne est toujours le résultat d'une défaillance.

1.2.8 Panne

Une défaillance affectant le système implique une panne, aboutissant à une interruption permanente de sa capacité à remplir une fonction requise et pouvant provoquer son arrêt complet. C'est la cause de l'apparition de symptômes. Deux types de pannes peuvent être distingués :

Les pannes permanentes

Une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.

Les pannes intermittentes

Le système peut retrouver son fonctionnement nominal après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente.

1.2.9 Symptôme, Observation, Mesure

Symptôme

Une ou plusieurs observations qui révèlent d'un dysfonctionnement correspondent à un symptôme. Il s'agit d'un effet qui est la conséquence d'un comportement anormal.

Observation

C'est un renseignement obtenu à partir du comportement ou du fonctionnement réel du système.

Une mesure

L'information élémentaire obtenue à partir du comportement du système du fait qu'elle reflète une et une seule grandeur physique. Elle est représentée par une variable dont le contenu est l'image d'une grandeur physique. Son obtention s'exécute par l'intermédiaire de capteurs.

1.2.10 Surveillance et diagnostic

Les SAP (système automatisé de production) sont généralement caractérisés par la complexité de leurs structures, puisqu'ils imbriquent de nombreux éléments complexes de la PO (partie opérative). Le taux d'apparition de pannes dans un système augmente en fonction de la complexité de sa structure, ce qui rend la tâche d'analyse de ces pannes difficile. Cette difficulté justifie la nécessité de disposer d'un système de surveillance permettant d'alerter l'opérateur en cas de pannes, afin de pouvoir décider à temps des actions correctives.

Surveillance

Un système de surveillance a comme première vocation d'émettre à partir des informations générées par les capteurs, des alarmes [9] dont l'objectif est d'attirer l'attention de l'opérateur de supervision sur l'apparition d'un ou plusieurs événements susceptibles d'affecter le bon fonctionnement de l'installation, comme le dépassement d'un seuil de sécurité au niveau du remplissage d'un réservoir.

Dans le cadre de notre travail, nous considérons la surveillance comme un dispositif passif, dans le sens où ce dispositif n'influence pas le comportement du système à diagnostiquer.

Un système de surveillance permet de détecter les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et enfin identifier les causes premières. Nous pouvons distinguer deux fonctions principales dans la surveillance qui sont la détection et le diagnostic.

Détection

La fonction de détection permet de spécifier tout écart du système par rapport à son état de fonctionnement normal. Autrement dit, elle permet de déterminer la présence de défauts dans un système. Pour assurer cette fonction, il est indispensable de pouvoir distinguer entre les situations normale et anormale. Cette fonction représente très souvent un sujet de débat concernant sa place. Dans certains travaux [10], cette fonction est considérée comme un élément distinct de la fonction de diagnostic et plutôt une entité de la surveillance. D'autres travaux [11] considèrent cette fonction comme une information primordiale et indissociable du diagnostic. Ainsi, ils définissent le diagnostic comme la détection, la localisation et l'identification de défauts.

1.3 Types, localisation, identification de défauts

1.3.1 Types défauts

Un écart non permis entre la valeur réelle d'une caractéristique du système et sa valeur nominale c'est un défaut. Trois types de défauts sont distingués : défaut actionneur, défaut capteur et défaut procédé (ou défaut composant), c'est ce que montre la figure 1.2. Dans le paragraphe ci-dessous on va décrire brièvement chacun de ces défauts ainsi que leurs influences sur le processus.

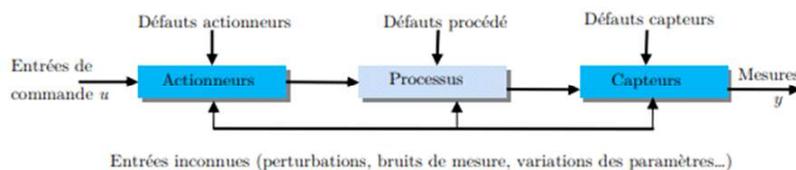


FIGURE 1.2 – Différents types de défauts d'un système physique.

Un défaut de capteur

Une modification anormale d'une mesure c'est un défaut de capteur, comme une faute systématique entachant instantanément les données relevé d'un accéléromètre d'une centrale inertielle. Ainsi, un défaut capteur indique une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer.

Un capteur c'est un dispositif qui consiste à convertir une grandeur physique en une grandeur traitable par les calculateurs. On peut dire aussi que les capteurs connectent la sortie d'un système avec l'environnement extérieur. Ils permettent de communiquer les informations concernant l'état et le comportement interne du processus. Pour les systèmes en BF (boucle fermée), les mesures de ces capteurs sont utilisées pour générer le signal de commande. Par conséquent, la présence d'un défaut capteur donne un signal de commande inexacte et inefficace. Les défauts capteurs les plus répandus sont : a) le biais, b) la dérive, c) la perte d'efficacité, d) le blocage et e) le défaut de calibrage [12]. La figure 1.3 représente l'effet du défaut sur les mesures [13]

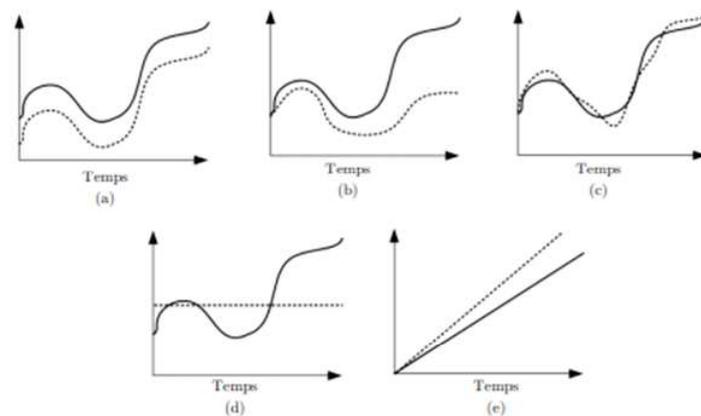


FIGURE 1.3 – L'effet de différents types de défauts capteur sur les mesures.

Les lignes en pointillées désignent les valeurs mesurées de capteur, cependant les lignes en trait continu représentent les valeurs réelles. L'existence des défauts toujours change les valeurs mesurées que ce soit avec un grand changement ou une différence peut être négligeable.

Un défaut d'actionneur

Le dispositif actionneur est un élément de la partie opérative d'un système qui transforme les signaux de commande issus du contrôleur (-processeur, ou -contrôleur) en mouvement (moteur), en chaleur (résistance électrique), ou en champ magnétique (électroaimant) Ainsi, les défauts actionneurs agissent au niveau de la dynamique de la partie opérative, et détruisent le signal d'entrée du système, par exemple le blocage d'une gouverne. Les conséquences de défauts actionneurs peuvent varier d'une consommation élevée de l'énergie jusqu'à la perte totale de contrôle. Les défauts actionneurs varient d'un actionneur à un autre [14], mais une classification non accompli des défauts les plus fréquents est donnée figure 1.4.

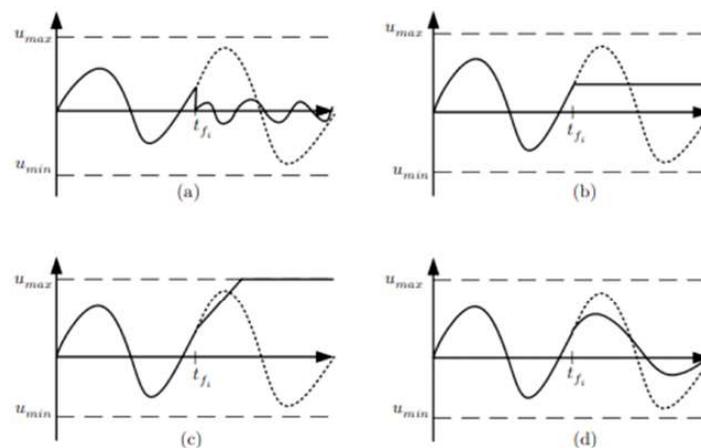


FIGURE 1.4 – Représentation graphique des défauts actionneur les plus répandues [14].

La figure 1.4 montre une classification non accompli des défauts les plus fréquents. Les lignes en pointillées désignent les valeurs désirées de l'actionneur, cependant les lignes en trait continu représentent les valeurs actuelles. (a) oscillation (donc les valeurs disponibles oscillent autour de la valeur désirée), (b) blocage, (c) saturation et (d) perte d'efficacité.

Les défauts de composants

Ce sont les défauts processus qui affectent les composants du système lui-même, ils ne peuvent pas être classifiés ni parmi les défauts capteurs ni parmi les défauts actionneurs. Les défauts de composants approuvent une modification de la dynamique du système suite à un changement de ces paramètres. La représentation mathématique de ce type des défauts se traduit par un changement dans l'équation d'états. Donc, il est souvent difficile à déterminer et demande des essais expérimentaux extensifs. Ce changement peut être soit paramétrique soit structurel/fonctionnel. Ces défauts induisent une instabilité de système.

1.4 L'évolution temporelle

L'évolution temporelle d'un défaut est en général imprévisible, et peut ainsi être intermittente, progressive (graduelle) ou encore abrupte les deux premiers comportements étant les plus délicats à détecter.

1.4.1 L'évolution temporelle abrupte

Dans ce cas abrupt, le comportement temporel est discontinu [13] Une représentation mathématique de ce défaut est donné par : $f(t - tf) = \begin{cases} \delta, & t \geq tf \\ 0, & t \leq tf \end{cases}$ Où $f(t - tf)$ représente le comportement temporel du défaut et δ un seuil constant.

Ce type de défauts est caractérisé par une discontinuité dans l'évolution temporelle de la variable. Cette évolution, si elle ne correspond pas aux évolutions dynamiques normales attendues pour la variable (changement de consigne), est caractéristique d'une panne brutale de l'élément en question : arrêt total ou partiel de connexion.

1.4.2 Le comportement intermittent

Intermittent c'est un cas particulier d'évolution abrupt, avec une particularité que le signal revient de façon aléatoire à sa valeur normale. Lorsque le type de défauts est intermittent, alors il caractérise les faux contacts.

1.4.3 Le comportement graduel

Au cours du temps l'évolution de défaut graduel peut exprimée par cette relation [13]

$$f(t - tf) = \begin{cases} \delta(1 - e^{-\alpha(t-tf)}), & t \geq tf \\ 0, & t < tf \end{cases}$$

Où α et δ sont des constantes positives. Il est délicat à détecter ce type car son évolution temporelle a la même signature que celle d'une modification paramétrique lente représentant un non constance du procédé. Ce type de défauts est caractérisé par un encrassement d'une usure de pièce.

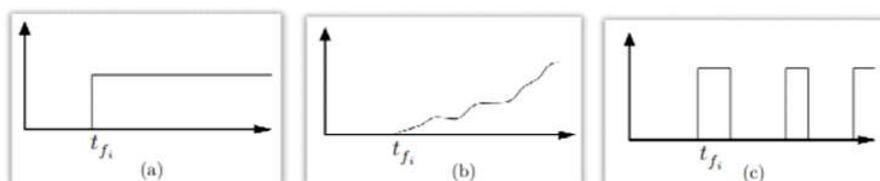


FIGURE 1.5 – Évolution temporelle d'un défaut : a) abrupt, b) graduel et c) intermittent.

1.5 Localisation de défauts

La détection de défauts justifier la présence de défauts dans le système et leurs instants d'apparition. Cette tâche est suivie de la localisation de défauts, qui a pour but de les classer en fonction de leur type et de leur emplacement dans le système. il est très important aussi de localiser le sous-système affecté par le défaut détecté, responsable de la défaillance du système comme ça on peut saisir bien comme il faut ou il situe le défaut. La localisation consiste, en effet, à remonter les symptômes pour retrouver l'ensemble des éléments défectueux. la minimisation de l'espace défectueux facilite l'extraction de défaut ou des défauts. Enfin, l'estimation de défauts vise à caractériser leurs amplitudes et leurs évolutions temporelles. Le processus complet est classiquement désigné sous les acronymes FDI (Fault Detection and Isolation) pour détection et isolation de défauts ou FDD (Fault Detection and Diagnosis) pour détection et diagnostic de défauts, ce dernier incluant l'identification. Ces procédures nécessitent la plupart du temps de générer des résidus, c'est-à-dire des indicateurs de la présence de défauts calculés à partir de l'écart entre les mesures relevées sur le système et le comportement prédit par un modèle [14]. Ces signaux sont censés être de faible amplitude lorsque le système fonctionne normalement, et s'écarter suffisamment de leur valeur initiale pour être détectable en présence de défauts.

En effet, il est possible de déterminer une défaillance, ou une panne, résultant d'un défaut. Par contre, le problème inverse est plus difficile à résoudre, puisque une panne peut résulter d'un ou plusieurs défauts [14].

1.5.1 Identification de défauts

L'identification de défauts consiste à inspirer les causes qui ont mené à un cas anormal. Cette fonction suit la fonction localisation.

Exemple 1

Pour mieux comprendre les concepts terminologie des différentes notions de surveillance, détection, diagnostic, localisation et identification, nous abordons l'exemple d'une panne d'huile dans une voiture. Nous pouvons constater que la dégradation des performances de cette voiture apparaît suite à une surconsommation d'huile, tout en restant au dessous d'un seuil de consommation. A un certain moment, cette dégradation peut être accompagnée, quelquefois, par l'observation des symptômes de défaillances, comme le dégagement d'une fumée blanche. La détection correspond au dépassement d'un certain seuil de consommation, qui provoque le déclenchement d'une alarme indiquant l'occurrence d'une défaillance.

Le système de diagnostic permet de localiser le sous-système à l'origine de cette surconsommation (les segments du moteur, qui ont pour fonction d'assurer l'étanchéité du piston dans le cylindre) et d'identifier la cause de surconsommation (par exemple, l'usure des segments).

1.6 Mode de fonctionnement

Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement spécifiant le système automatisé qui est un ensemble d'éléments qui effectue des actions cycliques sans intervention de l'utilisateur .celui-ci contente de donner des ordre de départ et d'arrêt. On peut observer des modes de plusieurs types parmi lesquels [14] :

1.6.1 Mode de fonctionnement normal (nominal)

Tous ce qui est comme fonctionnement normal il implique que le système ne perdre pas des informations. Dans ce mode, le fonctionnement du SAP est conforme aux exigences requises. Les performances du système coïncident avec le cahier des charges établi par l'exploitant.

1.6.2 Mode de fonctionnement dégradé

Le SAP remplit partiellement les exigences requises. Malgré l'absence de défaillances, les performances du système sont inférieures à celles attendues par l'exploitant. Cette dégradation progressive des performances du SAP est généralement due au vieillissement d'un ou plusieurs composants du système.

1.6.3 Mode de défaillance

Le système passe à ce mode suite à l'occurrence d'une ou plusieurs défaillances. Les conséquences de ces défaillances sur le système caractérisent le mode de défaillance. En effet, un système peut avoir plusieurs modes de défaillances, par contre, il admet un seul mode de bon fonctionnement.

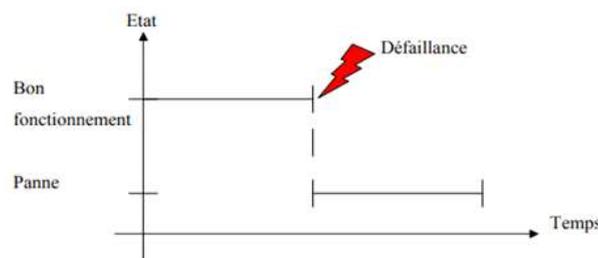


FIGURE 1.6 – Transition d'un état de bon fonctionnement à un état de panne.

1.7 Le diagnostic et ces méthodes

1.7.1 Définition de diagnostic

Le diagnostic consiste à localiser les éléments défaillants, qui ont causé la dégradation du système, et déterminer les causes de cette modification imprévue de système [10]. En effet, le diagnostic établit un lien de cause à effet entre un symptôme observé et la défaillance constatée. Cette fonction suit la fonction de détection et inclut les fonctions de localisation et d'identification. Si l'état de fonctionnement est comparé avec un état de référence, il s'agit d'évaluation de dérive de fonctionnement.

Il intègre différentes étapes :

- Détection de cet état de fonctionnement
- Évaluation des causes de l'occurrence de cet état. Elle consiste à identifier, analyser et localiser ces causes.
- Décision d'action pour modifier cet état

1.7.2 Tache diagnostique (diagnostic de quoi)

Il faut toujours saisir comment marche un système, pour connaître le diagnostic de bon fonctionnement de ce procédé complexe. L'objectif du diagnostic peut varier :

- Diagnostic de panne ou de défaillance.

- Diagnostic de bon ou mauvais fonctionnement.
- Diagnostic d'erreur humaine ou de fiabilité humaine.
- Diagnostic de performance ou de non-performance.
- Il existe d'autres.

1.7.3 Classification des méthodes de diagnostic

Il existe une diversité des méthodes de diagnostic des défauts utilisées dans le milieu industriel. Leur principe général repose sur une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance [16]. Dans cette section, nous présentons une classification des principales méthodes de diagnostic rencontrées dans la littérature. Cette classification, représentée dans la figure ci-dessous, peut être réalisée selon plusieurs critères tels que la nature de l'information disponible (quantitative ou qualitative), la dynamique du système (continu, discret ou hybride), la structure de prise de décision (centralisée, décentralisée ou distribuée). Dans la suite, nous proposons une classification non accomplie des méthodes de diagnostic selon deux axes : les approches sans modèles et les approches à base de modèles [17]. pour avoir plus de détails [15, 16][18, 19][20].

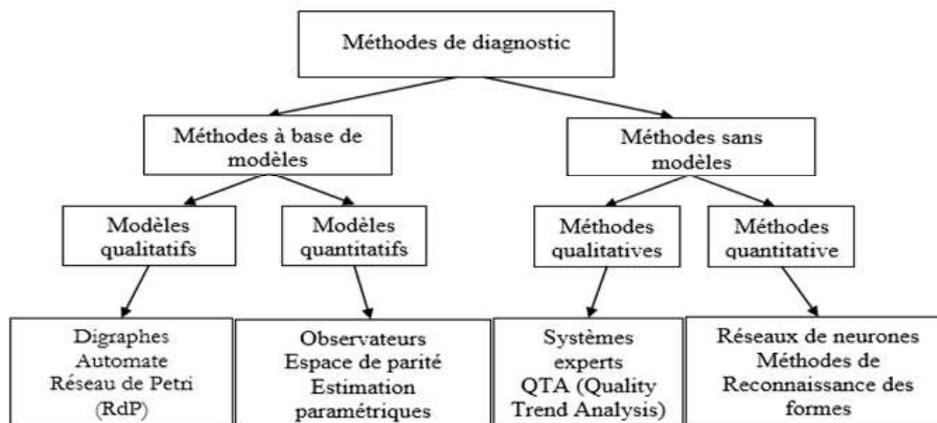


FIGURE 1.7 – Une classification des méthodes de diagnostic.

Diagnostic Avec modèles

L'idée repose sur une comparaison du comportement du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi [10]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance [21], cette méthode consiste à vérifier la consistance entre le comportement attendu d'une installation, d'un procédé à l'aide du modèle de son comportement, et le comportement réellement observé. La présence de différences entre le comportement attendu et le comportement réel est le point de départ de la recherche de diagnostics. Cette idée fondamentale du diagnostic à base de modèle est représentée par la figure 1.8.

Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Failure Detection and Identification) et les méthodes qualitatives issues des communautés IA et SED.

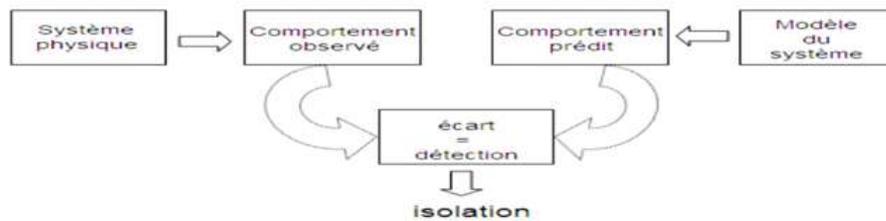


FIGURE 1.8 – Principe des méthodes de diagnostic avec modèles.

Comme montre le schéma l'opération est basée sur le principe fondamental suivant : elle consiste à mesurer à chaque instant la valeur quantitative d'une grandeur physique en sortie du système (qui dépend de toutes les perturbations incontrôlées qui interagissent avec lui), et à la comparer à la valeur instantanée souhaitée de cette grandeur physique (consignée en entrée du système).

La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic [21].

→ Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs

Cette méthode peut se baser sur trois estimations soit :

- Estimation des paramètres : Cette estimation consiste à identifier en ligne les divers paramètres du système et à comparer ses estimations aux valeurs nominales des paramètres. Ici l'erreur d'estimation est utilisée comme résidu.
- Estimation de parité : son principe est de réécrire, transformer les équations du modèle de manière à obtenir des relations particulières appelées RRA (Relations de Redondance Analytique), dans l'enchaînement qui suit on va discuter les RRA plus explicitement. Ces relations ont pour propriété de ne lier que des grandeurs connues, disponibles en ligne. Les résidus sont obtenus en substituant dans ces RRA les variables connues par leurs valeurs réelles, prélevées sur le système en fonctionnement. L'obtention hors-ligne des RRA est un problème général d'élimination de variables dans un système d'équations algébrique-différentielles. Lorsque le modèle est linéaire, l'élimination peut se faire par projection dans un sous-espace appelé espace de parité.
- Ou par estimation de l'état.

Utilisant des modèles mathématiques du système décrivant le comportement du système.

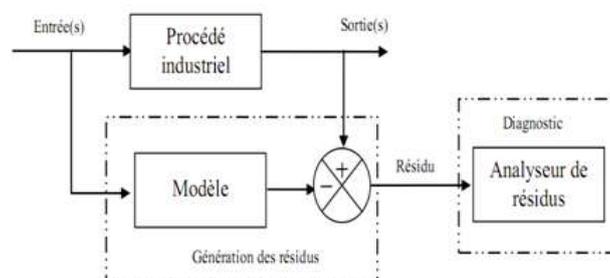


FIGURE 1.9 – Principe de diagnostic basé sur la génération des résidus.

Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil ε . Une défaillance est alors détectée. A ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connus, afin d'isoler et d'identifier la défaillance.

L'objectif des méthodes de détection qui sont regroupées sous le terme de test de cohérence,

est de vérifier l'adéquation entre les grandeurs observés, et les résidus issus du modèle, décrivant le comportement attendu du système. Parmi les tests les plus simples sont les tests qui consistent à comparer les résidus à des seuils fixes. Le choix de ces seuils est délicat, car il demande généralement de faire un compromis.

Le compromis c'est si le seuil est trop bas, on risque d'augmenter le nombre de fausses alarmes, mais s'il est trop élevé, ce sont les non détections qui vont se multiplier. Il existe également d'autres tests plus robustes, comme le test de la somme cumulée, ou le test du maximum de vraisemblance généralisé.

Lorsqu'une défaillance est détectée, une procédure de localisation et d'identification est utilisée pour permettre de déterminer son origine et ces caractéristiques précises. Ces deux étapes nécessitent d'utiliser les modèles de dysfonctionnement.

Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous trouvons principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique.

► La méthode d'espace de parité

La méthode de l'espace de parité a été une des premières méthodes employées à des fins de FDI [11]. Elle repose sur la vérification de l'identité des modèles du procédé avec les mesures issues de capteurs et des entrées connues (consignes, signal de commande, etc. . .).

► La méthode à base d'observateurs

Cette méthode se base sur la reconstruction de la sortie du processus à l'aide d'observateurs, de la comparer avec la sortie mesurée, puis à utiliser l'écart entre ces deux fonctions est utilisé comme résidu.

► La méthode d'estimation paramétrique

Suppose que les valeurs de paramètres de système en fonctionnement nominal soient connues et aussi l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement de ce derniers. Elle consiste alors à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système [18]. Il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques pour détecter l'apparition de défaillances dans le système.

→ Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs

Les modèles qualitatifs ne représentent pas la physique du système, mais ils le décrivent en terme de mode de fonctionnement. En effet les modèles qualitatifs permettent d'abstraire le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique [40]. Ces modèles décrivent d'une manière qualitative l'espace d'état continu du système. Contrairement aux modèles de type numérique. Les méthodes à base de modèles qualitatifs peuvent être classifiées selon le niveau d'abstraction considéré du système à diagnostiquer, à savoir, les systèmes continus, les systèmes à événements discrets ou les systèmes hybrides dynamiques. Pour les systèmes continus, les approches ont été développées à base de graphes causaux [41] et de graphes causaux temporels [42]. Le diagnostic des SED est basé sur l'utilisation de modèles discrets tels que les réseaux de Pétrie et les automates d'états finis, . . . Dans ce contexte [43].

Une approche de diagnostic devenue une référence dans la littérature [43]. Cette approche consiste à modéliser le système par des automates à états finis, puis à construire son diagnostiquer. Pour les systèmes hybrides, on trouve des méthodes reposant sur des modèles hybrides

tels que l'automate hybride à temps discret [44], les bonds graphs [45], les RDP hybrides [46]. Parmi les procédures qui nécessitent la plupart du temps de générer des résidus, c'est-à-dire des indicateurs de la présence de défauts calculés à partir de l'écart entre les mesures relevées sur le système et le comportement prédit par un modèle sont les acronymes :

- FDI pour Fault Détection and Isolation (détection et isolation de défauts).
- FDD pour Fault Detection and Dignosis (détection et diagnostic de défauts).
- Le FDD incluant l'identification.

Lorsque le système fonctionne normalement, et s'écarte suffisamment de leur valeur initiale pour être détectable en présence de défauts ; ces signaux sont censés être de faible amplitude. Une fois qu'un défaut a été détecté, il apparaît naturel de chercher à le compenser par une modification adéquate de la loi de commande de système considéré. C'est ce que cherche à réaliser la commande tolérante aux défauts (FTC for Fault Tolerant Control), également nommée reconfigurations.

→ Critères des méthodes de diagnostic à base de modèles

Ces méthodes doivent tenir compte de certains critères qui varient en fonction des besoins en termes de sûreté, des ressources humaines et matérielles disponibles, de l'aspect critique du système surveillé. En effet, une méthode de diagnostic doit :

- Fournir un diagnostic fiable (pas de fausses alarmes ni d'alarmes manquantes).
- Être algorithmiquement accessible.
- Être réalisable en temps réel.
- Avoir un temps de réponse raisonnable (faible complexité),
- Permettre un diagnostic rapide des défauts.
- Être facile à mettre en œuvre.
- Nécessiter un nombre réduit de capteurs.

→ Approches de diagnostic centralisés, décentralisés et distribués

Parfois le choix de la structure de prise de décision des méthodes est imposé par la distribution des composants d'un système, des informations qu'il génère (commandes et compte rendus des capteurs). Ce choix peut être entre une structure centralisée, décentralisée ou distribuée.

► La structure centralisée

Elle consiste à associer un modèle global du procédé avec un seul module de diagnostic. En conséquence, le module de diagnostic collecte les différentes informations du système avant de prendre sa décision finale sur son état de fonctionnement [43] Cette structure se montre performante en termes de diagnostic. Cependant, elle est exposée au problème de l'explosion combinatoire des modèles utilisés surtout lorsqu'il s'agit de systèmes complexes. En effet, plusieurs approches de diagnostic, reposant sur des structures décentralisées et distribuées, ont été proposées dans la littérature.

► La structure décentralisée

Elle se base sur un modèle global du système à qui sont associés plusieurs modules de diagnostic locaux. Chacun prend une décision locale en se basant sur ses observations locales et reçoit les informations observables qui lui sont spécifiques.

Un coordinateur doit être utilisé, afin de lever le problème d'indécision et permettre aux modules de diagnostic locaux de diagnostiquer l'ensemble de défauts. Le coordinateur traite

les différentes décisions locales, communiquées par les modules locaux, afin de prendre une décision finale.

► La structure distribuée

Chacun des modèles locaux des systèmes étant associé à un module de diagnostic local responsable de son composant. Ces composants modélisent le système par plusieurs modèles locaux. La communication directe entre les différents modules se fait à partir d'un protocole de communication afin de gérer les conflits décisionnels. Chaque module de diagnostic prend sa décision en se basant sur sa propre observation locale et celle communiquée par les autres modules [22].

→ hors-ligne/en ligne

► Diagnostic hors-ligne

L'ensemble de comportements et d'observations du système connu à l'avance construisent le diagnostic hors-ligne, pour élaborer son diagnostic. Cette apparition n'impose pas des critères de réactivité de la réponse de diagnostic. En effet, dans ce cas aucune limitation de temps de réponse n'est exigée.

► Diagnostic en ligne

En s'appuyant sur les observations générées, le diagnostic en ligne consiste à calculer le diagnostic du système pendant qu'il fonctionne.

Par contre les diagnostics hors ligne, les approches de diagnostic en ligne présentent des exigences en termes de réactivité de la réponse. De la part du module de diagnostic cela nous implique un temps de réponse rapide de la part du module de diagnostic. Le diagnostic en ligne conduit généralement à une difficulté qui concerne la complexité du calcul. En effet, la réponse de diagnostic doit être livrée en temps-réel, le plus rapidement possible.

Le diagnostic en ligne n'est plus possible lorsque le module de diagnostic ne parvient pas à gérer le flux d'observations et inférer le diagnostic suffisamment rapidement.

Vu que le nombre d'observations augmente régulièrement, il est nécessaire de disposer d'un diagnostic incrémental, où seul le diagnostic de la date t_i . En effet, la complexité de traitement ne doit pas dépendre du nombre d'observations reçus avant la date $t_{(i-1)}$ puisque ce nombre augmente d'une manière non bornée.

→ L'analyse diagnostic avec modèle

► Le raisonnement causal

L'idée de raisonnement causal consiste à déterminer les composants défaillants définir le comportement anormal observé. Au moment de l'analyse des régimes perturbés, l'aspect significatif de la connaissance des mécanismes en termes de causalité est nécessaire.

Ainsi, $x \rightarrow y$ signifie que l'état de y au temps t dépend de l'état de x au temps $t' \leq t$; x est la cause et y l'effet [23]. Lorsque les liens causaux ne sont pas modifiés par les défauts, le principe déclaré avant est valide.

À chaque instant la liste des défauts est donnée par une comparaison entre grandeurs simulées et mesurées, lorsque la différence (l'écart) significatif est signalée entre les deux grandeurs, la variable associée est un défaut. C'est l'étape de détection. La procédure de détection fournit donc une liste de variables en défaut.

Pour localiser le défaut source (l'origine de défaut) il faut obtenir une liste ordonnée de

variables, depuis le défaut source, en passant par toutes les variables intermédiaires affectées jusqu'aux ultimes conséquences. A cause de ça, on cherche à estimer l'écart entre valeurs prédites et valeurs mesurées [24].

► Le raisonnement FDI

En premier temps, l'approche FDI (Fault Detection and Isolation) se déroule en deux étapes : la partie détection puis la partie localisation. Le modèle comportemental défini par un ensemble de contraintes statiques ou dynamiques décrit les composants d'un système [25] [26]. Devant la réalisation de l'analyse diagnostique, des tests de détection doivent être réalisés permettant de générer des symptômes. Ces tests reposant sur différents modèles.

En effet, un test de détection sur un modèle de comportement n'intervient que des variables et paramètres connus mesurés ; ce test est nommé aussi relation de redondance analytique (RRA). On la note généralement, :

$$\omega(OBS) = 0 \quad (1.1)$$

Où OBS est un ensemble d'observations. Autrement dit, en fonctionnement normal, les mesures satisfont les RRAs, mais en présence de défauts, ces derniers ne sont plus forcément satisfaits et on peut avoir :

$$\omega(OBS) = r \neq 0 \quad (1.2)$$

Où r est appelé résidu. Les RRAs sont obtenues par combinaison des contraintes [27][28][29]. Les résidus sont conçus pour faciliter leur exploitation ultérieure par un outil de décision destiné à détecter et localiser les défauts.

Deux approches sont possibles :

- La génération de résidus directionnels [30] : les résidus sont conçus de façon à répondre à un défaut particulier. Cette approche est en fait une spécialisation des résidus structurés.
- La génération de résidus structurés [31] : les résidus sont conçus de façon à répondre à des sous-ensembles de défauts différentes

Méthodes sans modèles

Comme il existe des applications industrielles facile a construire leur modèle, il existe d'autre applications industrielles, il est difficile, voire impossible, d'obtenir sont modèle du système .Cette difficulté est justifiée par la complexité augmenter ou à de nombreuses recon-
 gurations intervenants durant le processus de production. Les représentations a priori sur ce système se résument aux mesures acquises en temps réel complétées par un éventuel historique du fonctionnement du processus.

Néanmoins, parmi les méthodes de diagnostic sans modèles, on peut citer :

- Les outils de traitement du signal reposant sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier), utilisée à l'origine pour détecter les défauts dans les machines électriques [32]. Avec le développement des applications à vitesse variable, les recherches actuelles portent plus particulièrement sur les méthodes adaptées à la caractérisation de signaux non-stationnaires : temps-fréquence, temps-échelle (décomposition en ondelettes [33]).
- La redondance matérielle, consistant à multiplier les capteurs critiques d'une installation.
- Les réseaux de neurones artificiels (RNA) [34], jouant le rôle de "boîte noire" quand la connaissance du procédé à surveiller est insuffisante. les capteurs spécifiques permettant de donner directement l'état d'un composant, comme par exemple les capteurs de fin de course.

Les stratégies possibles pour tirer partie de ces données de fonctionnement sont :

→ Méthodes basées sur des données historiques (fouille de données)

Les méthodes basées sur des données historiques effectuent le diagnostic à partir du traitement d'une grande quantité d'échantillons. Elles nécessitent aucun modèle de processus, l'information est extraite des données d'entraînement, en effet, elles peuvent travailler de manière indifférente avec des processus non linéaires [35].

Les méthodes d'apprentissage et de reconnaissance de formes permettent à partir des données du processus, d'obtenir de l'information des états du système [36][37][38][39][40].

Elles sont intéressantes pour le développement de lois de supervision et de commande de systèmes. Ainsi, la connaissance est automatiquement extraite des données, où les classes obtenues correspondent à des situations de fonctionnement normal ou de défaillance [41]. Il est important de remarquer que la caractérisation des systèmes complexes pour le diagnostic, doit inclure la connaissance de l'expert tout spécialement pour les méthodes de type flou. L'inconvénient qui existe est la dépendance aux données d'entraînement qui permettent de définir chaque état ou défaillance.

Pour toutes les techniques basées sur la fouille de données, il faut différencier deux grandes phases : l'entraînement ou apprentissage afin d'établir les caractéristiques des classes et la reconnaissance de nouvelles données. Un prétraitement des données est de :

- Établir les variables les plus pertinentes qui permettent de détecter les états du système.
- Éliminer des bruits et obtenir la meilleure information possible de chaque variable. Dans le cas du diagnostic, un prétraitement des données est recommandé parce que les données brutes ne permettent pas toujours d'obtenir l'information nécessaire pour caractériser les classes[41], exemple des systèmes industriels,
- A cause du bruit de mesure qui est toujours présent sur les capteurs,
- l'affectation d'une analyse en fréquence des signaux pour utiliser dans le diagnostic uniquement les fréquences les plus informatives.
- Analyser les fréquences parasites d'un signal, apportées par les vibrations de structures mécaniques ou dans les machines tournantes par exemple, pour en déduire des défauts.

→ Diagnostic en utilisant des méthodes de classification

Cette méthode est basée sur la fouille des données, elle consiste à déterminer à chaque instant, la classe actuelle qui a auparavant été associée avec un état fonctionnel du système. Le rôle d'un système de diagnostic est d'identifier le défaut le plus probable qui a engendré l'apparition d'un symptôme. Ce dernier se traduit par la différence entre des dispositifs en fonctionnement et les mêmes dispositifs fonctionnant sans défaillance. La relation entre les dispositifs et les symptômes passe par une procédure d'apprentissage expérimentale. Elle est sauvegardée de façon à avoir une base de données. Le principe des méthodes de classification est illustré sur la figure 1.10 :

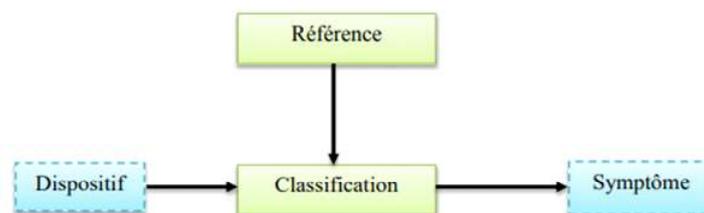


FIGURE 1.10 – Principe des méthodes de classification.

La visualisation des valeurs précises de centaines de variables sur un synoptique est projeté par la méthode classification dans un espace de dimension réduite. Dans cette espace, l'opérateur peut apprendre à identifier des zones à risque ou relatives à des dysfonctionnements

particuliers, il aura en conséquence des réactions beaucoup plus rapides aux problèmes. Les méthodes de classification, permettent d'établir un modèle des états du système, en incluant les états de défaillance. On peut recouvrir la connaissance de différents attributs relatifs à un comportement particulier, sans que ce comportement soit représenté par un ensemble de relations analytiques. Les modifications de ces caractéristiques permettent de détecter un fonctionnement anormal [42].

L'utilisation de techniques d'intelligence Artificielle et de la Logique Floue pour le diagnostic de systèmes permet d'obtenir des résultats interprétables et offre une information utile pour la décision d'actions à effectuer en cas de défaillance.

Pour pouvoir réaliser un diagnostic en utilisant une méthode de classification, il y a deux phases principales : l'entraînement ou apprentissage et la reconnaissance.

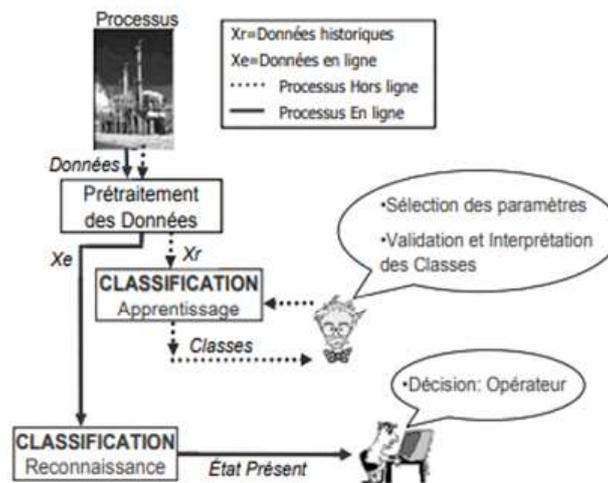


FIGURE 1.11 – Schéma du diagnostic utilisant des techniques de classification

► Phase d'entraînement

- Cette phase est réalisée hors ligne,
- Le but de cette phase est de trouver, à partir de l'ensemble de données, les caractéristiques du comportement du système
- Les caractéristiques obtenues vont permettre de différencier les états dans lesquels le système peut se trouver (Figure 1.12).
- les objets sont regroupés et séparés pour arriver à la construction de classes.
- Le résultat de l'entraînement est un classifieur ; on peut l'associer au modèle comportemental du système.
- Selon la méthode utilisée, le classifieur peut correspondre à des paramètres d'une équation ou aux valeurs et à la structure d'un système (par exemple un réseau de neurones).
- Le classifieur permet d'associer aux différentes classes, de nouvelles observations qui correspondent aux valeurs présentes des variables et permet d'associer les causes des défaillances quand la classe correspond à un état de défaillance.

► Phase de reconnaissance

- Cette phase peut être effectuée en ligne,
- Algorithme effectué lors de cette phase est :
 1. La reconnaissance de nouvelles données est effectuée.
 2. l'état présent du système est identifié.

3. Les données sont classées en fonction du classifieur obtenu lors de la phase précédente.
- Dans la phase de reconnaissance quand un état est reconnu, si on parle d'un état de défaillance, les valeurs qui représentent la classe sont associées pour effectuer la localisation de la cause de la défaillance.
 - L'objectif de cette méthode avec les phases associé est l'obtention d'un modèle comportemental du procédé en caractérisant les états (normaux ou non) par des paramètres extraits des variables du procédé. Méthodes d'apprentissage et de reconnaissance de formes utiles pour le diagnostic.

► Réseaux de Neurones

Un réseau de neurone est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains placée dans la famille des méthodes de (IA).

Les neurologues Warren Sturgis McCulloch et Walter Pitts constituèrent un modèle simplifié de neurone biologique communément appelé neurone formel. Après des études théoriques ils montrèrent que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques complexes. Le principe de cette méthode consiste à utiliser des réseaux de neurones, dont les entrées (effets) et les sorties (causes) sont des sous ensembles flous. Pour être exploitables, les résultats sont convertis en valeurs numériques après une opération dite de «défuzzification».

Cette technologie définit des perspectives d'applications pour l'aide au diagnostic avec signatures externes. En effet, le calcul neuromimétique possède des propriétés similaires à celles de la reconnaissance des formes pour la classification automatique de signatures.

Le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer suffisamment d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir bien identifier les défauts dans un système. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie. Le réseau s'auto-organise, apprenant à relier les exemples montrés aux diagnostics. Après l'apprentissage, le réseau ne reconnaît pas seulement les exemples appris mais également des paradigmes leur ressemblant, ce qui correspond à une certaine robustesse par rapport aux déformations de signaux par le bruit.

Pour un traitement par réseau de neurones, les exemples doivent être mis en forme pour être entrés dans le réseau. Ce sont des grandeurs caractéristiques des défauts à diagnostiquer, filtrées et prétraitées (transformée de Fourier). Conceptuellement, un réseau de neurones peut être considéré comme une boîte noire, il n'est pas nécessaire de construire un modèle du système, contrairement aux méthodes dites internes [43].

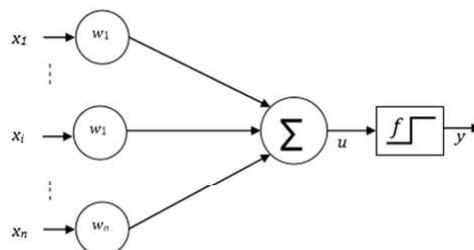


FIGURE 1.12 – Schéma général d'un neurone

La figure 1.12 montre le schéma général d'un neurone formel. Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i=1, \dots, n$). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie y du neurone est donnée par : $y = f(u)$

avec $\sum_{i=1}^n w^i x^i$ où : u est l'état d'activation du neurone (également appelé état interne du neurone). f est la fonction d'activation du neurone.

► La régression

Ce qui permet de générer des résidus en les comparants à leurs mesures, c'est une stratégie qui vise à construire un modèle empirique en exploitant la redondance liée à la base de données pour prédire les valeurs des différentes variables. En effet, pour ce type d'applications industrielles, seules les méthodes de surveillance sans modèles sont opérationnelles. Les bases de ces méthodes de diagnostic sont des informations issues d'une expérience préalable, sur des règles heuristiques ou encore sur des exemples de résolution. Parmi ces méthodes, on trouve :

1. La méthode du seuillage : la présence d'une anomalie est montrée par le franchissement d'un seuil. En premier temps, les signaux fournis par les capteurs sont comparés avec des valeurs limites constantes ou adaptatives (évoluant en fonction du point de fonctionnement)[44]. Un premier niveau indique la présence probable d'un défaut alors qu'un second niveau peut en caractériser la gravité.
2. La reconnaissance des formes : les méthodes de reconnaissance des formes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et des mesures (continues ou discrètes). Le fonctionnement d'un système de diagnostic par reconnaissance des formes se déroule en trois phases [45] :
 - Une phase d'analyse : cette phase consiste à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles, et à optimiser et déterminer l'espace de représentation des données.
 - Une phase de choix d'une méthode de décision : elle permet de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage.
 - Une phase d'exploitation : une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.
3. Les systèmes experts : Les systèmes experts construits à base de règles qui établissent des associations empiriques entre effet et causes [46]. Ce sont des systèmes qui utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux défauts [47]. Ces associations sont généralement fondées sur l'expérience de l'expert plutôt que sur une connaissance de la structure et/ou du comportement du système. Leur fonctionnalité est de trouver la cause de ce qui a été observé en parcourant les règles par un raisonnement inductif par chaînage avant ou arrière.

Diagnostic mono-modèle

En fonction des observations, le diagnostic mono-modèle s'appuie sur un seul modèle de bon ou de mauvais fonctionnement, il permet de construire un modèle du procédé en adaptant les paramètres du modèle, ou de contrôler l'état du procédé en adaptant les paramètres de celui-ci.

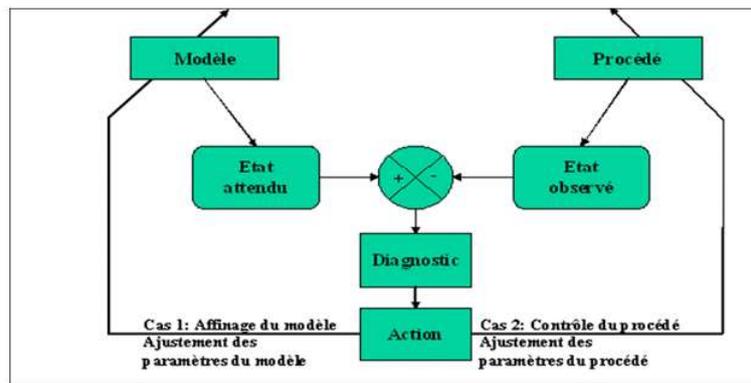


FIGURE 1.13 – structure de diagnostic mono modèle.

Diagnostic multi-modèle

Ce type de diagnostic s'appuie sur une série de modèles de bon ou de Mauvais fonctionnement. Cela dépend du Contexte opérationnel pour sélectionner le modèle utilisé pour le diagnostic. Cette approche conduit le système à construire une base minimum de modèles et d'ajuster les paramètres de chacun d'eux en fonction des observations, et aussi d'activer un des modèles en fonction d'un critère prédéfini pour contrôler l'état du procédé en ajustant les paramètres de celui-ci.

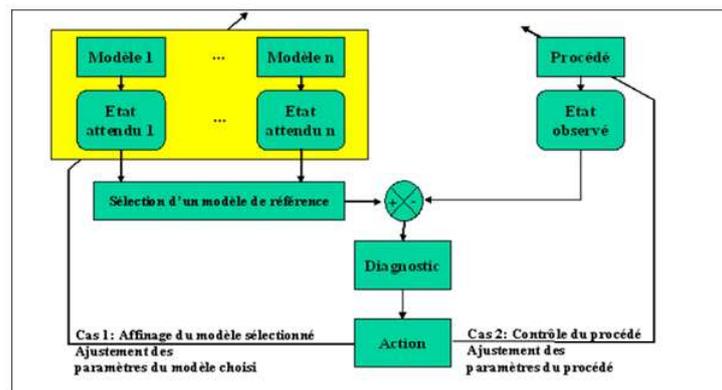


FIGURE 1.14 – structure de diagnostic multi-modèle

1.7.4 Choix et moyens de contrôle de diagnostic

Les connaissances que l'on souhaite acquérir sur le système déterminent le choix de l'une des méthodes de diagnostic, mais aussi la complexité de système joue rôle de choix. En effet deux grandes familles peuvent être prises en considération : les méthodes à base de modèles et les méthodes sans modèles appelées aussi les méthodes à base de signal. La première famille repose sur une connaissance en profondeur du système incluant les relations causales entre les différents éléments tandis que la deuxième sur la connaissance glanée à partir d'expériences passées (on parlera aussi de connaissance superficielle, apparente basée sur l'histoire du processus). Nous décrivons ci-dessous quelques principales méthodes de ces deux familles.

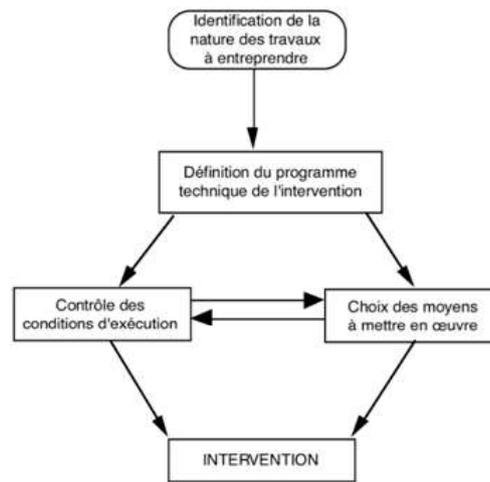


FIGURE 1.15 – schéma de diagnostic préalable

Les moyens pour le contrôle des dérives de fonctionnement sont par exemple les barrières et les systèmes redondants. Ils permettent de maîtriser le risque associé à un état de fonctionnement donné sur deux plans :

- En réduisant l'occurrence de cet état.
- En réduisant les conséquences de cet état, les conséquences pouvant être exprimées non seulement en termes de sécurité, mais également en termes de charge de travail, de qualité, de production, de performance, etc.

1.7.5 Moyens pour le diagnostic[48]

Les spécifications de moyens de diagnostic peuvent être issues d'analyses préalables telles que des analyses de risque, de performance, de comportement avec des méthodes comme TESEO (Tecnica Empirica Stima Errori Operatori), THERP (Technique for Human Error Rate Prediction), MAC (Méthode des Arbres de Causes). Elle est également connue sous les noms de (Méthode des Arbres des Défauts ou Méthode des Arbres des Défaillances) .MAC est une approche déductive car elle se focalise sur les événements redoutés d'abord pour identifier leurs causes ensuite. ou AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité) est une méthode d'analyse inductive car elle part des défaillances de composants pour en déterminer les conséquences. Parmi les moyens de diagnostic :

Les barrières

Elle consiste à protéger le système contre l'occurrence ou les conséquences d'un état de fonctionnement donné. Plusieurs types de barrières existent.

Les barrières matérielles

Ce type de barrières prévient physiquement des actions exécutées ou de la propagation des conséquences. L'accomplissement de leur fonction besoin pas d'être saisies par l'opérateur humain, Les barrières matérielles placées par le concepteur du système qu'on peut citer sont : armoire électrique, grille de protection.

Les barrières fonctionnelles

Ces barrières nécessitent la présence de pré-conditions qui doivent être vérifiées avant d'obtenir un résultat. Ils gênent l'exécution de l'action en établissant, par exemple, une dé-

pendance logique ou temporelle pour les activer, et même chose comme les barrières matérielle, ils n'ont pas besoin d'être perçues par l'opérateur humain. Les barrières fonctionnelles placées par le concepteur du système qu'on peut citer sont : capteur de présence, inter-verrouillage, éloignement des commandes.

Les barrières symboliques

Elles demandent une interprétation pour qu'un opérateur humain puisse réagir ou répondre aux messages qu'elles contiennent. Donc l'accomplissement de leur fonction besoin d'être saisies par l'opérateur, Les barrières symboliques placées par le concepteur du système qu'on peut citer sont : affichage, étiquetage sur l'outil, signalisation, visuelle et sonore, supervision.

Les barrières immatérielles

L'activation des barrières immatérielles demande d'être connues par l'opérateur humain. En effet, ils se retrouvent dans différents référentiels d'évaluation et d'interprétation du risque depuis la conception d'un outil de production jusqu'à son utilisation sur site. L'analyse hors-ligne ou en ligne des risques permet donc de spécifier des barrières à différents niveaux décisionnels, les barrières immatérielles placées par le concepteur du système qu'on peut citer sont : formation des futurs utilisateurs, manuels utilisateur.

Les redondances

C'est un des moyens de diagnostic qui a comme principe de mettre à disposition plusieurs ressources pour réaliser une même fonction ou une même tâche. Certaines redondances permettent à une ressource donnée de disposer de plusieurs moyens d'acquisition d'une même information, alors que d'autres permettent d'agir sur le procédé et d'en changer le comportement.

D'une manière générale, la combinaison de probabilités $P(e_i)$ d'occurrence d'événement e_i , est une mesure R de la fiabilité ou de la disponibilité d'un système, on prend en considération l'intervalle de temps $[0, t]$.

Dans une structure série, un système à deux éléments est fiable ou disponible si les deux éléments sont fiable, tandis que dans une structure parallèle, il est fiable si au moins un élément est fiable. Lorsque deux événements sont indépendants, l'occurrence de l'un ne peut affecter la probabilité d'occurrence de l'autre. Ainsi, le calcul de probabilités conditionnelles $P(e_1) * P(e_2/e_1)$, multipliant la probabilité d'occurrence de e_1 par la probabilité d'occurrence de e_2 sachant l'occurrence de e_1 , est simplifié par le produit $P(e_1) * P(e_2)$.

Un système redondant améliorant la sûreté de fonctionnement d'un système donné est basé sur des structures parallèles : un système constitué de n éléments redondants est fiable ou disponible si au moins un de ses éléments fonctionne. Deux types de redondance peuvent être mis en œuvre :

- Redondance active : les moyens sont mis en œuvre en même temps, l'exemple de redondance informationnelle.
- Une redondance passive : les moyens sont mis en œuvre lorsque le système demande (par exemple : redondance physique ou matérielle).

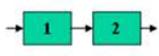
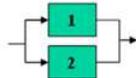
Type	Série	Parallèle
Structure		
Mesure R de la fiabilité générale	$R=P(e_1 \cap e_2)$	$R=P(e_1 \cup e_2)$
Cas où e_1 et e_2 sont dépendants	$R=P(e_1).P(e_2/e_1)$	$R= P(e_1) + P(e_2) - P(e_1).P(e_2/e_1)$
Cas où e_1 et e_2 sont indépendants	$R=P(e_1).P(e_2)$	$R=P(e_1) + P(e_2) - P(e_1).P(e_2)$
Cas où e_1 et e_2 sont disjoints		$R=P(e_1) + P(e_2)$

FIGURE 1.16 – redondances avec les structure séries et parallèles.

Les redondances interactives

Ce type de moyen consiste à mettre les éléments redondants qui travaillent de façon à coopérer ensemble, afin d’atteindre des buts communs. Les activités de diagnostic peuvent être partagées entre différents décideurs que ce soit systèmes automatisés et/ou les opérateurs humains. Ils sont alors capables de prévenir ou de retrouver en ligne les dérives de fonctionnement. En effet, l’action est activée après les configurations de prévention des systèmes redondants qui mettent en jeu une coopération pré-active ou proactive.

D’une façon claire, l’approche pré-active s’agit d’un aide à la décision, au temps que l’approche proactive permet de réguler l’activité par une répartition dynamique des tâches entre les décideurs (i.e., il s’agit d’une aide à l’action).

1.7.6 Architecture de diagnostic

Afin de fournir un ensemble de décisions booléennes sur la présence de défauts, le diagnostic de défauts s’exécute en combinant un générateur de résidus avec une stratégie d’analyse, comme illustré en figure(1.16)(Schéma usuel pour la détection et la localisation de défauts). L’étape de génération des résidus utilise un modèle du système, dans lequel sont injectées les entrées de commande envoyées aux actionneurs et les mesures des sorties provenant des capteurs, pour prédire son comportement attendu et le comparer à la réalité.

L’idée est de fournir des indicateurs quantitatifs de l’apparence de défauts, les résidus, cette technique se localise au cur de la démarche du diagnostic à base de modèles.

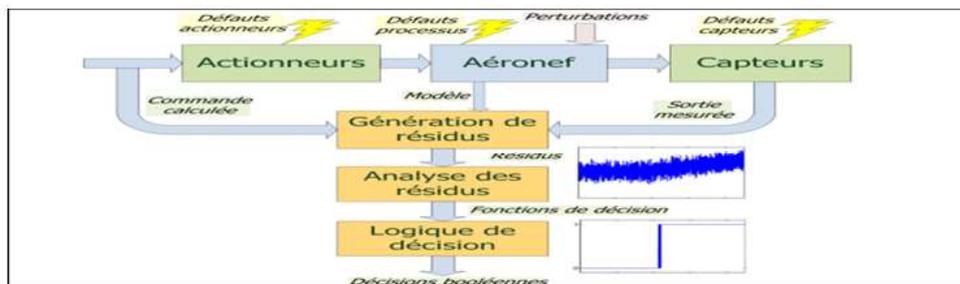


FIGURE 1.17 – Schéma usuel pour la détection et la localisation de défauts

En fonctionnement normal $\tilde{r} \approx 0$, lors qu’apparaissent les défauts cette valeur va être différente de zéro, avec \tilde{r} la moyenne de résidus.

Donc il est nécessaire d’avoir un appel à une méthode d’analyse des résidus. Cette approche

traduit automatiquement l'évolution temporelle d'un résidu en une décision booléenne indiquant si le signal est considéré comme faible ou non, et permettant également d'estimer un instant d'apparition du défaut. De plus, la décision booléenne indique si le signal est considéré comme faible ou non. La sensibilité des résidus se fait avec un seul défaut, à tous les défauts, ou à un nombre intermédiaire. Ainsi, l'étape finale du processus est une logique de décision qui transforme les fonctions de décision obtenues précédemment en une estimée de la localisation des défauts.

1.7.7 Performance et robustesse

La minimisation des taux de non détection (absence d'alarme à l'apparition d'un défaut) et de fausse alarme (alarme en l'absence de défaut) nécessite un réglage d'une procédure de diagnostic qui doit garantir un compromis satisfaisant entre les objectifs contradictoires. À l'aide d'indicateurs quantitatifs, la mesure de la performance du diagnostic s'exécute, souvent définis comme dans [48]. Comme il est prévu dans la figure (Zones temporelles pour le calcul d'indicateurs de performance du diagnostic), elle distingue différentes zones temporelles dans l'évolution d'une fonction de décision booléenne, qui servent de base le calcul de ces indices.

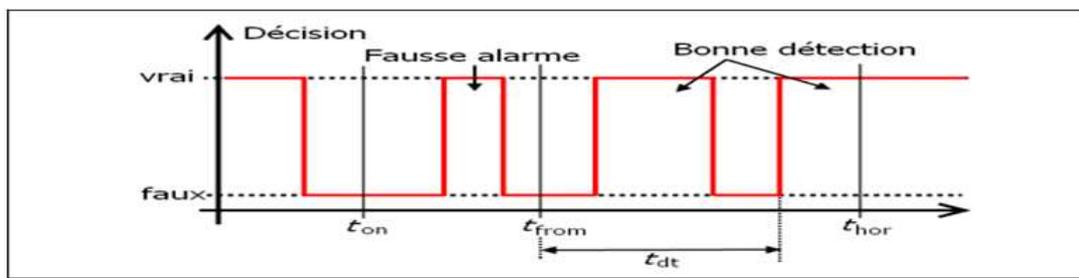


FIGURE 1.18 – Zones temporelles pour le calcul d'indicateurs de performance du diagnostic

t_{on} : Délai de convergence, t_{from} : fin d'exploitation du système, t_{hor} : l'instant d'apparition du défaut à détecter.

CONCLUSION

Dans ce premier chapitre on a parlé surtout des méthodes diagnostics pour être au sujet fondamental, la première partie de chapitre a été dédiée à la présentation de quelques concepts de terminologies dans le domaine de diagnostic de défaillances des systèmes industriels, on mentionne les SAP, les termes anomalie, défaillance, surveillance, diagnostic, détection.. , après on a expliqué les trois types de défauts existants, ensuite les évolutions temporelles et la localisation et identification des défauts, le titre avant dernier c'est les modes de fonctionnement. Après on est passé au noyau du chapitre qui est les méthodes de diagnostique. Nous avons constaté que les méthodes avec modèles reposent sur une comparaison du comportement observable du système avec son comportement prévu, décrit par un modèle qualitatif et/ou quantitatif. Les méthodes à base de modèles qualitatifs consistent à abstraire certains aspects continus du système.

CHAPITRE 2

LES BONDS GRAPH

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous représentons l'outil bond graph avec lequel nous allons travailler sur notre thème de la conception d'un système de supervision d'un moteur courant continu. La satisfaction des critères de performance nécessite des étapes d'étude, que ce soit la modélisation, la simulation, la conception de lois de commande.

Pour cette raison, les membres des équipes des milieux industrielles productif suivent les projets depuis la définition du cahier des charges du système à concevoir jusqu'aux tests sur le prototype, et doivent avoir une approche commune des problèmes (statique ou dynamique, à paramètres localisés ou distribués, linaires ou non linéaires, fréquentielle ou temporelle), des outils de représentation de même nature et des logiciels de simulation compatibles. Les systèmes à simuler sont généralement multi-physiques, ils font intervenir simultanément un système mécanique, un système électrique, un autre hydraulique ou un autre thermique. Ici il va apparaître le rôle du langage unifié pour tous les domaines de la physique et son caractère graphique, l'outil qui joue le rôle d'un support de communication entre spécialistes de disciplines différentes, c'est l'outil bond graph (ou graph de liaisons ou graph à liens), c'est un langage multidisciplinaire et de forme unique[49].

Le bond graph a été introduit par H. Paynter en 1961 et formalisé par Karnopp et Rosenberg en 1975. Cette méthodologie est entrée en Europe à la fin de d'années 70 par les Pays-Bas (Université de Twente) et la France (société Alstom). L'outil bond graph est maintenant utilisé régulièrement dans quelques entreprises, en particulier dans l'industrie automobile (PSA, Renault, Ford, Toyota, General Motors, . . .). Il repose sur l'idée de la transmission de puissance entre sous système. Cette méthode illustre les transferts énergétiques dans le système en utilisant des liens de puissance (bond, en anglais) [49].

La méthodologie de la modélisation par BG est basée sur la caractérisation des phénomènes d'échange de puissances, à l'aide d'un lien au sein dun système. Lidée de la modélisation par BG, est la représentation des puissances dissipées comme le produit flux-effort et le lien par différentes jonctions pour reproduire le système.

Le bond graph, est un outil graphique qui se situe comme intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématique qui lui sont associés (matrice de transfert, équations d'état linéaire et non linéaire et système d'équations différentielles). La notion de causalité est un a tout majeur de la technique BG parce qu'il est considéré comme un guide de façon systématique et l'organisation des équations. Le BG est un excellent outil d'analyse, grâce a son caractère graphique et à structure causale. Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter les principes et les concepts de base de la représentation de systèmes physiques par

Bond Graph[50].

2.2 Représentation du langage bond graph

La méthodologie BG concerne tous les systèmes dans tous les domaines (linéaires, non linéaires, continus, échantillonnés, numériques, électroniques, hydrauliques, mécaniques, thermiques, ...), elle consiste à traiter les chaînes d'énergie et d'information.

2.2.1 Qu'est-ce qu'un bond graph ?

Pour tous les domaines physique et technique, l'outil bond graph (graphe de liaison ou graphe à liens) à vocation pluridisciplinaire permet 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 purifier le modèle par simple ajout de nouveaux éléments sans avoir à reprendre la démarche depuis le début. La méthode est adaptée à l'obtention de modèles intégrés, l'approche Bond Graph permet [51] :

- une modélisation à la fois fonctionnelle par sa représentation par Bond Graph à mots,
- structurelle par la visualisation des propriétés de causalité,
- comportementale par la déduction des modèles mathématiques (matrice de transfert dans le cas linéaire, équation d'état linéaire ou non linéaire, système d'équations différentielles d'ordre deux) directement du modèle Bond Graph.

2.2.2 Éléments de base pour l'énergétique [50]

Le langage qui est entre nos mains permet de construire de manière systématique les modèles mathématiques "classiques", il fait apparaître explicitement les relations de cause à effet (causalité), Comparés à une autre représentation visuelle du système en schéma-bloc, les bonds graphes distinguent les flux d'énergie des flux d'information, et puisqu'ils reposent sur le principe de la conservation de l'énergie, ils rendent impossible d'insérer de l'énergie inexistante dans le système, de cette marge on essaye de détailler le mieux possible les concepts fondamentale de cette méthodologie.

2.2.3 Les éléments bond graph

Il représentent les nuds d'un graph liaisons, défini par des caractères alphanumériques. Par exemple sur la figure 2.1(a), trois éléments bond graph que nous désignons par 0, 1, R, I, C, SE, SF, GY, TF.

2.2.4 Les ports

Les ports de chaque élément bond graph sont représentés par des segments, à l'aide desquels les éléments peuvent être connectés à l'environnement. Ainsi les éléments multi-ports dans un bond graph sont 0, 1, les éléments 2 ports sont TF, GY, les éléments à 1 port sont R, C, I, SE, SF, sur la figure 2.1(b) on a pris un exemple de chaque élément de différent nombre de ports, l'élément «0» est à trois ports, l'élément «R» à un port et l'élément TF possède deux ports.

Remarque : Les liens sont formés lorsque deux ports sont connectés entre une paire d'éléments multi-ports.

2.2.5 Bond graph

L'ensemble de ces éléments connectés entre eux par des liens représente le bond graph figure 2.1c. D'une manière plus globale, le bond graph peut être défini comme un graphe linéaire où les nœuds sont les éléments et les arcs sont les liens. Toutefois le bond graph est beaucoup plus riche que le graphe.

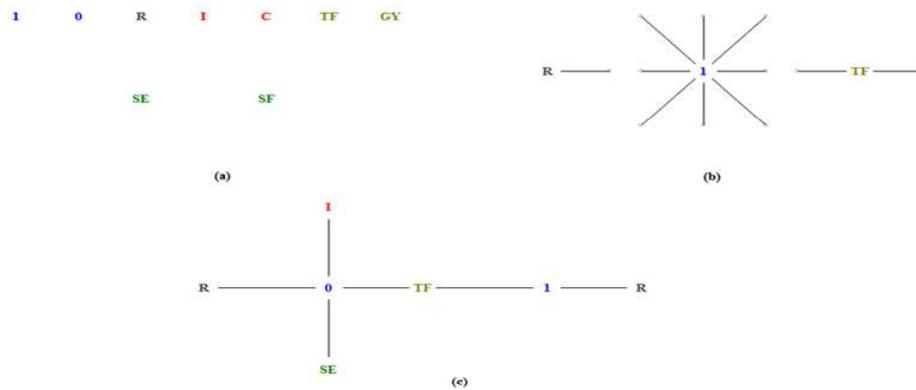


FIGURE 2.1 – Élément (a), éléments et ports (b), bond graph (c)

2.2.6 Liens de puissance

En bond graph, les liens (appelés liens de puissance) représentent la puissance ou le flux d'énergie échangé entre les deux éléments connectés. Cette puissance s'exprime comme le produit de deux variables complémentaires. Indépendamment du domaine physique considéré (thermique, électrique, chimique, ...), ces variables sont appelés «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 2.18.c. 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).

$$P(t) = e(t) * f(t) \quad (2.1)$$

La direction de la puissance positive est représentée par le sens de la demi-flèche.

2.3 Type de bond graph

2.3.1 Vrai bond graph

Lorsque la puissance instantanée sur un lien ou un port d'un composant du système est le produit effort-flux, c'est le vrai bond graph.

2.3.2 Pseudo bond graph

En génie des procédés et énergétique, l'utilisation de vrais bond graph 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 cèdent pas à des lois de conservation simples (l'entropie par exemple n'est pas conservée). On introduit alors pour leur modélisation un pseudo bond graph développé initialement par Karnopp 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[51].

2.3.3 Informations fournies par une représentation bond graph [52]

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 (développée plus loin),
- le type d'énergie utilisé par la nature des variables de puissance,
- la direction de la puissance transmise par la direction de la demi- flèche.

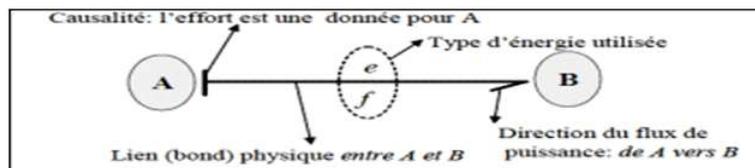


FIGURE 2.2 – Informations fournies par une représentation bond graph

2.4 Les variables généralisées

2.4.1 Variables de puissance et d'énergie en vrai bond graph

Chaque lien de puissance véhicule deux informations simultanément Ce sont les variables généralisées de puissance (leur produit étant la puissance transférée).

Par convention, le flux est toujours représenté du côté de la demi-flèche :



FIGURE 2.3 – Le sens de transmission de la puissance.

Nous utilisons aussi des variables généralisées d'énergie :

- Le moment ou impulsion p (l'intégrale de l'effort par rapport au temps)
- Le déplacement q (l'intégrale du flux par rapport au temps). Nous présentons les variables d'énergie par les relations intégrales suivantes :

Domaine	Effort e	Flux f	Moment p	Déplacement q
Electrique	Tension U	Courant i	Flux magnétique Φ	Charge q
Mécanique translation	Force F	Vitesse v	Impulsion p	Déplacement x
Mécanique rotation	Couple C	Vitesse angulaire ω	Impulsion angulaire h	Angle θ
Hydraulique	Pression P	Débit volumique	Impulsion pression Γ	Volume V
Chimique	Potentiel chimique	Flux molaire		Nombre de moles
Thermodynamique	Température	Flux d'entropie		Entropie
Magnétique	Force magnétomotrice	Dérivée de flux magnétique		Flux magnétique

FIGURE 2.4 – Équivalences des variables généralisées dans des domaines physiques

Les variables dites d'énergie notées $p(t)$ et $q(t)$, elles sont définies par les relations intégrales des variables de l'effort et du flux comme suit : $p(t) = \int_{t_0}^{t_f} e(t) * d(t) = p_0 + \int_{t_0}^{t_f} e(t) * d(t)$, utilisant une forme différentielle on trouve :

$$\frac{dp}{dt} = e(t) \rightarrow dp(t) = e(t)dt \quad (2.2)$$

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

$q(t) = \int_{t_0}^{t_f} f(t) * d(t) = q_0 + \int_{t_0}^{t_f} f(t) * d(t)$, utilisant une forme différentielle on trouve :

$$\frac{dq}{dt} = e(t) \rightarrow dq(t) = e(t)dt \quad (2.3)$$

Il est aisé, en utilisant les relations (2), d'exprimer l'énergie E en fonction de lune des variables d'énergie définies plus haut :

$$q(t) = \int_{t_0}^{t_f} e(t) * dq(t) = \int_{t_0}^{t_f} f(t) * dp(t) \quad (2.4)$$

2.4.2 Variables de puissance et d'énergie en pseudo bond graph [53]

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 fluïdique et le matériel ou le chimique.

Exemple : Un fluide en écoulement est caractérisé par un ensemble de variables, qui est :

- Pour les efforts : la pression P et la température T ,
- Et pour le flux, le débit volumique (ou massique), le flux d'entropie et le flux de quantité de mouvement.

Domaine	Effort \ominus	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	Température T	Flux thermique \dot{Q} [J/s]	Quantité de chaleur Q [J]	-
1. Conduction				
2. Convection	Température T [K]	Flux d'enthalpie \dot{H} [J/s]	Energie interne U [J]	-

FIGURE 2.5 – variables généralisées pseudo bond graph

2.4.3 Les éléments bond graphs [54]

Les éléments du langage Bond Graph vont être représentés par des nuds, ils sont de deux types :

1. les éléments de base (I, C, R, TF, GY) qui représentent un élément inertiel, de capacité ou résistif, éléments transformateur et gyrateur.
2. les nuds de jonction qui représentent les lois de conservation de puissance. Il existe deux jonctions, la jonction 0 appelée jonction de l'effort et la jonction 1 appelée jonction du flux.

Le langage Bond graph vient de renforcer la structure du modèle, faisant un tracé entre le modèle et le système assez intuitif. Les Bond graph représentent une description concise du processus entier à un niveau d'abstraction plus élevé que les équations décrivant les transferts d'énergie entre les éléments.

Les nuds du langage Bond Graph peuvent être classifiés par rapport aux quatre phénomènes énergétiques suivants :

1. Source d'énergie
2. Perte ou dissipation d'énergie
3. Stockage d'énergie
4. Transformation d'énergie

Nous utilisons les éléments pour représenter des phénomènes qui lient les variables généralisées. Nous pouvons les séparer en trois catégories :

I- Éléments actif[54]

Les sources d'effort Se et sources de flux Sf sont dites éléments actifs, elles sont :

- Permet de fournir de la puissance au système.
- Orientation de la demi-flèche est fixée, et est représenté sortant de la source.

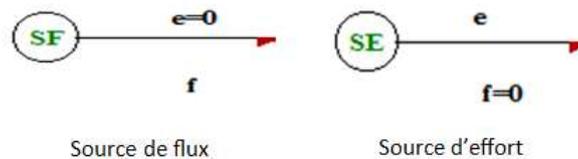


FIGURE 2.6 – Source de flux et d'effort

Exemple 1 pour SF : générateur de courant, pompe hydraulique à débit constant et vitesse appliqué.

Exemple 2 pour Se : générateur de tension électrique, générateur de couple, pompe hydraulique.

- La propriété fondamentale qui définit une source est que la variable effort ou flux fournie par les sources est supposée indépendante de la variable complémentaire flux (pour se) ou effort (pour SF).
- Si les sources appliquées sont indépendantes (gravité, tension ou courant d'alimentation, pompe, ...) on les représente par Se ou SF, si par contre elles sont modulées par des variables externes (pompe commandée par exemple) on les désigne par Mse ou MSf («M» pour modulée).

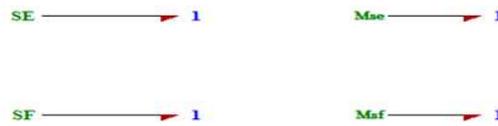


FIGURE 2.7 – les sources effort et flux et les sources modulé d’effort et flux.

II- Éléments passifs [54]

Dans le cas des systèmes mono énergétiques, les éléments considéré sont généralement à 1-port car ils reçoivent de la puissance par un seul lien. L’élément R est dissipatif d’énergie sous forme chaleur, les éléments I et C sont de stockage d’énergie. Les éléments passifs consomment la puissance et la transforment soit en énergie dissipée comme chaleur dans les éléments R, soit en énergie stockée dans les éléments I (énergie cinétique) et C (énergie potentielle). Comme la puissance est fournie à ces éléments, la demi-flèche est orientée vers l’élément. La loi d’énergie stockée est :

$$E(t) = \int_0^t e(t) * f(t) * dt + E(0) \tag{2.5}$$

Le tétraèdre de Paynter présenté Figure 2.8 illustre les relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs (R, I, C). Ceux-ci peuvent être de caractéristique linéaire ou non linéaire.

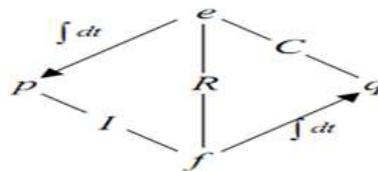


FIGURE 2.8 – Relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs

III- Les éléments dissipateurs d’énergie R

L’élément R est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d’effort à la variable de flux dans le domaine physique considéré comme il est montré sur figure de Paynter . La puissance qui lui est fournie est transformée en énergie calorifique dissipée. A titre d’exemple, les résistances électriques, les éléments de commutation de électronique (diode, transistor, etc.), les amortisseurs et les frottement dans le domaine mécanique, ou les restrictions hydrauliques et les vannes dans le domaine hydraulique. La loi générique qui caractérise cet élément est :

$$\Phi_r(e, f) = 0 \tag{2.6}$$

et sa représentation générale est la suivante :

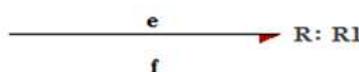


FIGURE 2.9 – Élément résistif

Si la loi $u - R_1 i = 0$ est linéaire en électricité, ou en mécanique $F - bV = 0$ en translation a titre d’exemple, le modèle bond graph spécifique au domaine concerné devient :

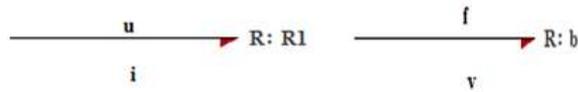


FIGURE 2.10 – Modèle BG de l’élément résistif (électrique (u, i)et domaine mécanique(f, v)

Citons les résistances électriques, les frottements visqueux mécaniques, les restrictions hydrauliques, les membranes chimiques séparant deux solutions de potentiels chimiques différents. On représente par 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-chimie chimiques (fig. 2.11 b,c,d,e).

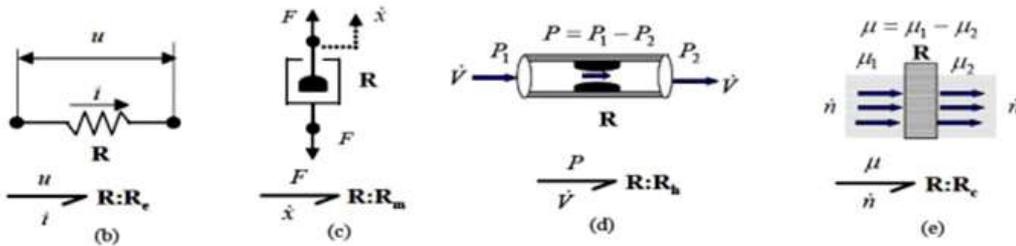


FIGURE 2.11 – Élément R à 1 port, représentation spécifique au domaine physique

IV- Les éléments de stockage d’énergie[55]

→ L’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.2.12 sont données les représentations générale et spécifique à quelques domaines physiques de cet élément du bond graph. L’élément C est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d’effort à la variable de déplacement dans le domaine considéré, La loi générique qui le caractérise est une relation dynamique liant l’intégrale du flux (soit le déplacement généralisé) et l’effort :

$$\Phi_c(e, \int f(t) * dt) = \Phi_c(e, q) = 0 \tag{2.7}$$

Sa représentation générale est donnée par :

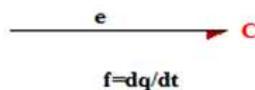


FIGURE 2.12 – Élément de capacité

Dans le cas linéaire, les lois s’écrivent en électricité $u = \frac{q}{c_1}$, il se présenter par :

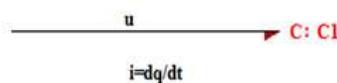


FIGURE 2.13 – Modèle BG de l’élément de capacité : domaine électrique

Les représentations graphiques sont données par la figure suivante : avec A : section, h : hauteur, ρ : densité,

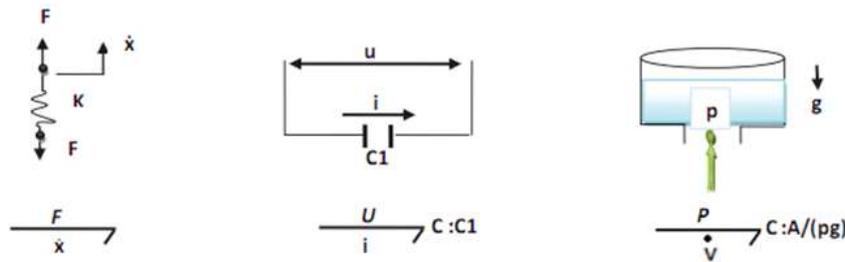


FIGURE 2.14 – Représentation graphique de l'élément C.

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

- $F - K * X = 0$ en mécanique
- $U - \frac{q}{c} = 0$ en électrique, avec $\frac{dq}{dt} = \frac{d(c*u)}{dt}$ et $U = \int \frac{1}{c} * i * dt = \frac{q}{c}$
- $P - \frac{\rho * g * v}{A} = 0$ en hydraulique.

La capacité d'un condensateur C est analogue à l'inverse de la raideur K d'un ressort appelée compliance et analogue à la constante $\frac{A}{\rho * g}$ d'un réservoir cylindrique de section A et rempli d'un fluide de masse volumique ρ .

L' énergie potentielle stockée est représentée sur la figure. 2.15 la surface hachurée.

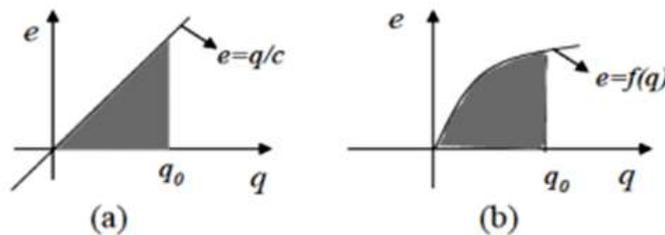


FIGURE 2.15 – Énergie stockée par un élément C dans le cas linéaire (a) et non linéaire (b)

→L'élément I

L'élément I (Inertie) est aussi un élément de stockage d'énergie. Il transforme la puissance qui lui est fournie en énergie cinétique pour les systèmes mécaniques et magnétiques pour les systèmes électriques ; L'élément I permet de modéliser tout phénomène physique liant la variable de flux à la variable de e moment dans le domaine considéré. À titre d'exemple, citons les masses, inertie et inductances (translation et rotation). La loi générique qui le caractérise est :

$$\Phi_i(f, p) = \Phi_i(f, \int e(t) * dt) = 0 \tag{2.8}$$

Sa représentation générale est la suivante :

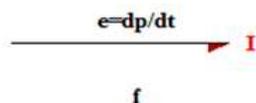


FIGURE 2.16 – Élément I à 1 port, représentation générale

Remarque : L'élément I est le dual de l'élément C et vis versa. Dans les domaines d'électricité et de mécanique, on aura :



FIGURE 2.17 – BG de l’élément inertiel D. électrique (u, i)et D . mécanique(f, v)

Exemple des représentations graphiques sont données par la figure (2.18) suivante :

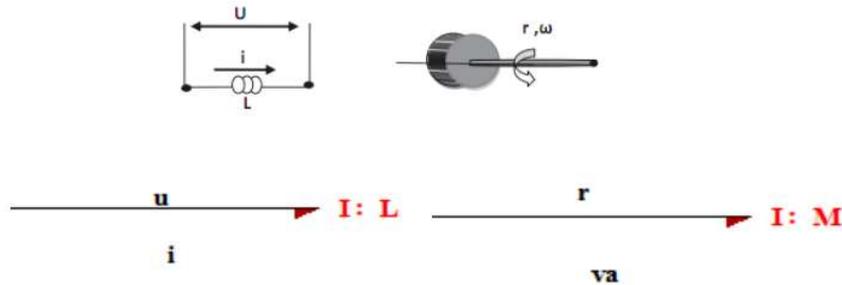


FIGURE 2.18 – Élément I à 1 port, représentation domaine électrique et mécanique

Dans le cas linéaire, la loi générique s’écrit $u - L \frac{di}{dt} = 0$ (Soit $\Phi - L * i = 0$) en électricité, $F - M * V = 0$ (soit, avec ; $P - M * V = 0$ et va) en mécanique.

Symbole	Définition	Nom
Se $\xrightarrow[e]{f}$	$e = e(t)$	Source d’effort
Sf $\xrightarrow[e]{f}$	$f = f(t)$	Source de flux
$\xrightarrow[e]{f}$ R	$\Phi_s(e, f) = 0$	Résistance
$\xrightarrow[e]{f}$ C	$\Phi_c(e, q) = 0$ $\Phi_c(e, \int f(t)dt) = 0$	Capacité
$\xrightarrow[e]{f}$ I	$\Phi_i(f, p) = 0$ $\Phi_i(f, \int e(t)dt) = 0$	Inertie

FIGURE 2.19 – Éléments de base de bond graph résume les éléments bond graph

V-Éléments de jonction

Ces éléments, notés TF et GY, 0, 1, servent à coupler les éléments R, C et I pour construire l’architecture du système à modéliser. Ils sont tous conservatifs de puissance.

→Les éléments de transformation d’énergie

► Transformateur “TF”

L’élément «TF» est un élément à deux ports qui modélise les éléments transformateurs de puissance tels qu’un transformateur électrique, un système d’engrenage ou un bras de levier Figure (2.20). Si le module «m» n’est pas constant, le transformateur est dit modulé et est noté par «mTF», la variable «m» peut alors être continue ou booléenne (0,1).

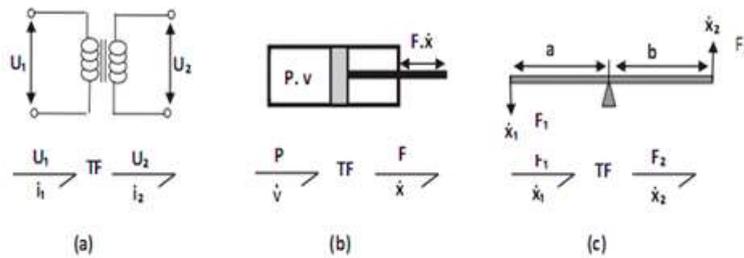


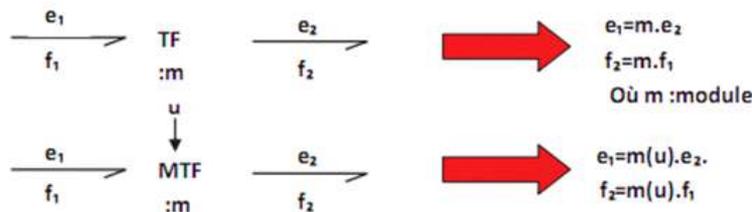
FIGURE 2.20 – Élément TF (a) : Transformateur électrique.(b) : Piston hydraulique.(c) : Levier.

Le transformateur est un élément qui n'a que deux lien : l'un en entrée et l'autre en sortie. Et aussi ; c'est un élément conservateur d'énergie :

$$e_1 * f_1 = e_2 f_2 \tag{2.9}$$

$$e_1 * f_1 = e_2 f_2 = e_1 / f_2 = e_2 / f_1 = m \tag{2.10}$$

Sa représentation par bond graph est :



► Gyrateur GY

GY est le dual du TF, c'est aussi un des éléments qui représentent les phénomènes de transformation de puissance, on retrouve l'élément GY le plus souvent, dans la modélisation des changements de domaines physiques qui s'effectuent sans perte de puissance, il n'a que deux liens : l'un en entrée, l'autre en sortie, il conserve la puissance :

$$e_1 * f_1 = e_2 * f_2 = \frac{e_1}{f_2} = \frac{e_2}{f_1} = r \tag{2.11}$$

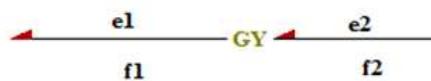
(r : est appelé le rapport du gyrateur)

Les fonctions qui le caractérisent sont :

$$e_1 = r f_2 \tag{2.12}$$

$$e_2 = r f_1 \tag{2.13}$$

Sa représentation par bond graph et comme suit :



Lorsque r n'est pas constant il devient r(u)(r est commandé), le GY est dit modulé et sera noté MGY.

Exemple : Le couplage électrique-mécanique intervenant au sein d'un moteur à courant continu se présente comme mentionné dans la figure 2.21(le cas où r constant ou r variable).

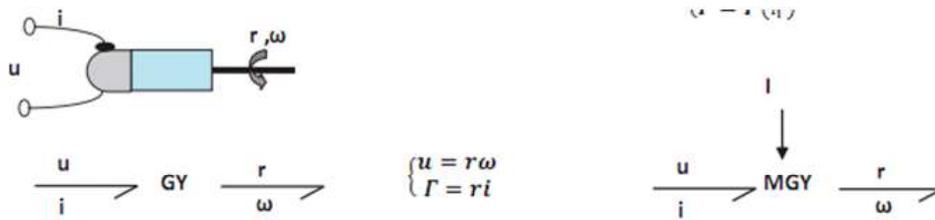


FIGURE 2.21 – représentation BG d’un GY.

→ **Jonction 0 et jonction 1**

Pour reproduire l’architecture du système à modéliser, les éléments R, C et I sont couplés entre eux par des jonctions «0» et par des jonctions «1».

► **Jonction “0”**

Elle associe les éléments soumis au même effort, ce qui correspond à des éléments en série en mécanique (même force) et en parallèle en hydraulique et électricité (même tension, pression). La jonction et la loi constitutive sont données par la Figure (2.22). La pondération sur les efforts se fait avec un signe (+) ou (-) suivant que la demi-flèche est entrante dans la jonction 1 (ou 0) ou sortante.

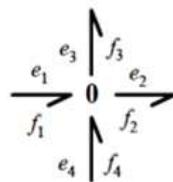


FIGURE 2.22 – Élément de jonction «0»

Les relations qui caractérisent la jonction «0» sont :

$$e_1 = e_2 = e_3 = e_4 : \text{égalité des efforts}$$

$$e_1 * f_1 - e_2 f_2 - e_3 f_3 + e_4 f_4 = 0 : \text{bilan des puissances}$$

$$f_1 - f_2 - f_3 + f_4 = 0 : \text{somme algébrique des flux nulle}$$

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). Elle permet une extension à tous les domaines de la physique des lois de Kirchhoff (loi des nœuds, loi des mailles) du domaine électrique.

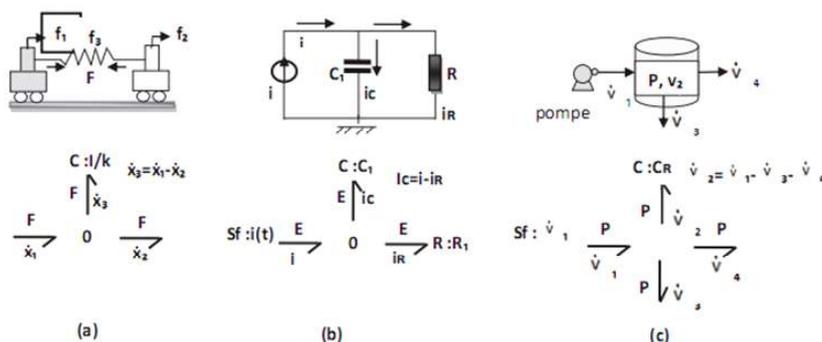


FIGURE 2.23 – Jonction 0 (a) : S. mécanique.(b) : S. électrique.(c) : S. hydraulique

► Jonction «1»

Elle associe les éléments soumis à un même flux. Elle représente des éléments en parallèle en mécanique (même vitesse) et en série en électricité et en hydraulique (même courant ou même débit volumique). La pondération sur les flux se fait avec un signe (+) ou (-) suivant que la demi-flèche est entrante dans la jonction 1 (ou 0) ou sortante.

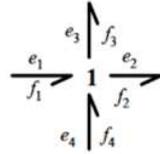


FIGURE 2.24 – Élément de jonction «1»

Les relations qui caractérisent la jonction «1» sont :

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 : \text{égalité des flux}$$

$$e_1 * f_1 - e_2 * f_2 - e_3 * f_3 + e_4 * f_4 = 0 : \text{bilan des puissances}$$

$$e_1 - e_2 - e_3 + e_4 = 0 : \text{somme algébrique des efforts nulle}$$

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). Elle permet aussi une extension à tous les domaines de la physique des lois de Kirchhoff (loi des nœuds, loi des mailles) du domaine électrique.

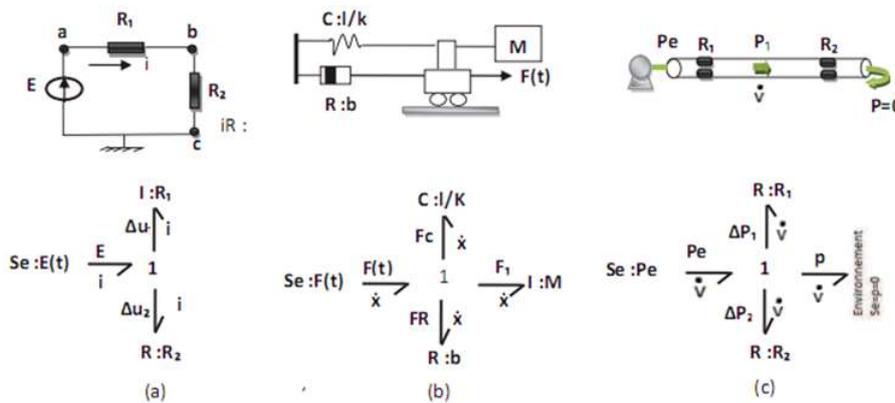


FIGURE 2.25 – Jonction 1 (s. mécanique, s. électrique, Système hydraulique).

Elément	Symbole	Loi générique	Exemples
Jonctions		$f_1 = f_2 = \dots = f_n$ $\sum_{i=1}^n a_i e_i = 0$	couplage en parallèle en mécanique, en série en électrique et hydraulique
		$e_1 = e_2 = \dots = e_n$ $\sum_{i=1}^n a_i f_i = 0$	couplage en série en mécanique, en parallèle en électrique et hydraulique
		$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$	transformateur électrique, levier, réducteur mécanique, couplage de systèmes physiques
		$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	moteur à courant continu, couplage de systèmes physiques

FIGURE 2.26 – les symboles et la lois générique de chaque type de jonction.

VI- Liens d'information

Lorsque aucune puissance n'intervient dans la modélisation d'un système physique ou lorsque une des deux variables effort ou flux est négligeable (puissance transmise négligeable), on utilise un lien d'information (fig. 2.27) 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.



FIGURE 2.27 – Lien d'information, détecteurs d'effort et de flux.

VII- Détecteurs

Nous utilisons les détecteurs d'effort (De) et de flux (Df) pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance ; nous utilisons donc un lien de type signal (une flèche). Tableau Eléments de base de bond graph résume les éléments bond graphs avec des exemples dans quelques domaines physiques.

Exemples :

- Détecteur d'effort : voltmètre, manomètre
- Détecteur de flux : ampèremètre, tachymètre

2.5 Construction de modèles Bond Graph pour les domaines “hydraulique, mécanique, électrique”

2.5.1 Introduction

Pour l'obtention de modèles Bond graph, des procédures ont été proposées et élaborées pour de différents domaines de la physique. Les procédures de construction diffèrent sensiblement selon les domaines physiques considérés. Ainsi, un élément C en mécanique (ressort) exprime une différence de vitesse (flux) entre ses deux extrémités et sera placé sur une jonction “équi-effort” 0. Au contraire, un condensateur électrique est caractérisé par une différence de potentiel (effort).

2.5.2 Algorithme 1

Procédure de construction de modèle bond d'un système hydraulique

- Fixer le sens de circulation du fluide.
- Rechercher tous les nuds de pressions différentes, placer une jonction 0 pour chaque nud.
- Placer une jonction 1 entre deux jonctions 0 et y attacher les éléments soumis à la différence de pression correspondante.
- Relier les jonctions par des liens, choisir une pression de référence (pression atmosphérique) et supprimer les jonctions 0 qui y sont associées, simplifier si possible.

2.5.3 Algorithme 2

Procédure de construction de modèle bond d'un système mécanique

- Choisir un repère qui servira pour l'orientation des variables.
- Rechercher toutes les vitesses différentes.
 - Placer une jonction 1 par vitesse différente.
 - y attacher les éléments correspondants.
- Exprimer les relations entre vitesse. Placer une jonction 0 entre les jonctions 1
- Placer les sources.
- Relier les jonctions par des liens, en respectant le sens de transfert de la puissance.
- Supprimer les jonctions 1 associées à une vitesse nulle, ainsi que tous les liens qui y sont attachés. Simplifier si possible.

2.5.4 Algorithme 3

Procédure de construction de modèle bond graph d'un circuit électrique

- A partir d'un schéma électrique, fixer le sens du courant (transfert de puissance) dans le circuit.
- Déterminer les nuds qui ont un potentiel différent et introduire une jonction 0 pour chacun d'eux.
- Mettre une jonction 1 entre deux jonctions 0 et y attacher les éléments qui se situent entre les nuds correspondants.
- Mettre le sens de la demi-flèche en suivant le sens du courant (pour un élément passif, l'orientation de la demi-flèche est fixée entrante tandis qu'elle est sortante pour un élément actif).
- Pour un circuit présentant un potentiel de terre explicite, supprimer toutes les jonctions 0 représentant ce potentiel. Dans un autre cas, choisir un nud de référence (ou plusieurs), puis supprimer les jonctions correspondantes.
- Simplifier le bond graph si possible.

exemple :

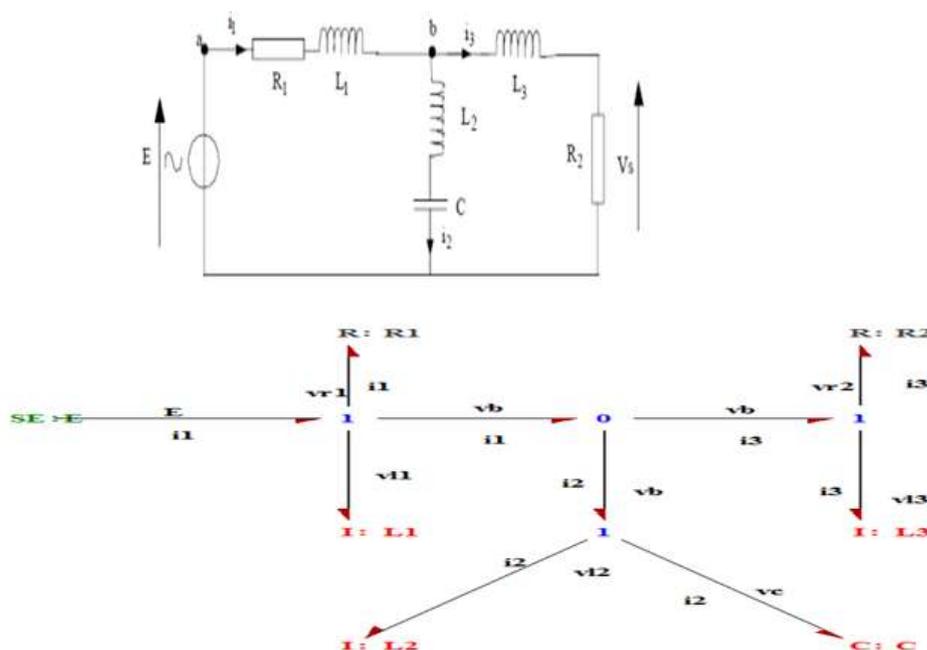


FIGURE 2.28 – Bond graph du Circuit électrique

2.5.5 Règle de simplification

Lorsqu'un bond graph est construit, dans ce cas il est possible de le simplifier. Les principales règles de simplification sont :

- Si une jonction 1 ou 0 n'a qu'un lien en entrée et un lien en sortie, on peut éliminer cette jonction (en effet elle est transmis la puissance)
- Si deux jonctions 1 sont reliées par un seul lien, on peut les réduire à une seule jonction 1 traduisant la vitesse commune.
- Si deux jonctions 0 sont reliées par un seul lien, on peut les réduire à une seule jonction 0 traduisant la vitesse commune.[56][57][58]

exemple :

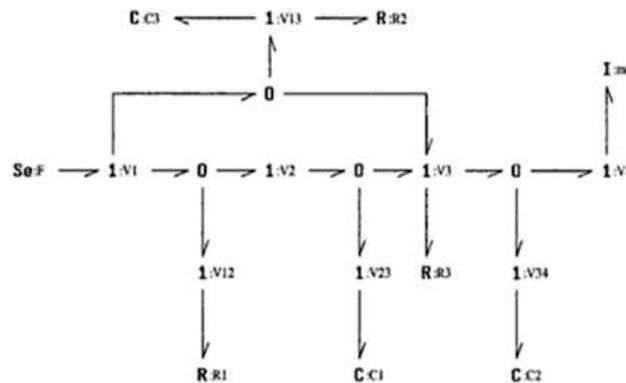


FIGURE 2.29 – Bond graph d'un système mécanique

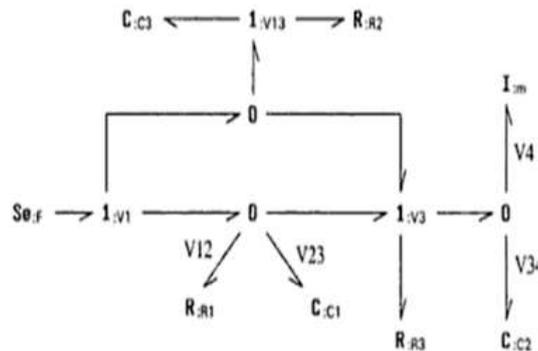


FIGURE 2.30 – simplification de BG de système mécanique

2.5.6 La causalité

L'affectation d'une orientation causale d'un bond graph signifie que ou la variable d'effort ou la variable de flux sur le bond est connue, et valeur pourra être propagée le long du graphe afin d'arriver à un modèle mathématique complet. Les contraintes causales permettent d'augmenter le modèle bond graph, en lui permettant d'ordonner automatiquement le système d'équations afin d'aboutir à une solution que ce soit manuellement ou à l'aide d'un logiciel informatique, et c'est ça l'intérêt de la causalité . Dans l'approche graphique, la causalité est représentée par un trait causal qui est mis, par convention, indique le sens où lequel l'effort est dirigé sur le bond.

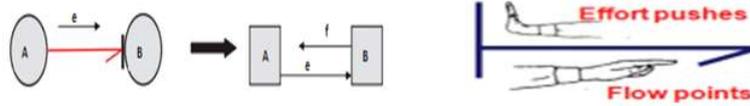


FIGURE 2.31 – Causalités en bond graph

Contraintes causales

La causalité exige certaines règles qui sont :

- Un Seul trait prêt de la jonction 0, qui impose cette valeur aux autres efforts. Le flux par lequel l’effort est connu, est inconnu. Il va être fonction des autre flux. A un moment donné, un seul effort est connu à la fois.
- Un seul trait causal en dehors de la jonction 1, tous les autres proches de la jonction 1.
- Un seul trait causal prêt du Transformateur.
- Deux traits causaux prêts d’un Gyrateur, ou aucuns.

Les seuls éléments qui peuvent forcer la causalité sont les sources d’énergie, et les éléments de structure.

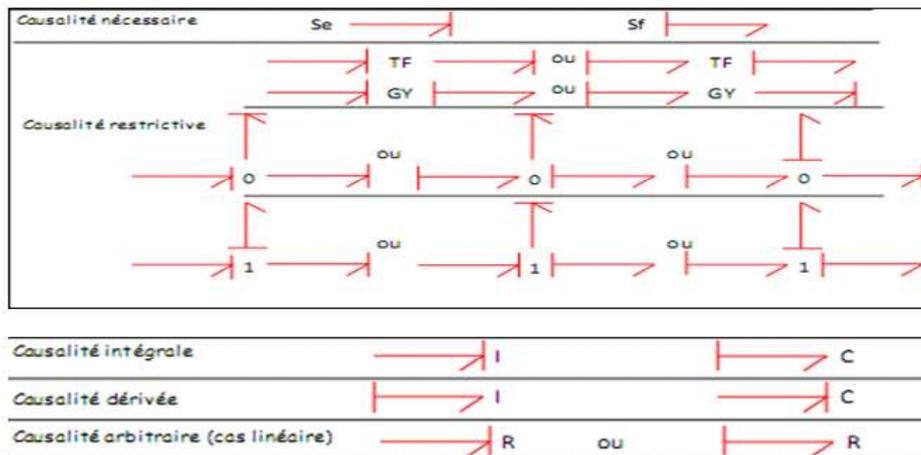


FIGURE 2.32 – Contraintes causales

Règles d’affectation de la causalité

- Affecter la causalité aux sources.
- Mettre les éléments «I» et «C» en causalité intégrale et répercuter sur l’environnement. On essaiera toujours d’affecter aux éléments C et I une causalité associée à une loi de type intégrale car il est plus aisé et plus robuste d’intégrer que de dériver.
- Affecter les causalités obligatoires aux jonctions «0,1, T F, GY».
- Affecter les causalités aux éléments R en fonction des possibilités restantes.
- Rechercher les conflits de causalité. En cas de conflit, reprendre en 2 et modifier la causalité sur l’élément «I» ou «C» origine du conflit. Quelquefois, on est contraint d’ajouter des éléments «C» ou «I» (pouvant représenter un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale [58].

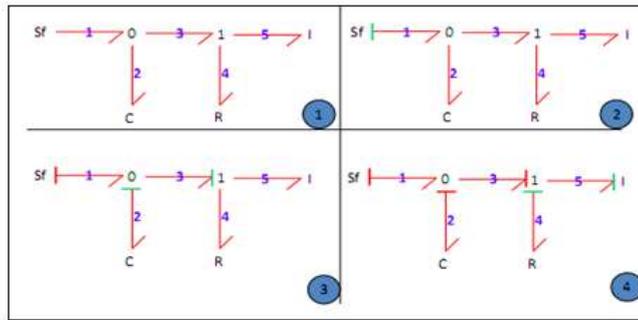


FIGURE 2.33 – Exemple d’application des étapes d’affectation

La causalité des éléments de base :

- **Source d’effort SE** : La source d’effort impose l’effort : donc la causalité est imposé et elle conduit à

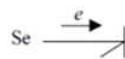


FIGURE 2.34 – Source d’effort SE

- **Source de flux Sf** : La source de flux impose le flux : donc la causalité est imposé et elle est conduit à

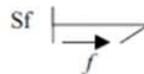


FIGURE 2.35 – Source de flux Sf

Causalité des jonctions[59]

Jonction 0 : nous avons vu que la jonction 0 correspond à une égalité des effort. Par conséquent, seul un lien peut imposer l’effort à la jonction. Nous aurons donc un seul lien avec trait causal auprès de la jonction.

Considérons l’exemple :

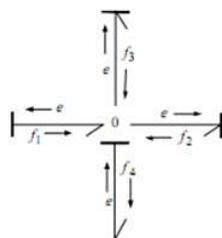


FIGURE 2.36 – Jonctions 0 avec causalité

Toujours un seul trait causal près de la jonction 0.

Jonction 1 : nous avons vu que la jonction 1 correspond à une égalité des flux. Par conséquent, seul un lien peut imposer le flux à la jonction. Nous aurons donc un seul lien sans trait causal auprès de la jonction.

Considérons l’exemple :

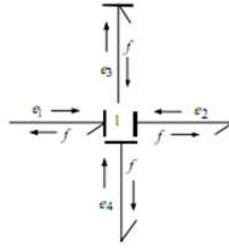


FIGURE 2.37 – Jonctions 1 avec causalité

Un seul lien sans trait causal près de la jonction 1.

Jonction TF : deux cas peuvent se présenter selon que le lien d'entrée impose un flux ou un effort :

- Cas 1 : le flux f_1 est imposé en primaire et l'effort en secondaire

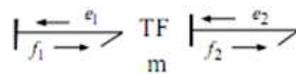


FIGURE 2.38 – Jonction TF avec la causalité

L'équation qui correspond :

$$\begin{cases} e_1 = m * e_2 \\ f_2 = m * f_1 \end{cases}$$

- Cas 2 : l'effort e_1 est imposé en entrée

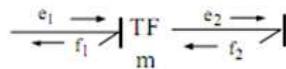


FIGURE 2.39 – Jonction TF avec la causalité

L'équation qui correspond :

$$\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} * e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} * f_2 \end{cases}$$

Jonction GY : Le gyrateur assure une relation croisé entre les efforts et les flux. De même que TF, on distingue 2 cas :

- le flux f_1 est imposé en primaire et l'effort en secondaire

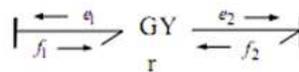


FIGURE 2.40 – Jonction GY avec la causalité

L'équation qui correspond :

$$\begin{cases} e_1 = r * f_2 \\ e_2 = r * f_1 \end{cases}$$

- Cas 2 : l'effort e_1 est imposé en entrée

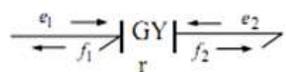


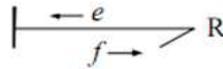
FIGURE 2.41 – Jonction TF avec la causalité

$$\text{L'équation qui correspond : } \begin{cases} e_1 = \frac{1}{r} * e_1 \\ f_2 = \frac{1}{r} * e_2 \end{cases}$$

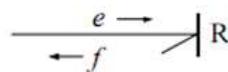
Causalité élément R

Dans le cas linéaire, la causalité de R est indifférente, donc on peut exprimer l'un d'effort ou flux en fonction de l'autre, nous pouvons obtenir deux cas :

- R reçoit le flux f et renvoie l'effort e :



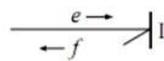
- R reçoit l'effort e et renvoie le flux f :



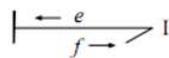
Causalité de l'élément I

Deux causalités sont possibles, et seule la causalité intégrale sera prise en charge.

- Causalité intégrale le flux est l'intégrale de l'effort.



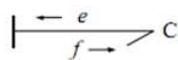
- Causalité dérivée l'effort est la dérivée de flux.



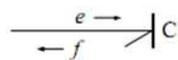
Causalité de l'élément C

Comme pour l'élément I, deux types sont disponibles

- Causalité d'élément C dérivée, le flux est imposé par la dérivée d'effort.



- Causalité d'élément C dérivée, le flux est imposé par la dérivée de l'effort.



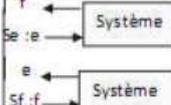
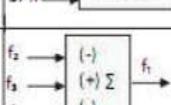
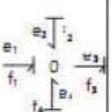
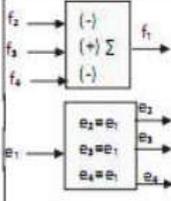
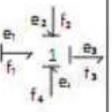
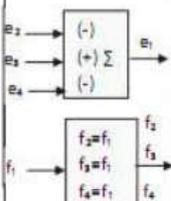
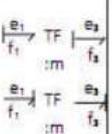
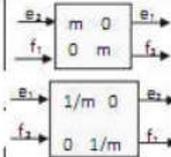
Element	Symboles	Equation causale	Bloc diagramme	Règles
Source d'effort S_e	$S_e : e$	e donné	$f \leftarrow$ 	L'effort (ou flux) imposé par la Source d'effort (ou le flux) est une donnée connue pour le système. Règle : la causalité est obligatoire.
Source de flux S_f	$S_f : f$	f donné	$e \leftarrow$ 	
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		$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \\ e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$		Un effort et un flux sont imposés au TF. Règle : un seul trait près de TF.

FIGURE 2.42 – Règles de causalités de différents éléments de bond graph

Chemin causal

Le bond graph est un graph où l'on définit des boucles causales et de chemin causaux, qui sont parcourus en suivant la propagation de l'information effort /flux.

→ **Chemin causal simple**

Un chemin causal est simple, s'il peut être parcouru en suivant toujours la même variable. Il existe donc pour une même séquence de liens et de nuds, deux chemins en suivant soit l'effort soit le flux, la figure 2.43 représente deux chemin causaux simples.

Chemin causal simple entre p_1 et p_2 en suivant la variable effort.

Chemin causal simple entre p_1 et p_2 en suivant la variable flux.

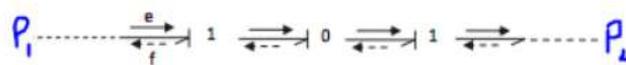


FIGURE 2.43 – Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f

→ **Chemin causal mixte**

Un chemin causal est mixte s'il faut changer de variable lors du parcours. Il existe deux cas le premier est :

Le cas en présence d'un GY, où le chemin est appelé mixte direct.

Deuxième cas, lorsque le chemin traverse un élément R, C ou I, ce qui correspond à un chemin mixte indirect.

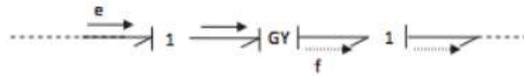


FIGURE 2.44 – Chemin causal mixte direct.

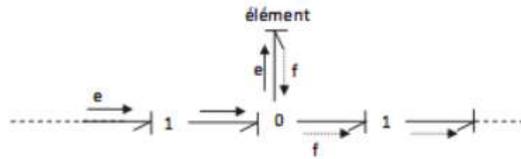


FIGURE 2.45 – Chemin causal mixte indirect.

→**Chemin de chaîne d'action**

Une chaîne d'actions est un chemin causal entre une source et une sortie (qui peut être représentée par un détecteur).

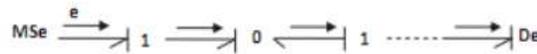


FIGURE 2.46 – Chaîne d'action

Boucle causale

Une boucle causale est un chemin causale fermé entre deux éléments de type R, C ou I, sans lien parcouru en suivant la même variable plus une fois.

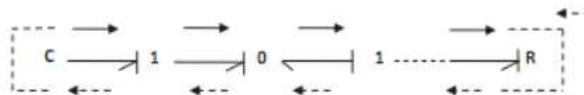


FIGURE 2.47 – Boucle causal en suivant l'effort ou le flux

Maille

Une maille est un chemin fermé parcouru en partant d'un élément et en revenant à cet élément, ayant suivi dans certains liens une seule variable.

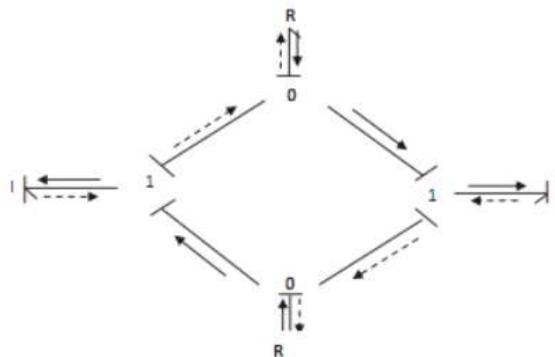


FIGURE 2.48 – Maille

Une boucle de causalité

Une boucle causale est une succession de jonctions et de liens formant un cycle, pour lequel la causalité est orientée dans le même sens sur tous les liens, sauf en présence d'un gyrateur[58][60].

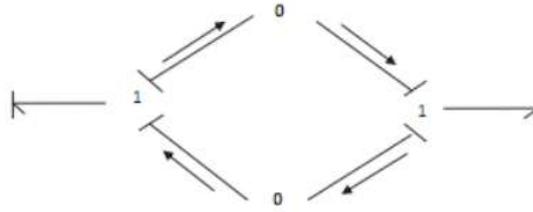


FIGURE 2.49 – Boucle causale.

2.5.7 Propriétés causales d'un bond graph

La structure graphique du BG, offre des caractéristiques dues à l'analyse causale, qui sont obtenus en suivant des chemins privilégiés appelés chemins causaux, tous sur le graph représenté.

Chemin causal, boucle causale

Dans une structure de jonction, un chemin est une alternance de liens et d'élément de base que nous appellerons nuds, tel que :

- Tous les nuds dans la séquence ont une causalité complète et correcte.
- Deux liens du chemin causal ont en un même nud des orientations causales opposées (sauf lorsque le chemin causal rencontre un élément GY).

La figure représente une structure de jonctions telle qu'il existe un chemin causal entre p_1 et p_2 en suivant l'effort. A chaque nœud, ici des jonctions 0 ou 1, on trouve un trait causal du coté de la jonction et une absence de l'autre coté.

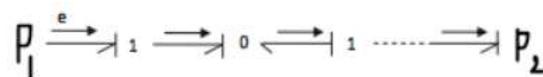


FIGURE 2.50 – Exemple chemin causal

La transmittance des élément R, C, I

On appelle transmittance ou gain des éléments passifs le rapport entre les variables de sortie et d'entrée[58], l'élément C en causalité intégrale est le suivant :

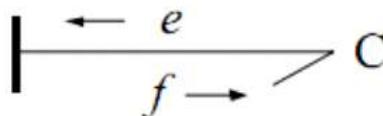


FIGURE 2.51 – C en causalité intégrale

La transmittance de C en causalité intégrale : $\frac{1}{c} * S$
 L'élément C en causalité dérivé :

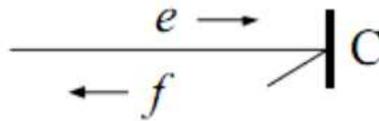


FIGURE 2.52 – C en causalité dérivée

La transmittance de C en causalité dérivé : $C * S$
 Élément I en causalité intégrale :

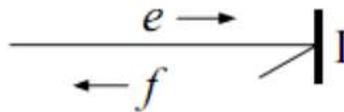


FIGURE 2.53 – Causalité intégrale pour l'élément I

La transmittance de I en causalité intégrale : $\frac{1}{I} * S$
 Élément I en causalité dérivé :

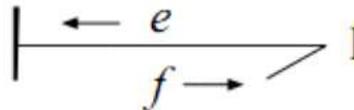


FIGURE 2.54 – Causalité dérivée pour l'élément I

La transmittance de I en causalité dérivé : $I * S$
 L'élément R possède deux situations de causalités différentes qui donnent deux types de lois.
 Le premier type : La transmittance de ce cas est : R

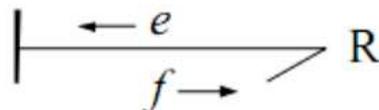


FIGURE 2.55 – Causalité résistance pour l'élément R

Le deuxième cas : La transmittance de ce cas est : $\frac{1}{R}$

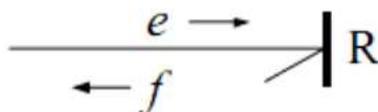


FIGURE 2.56 – Causalité conductance pour l'élément R

Gain d'un chemin causal

Le gain dans le cas linéaire d'un chemin causal se définit comme la fonction liant la variable d'entrée de l'élément formant l'extrémité du chemin à la variable de sortie de l'élément correspondant à l'origine du chemin.

→Gain chemin causal simple ou mixte

Le gain d'un chemin causal simple ou mixte direct se calcule par :

$$T = -1^{n_0+n_1} \prod_i m_i^{k_i} \prod_j r_j^{L_j} \quad (2.14)$$

- m_i et r_j sont les modules des éléments TF_i et GY_j .
- k_i et L_j valent (+1) ou (-1) suivant la causalité de TF_i et GY_j .
- n_0 et n_1 Représentent le nombre total de changements d'orientation des liens respectivement aux jonctions «0» quand on suit la variable flux et aux jonctions «1» quand on, suit la variable effort.

→Chemin causal indirect

Lorsque le chemin causal est indirect et passe par des éléments «R», «C» ou «I», le gain des éléments traversés est calculé par :

$$T = -1^{n_0+n_1} \prod_i m_i^{k_i} \prod_j r_j^{L_j} \prod_e g_e \quad (2.15)$$

$\prod_e g_e$: le produit des gains des éléments de la boucle

→Gain d'une boucle causale

Lorsque deux ports sont parcourus par une boucle causale indiquée i , le gain de la boucle B_i est obtenu par la relation similaire au gain d'un chemin causal, s'exprime par la relation suivante :

$$T = -1^{n_0+n_1} \prod_i m_i^{2*k_i} \prod_j r_j^{2*L_j} \prod_e g_e \quad (2.16)$$

Longueur d'un chemin causal

Dans un bond graphe ne comportant que des éléments en causalité intégrale, la longueur d'un chemin causal allant d'un élément de l'ensemble Se, SF, R, C, I vers un élément de l'ensemble De, Df, R, C, I est égale au nombre d'éléments «I» et «C» traversés +1 si le point d'arrivée est un «I» ou «C».

La deuxième définition possible, que dans un bond graphe en causalité intégrale préférentielle comportant des éléments I et C en causalité intégrale et dérivée, la longueur généralisée d'un chemin causal est définie par :

$l_g = [\text{nombre(I et C en intégrale traversés)} - \text{nombre(I et C en dérivée traversés)} + 1]$ si le point d'arrivée est un I ou C en

2.6 Analyse et de dimensionnement avec bond graph

2.6.1 Analyses structurelles

Ces analyses peuvent être effectuées automatiquement sur le modèle bond graphe implanté par l'utilisateur. Nous notons BGI(bond graphe intégrale) (respectivement BGD) le modèle bond graphe obtenu lorsque la causalité intégrale (respectivement dérivée) est préférentiellement appliquée aux éléments dynamiques I et C. Avec l'architecture du bond graph :

- l'ordre du modèle : L'ordre d'un modèle bond graphe (n) est le nombre d'éléments dynamiques en causalité intégrale dans le BGI.

- le rang de la matrice d'état : $\text{Rang}BG(A) = n - q$, Où n l'ordre du modèle, q le nombre d'éléments dynamiques qui restent en causalité intégrale dans le modèle BGD.
Remarque : Ce rang BG est le vrai "Rang de A", à cause des propriétés causales du modèle bond graphe
- l'observabilité : Un modèle est structurellement observable si et seulement si :
 - a. Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement liés à un détecteur dans le modèle BGI .
 - b. Tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée dans le modèle BGD. S'il existe des éléments dynamiques restant en causalité intégrale, la dualisation des détecteurs De et Df doit permettre de les mettre en causalité dérivée.
- La commandabilité : Un modèle est structurellement commandable en état si et seulement si :
 - a. Tous les éléments dynamiques en causalité intégrale sont causalement liés à une source de commande MSe ou MSf dans le modèle BGI, ou
 - b. Tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée dans le modèle BGD. S'il existe des éléments dynamiques restant en causalité intégrale, la dualisation des sources de commande MSe et MSf doit permettre de les mettre en causalité dérivée.
- L'inversibilité : Un modèle à m entrées et m sorties est inversible s'il contient un seul choix de m chemins causaux entrée/sortie (CCES) disjoints dans le modèle BGI. S'il existe plusieurs choix de m CCES disjoints, il faut déterminer le déterminant de la matrice système S . Cette matrice est définie comme :

$$S(s) = \begin{bmatrix} SI - A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

où les matrices A , B , C et D sont les matrices de l'équation d'état. La matrice Id est la matrice d'identité de dimensions $n * n$. Si le déterminant de la matrice $S(s)$ n'est pas nul, le modèle est inversible.

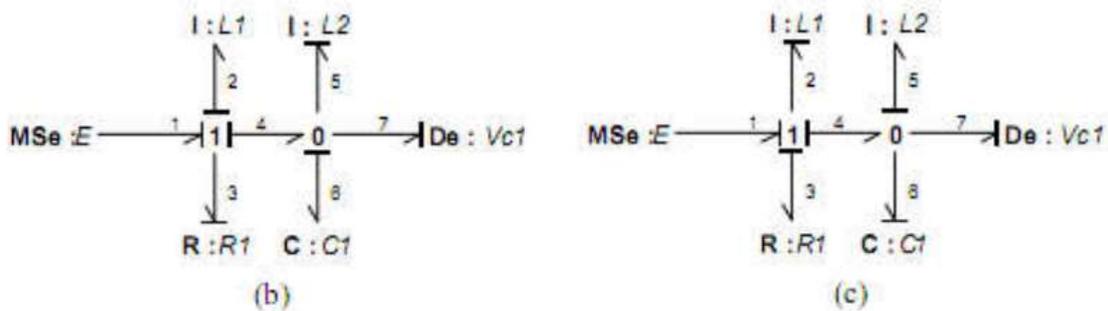


FIGURE 2.57 – (b) bond graphe associé (BGI), (c) BGD

A partir du modèle bond graphe, nous déduisons les propriétés suivantes :

- Ordre du modèle 3 (BGI)
- Rang du modèle 3 (BGD)
- Observabilité Il suffit d'un seul détecteur. Assuré par $De : Vc1$
- Commandabilité Il suffit d'une source de commande. Assurée par $MSe : E$
- Inversibilité Il n'existe qu'un seul choix de chemin E/S (enchaînement : $E - 1 - 2 - L1 - 2 - 4 - 6 - C1 - 6 - 7 - De$). Le modèle est donc inversible.

2.6.2 Analyse de la causalité

L'analyse causales du graph offre plusieurs types d'enseignement :

- L'existence d'une boucle causale de gain +1 (boucle de causalité) sans passer par des éléments dynamiques (éléments I ou C) ou en passant par des éléments dynamiques dont le dénominateur de la fonction de transfert est nulle. Pour éliminer ce problème il faut transformer certaines causalités initialement intégrales en causalités dérivées.
- Le cas où la causalité n'est pas unique (Figure 2.57) conduit à l'obtention d'équations implicites qui peuvent provoquer des problèmes numériques lors de la simulation. Il faut rendre explicites ces équations, en cassant la boucle algébrique (indiquée par la boucle de causalité entre les éléments impliqués en ajoutant des éléments dynamiques qui fixent la propagation de causalité. Dans l'exemple ci dessous, il suffit d'introduire un élément C à la jonction 0 pour fixer la causalité les éléments R. En fait, les éléments ajoutés correspondent souvent à des phénomènes physiques parasites négligés dans la modélisation (figure 2.58).

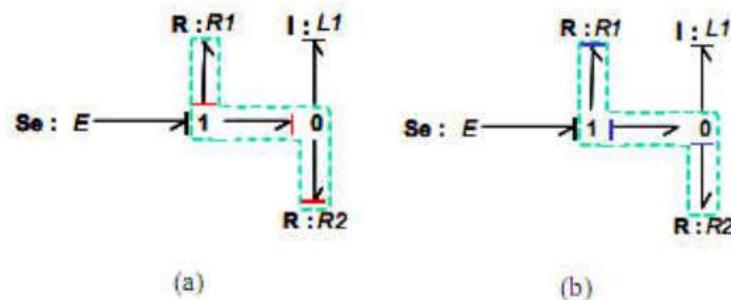


FIGURE 2.58 – La non unicité de la causalité entre les éléments R1 et R2, (a) ou (b).

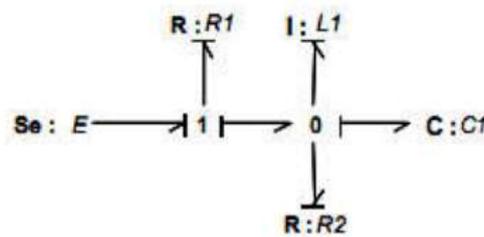


FIGURE 2.59 – Causalité unique.

- Une causalité dérivée sur des éléments dynamiques conduit aussi à des équations implicites lors de la construction de l'équation d'état. Pour effectuer la simulation d'un modèle ayant ce type de causalité, il faut utiliser un solveur acceptant les équations implicites ou modifier le modèle pour supprimer la causalité dérivée en ajoutant des éléments dynamiques supplémentaires comme pour le cas de non unicité de la causalité.

2.6.3 Analyses formelles

L'obtention d'un modèle mathématique sous forme d'expression formelle, telle que l'équation d'état ou la fonction (ou la matrice dans le cas à plusieurs entrées/sorties) de transfert se fait directement à partir du bond graphe. Par ailleurs, le calcul des boucles causales permet de déterminer les modes du modèle.

2.6.4 Analyses numériques

La simulation temporelle et fréquentielle permet de calculer des critères et d'analyser des performances du système. Par ailleurs, la simplification du modèle peut être effectuée. En

considérant les valeurs numériques des paramètres, nous pouvons évaluer numériquement des fréquences de couplage entre composants, la fréquence d'échantillonnage à implanter pour simuler le modèle et la durée minimale de la simulation.

CONCLUSION

L'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes influe sur les processus industriels, ils sont de natures diverses et associent des composants technologiques qui mettent en œuvre des lois issues de disciplines différentes. C'est pourquoi leur modélisation nécessite une approche unifiée. L'outil bond graphe, à vocation pluridisciplinaire, apparaît alors le mieux adapté pour la connaissance de tels systèmes.

Le comportement dynamique de ce type de systèmes est décrit généralement par des équations différentielles non linéaires, leur modélisation nécessite en conséquence une approche structurée capable de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'état. Les variables d'état, au sens des bonds graphe, sont des variables associées à un stockage d'énergie et directement déduites du modèle graphique. Les systèmes ne sont pas figés : le modèle bond graphe est évolutif, ce qui permet aisément d'affiner le modèle par simple ajout de nouveaux éléments (perte thermique, effet d'inertie, etc.) sans avoir à reprendre la démarche depuis le début. Pour adapter le modèle, il suffit alors simplement d'ajouter par exemple des éléments dissipatifs R pour les phénomènes de transfert thermique ou de résistance hydraulique, des éléments C pour la compressibilité des fluides, pour les capacités thermiques des parois et pour le stockage de masse et de volume et des éléments I pour toute apparition de phénomène d'inertie. Enfin, dans la modélisation des processus en génie énergétique y compris les systèmes chimiques, le choix des variables de puissance n'est pas trivial car le nombre de variables de puissance est supérieur au nombre de degrés de liberté. L'approche énergétique des bonds graphes et l'utilisation de variables génériques de puissance permettent de sélectionner les variables de puissance en fonction du système physique à modéliser.

CHAPITRE 3

DIAGNOSTIQUE AVEC LES BONDS GRAPH

3.1 Introduction

Tous les systèmes industriels possèdent l'intégration des parties de surveillances, qui sont mis en uvre dont l'objectif est d'être capable, à tout instant, de fournir l'état de fonctionnement des différents éléments constitutifs d'un processus technologique. L'opérateur de supervision gère deux types d'information, Tant au niveau de (FDI) qu'au niveau de la tolérance aux fautes (FTC). Le premier type d'information occupe la détection et l'isolation de défauts survenus sur l'installation, et le second indique les possibilités de laisser fonctionner ou non le processus la Figure 3.1 résume le principe de la «FDI» et de la «FTC». D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph, un système de surveillance peut être illustré par la figure 3.2 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). La partie énergétique du système pris en charge est représenté par le modèle bond graph. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graph 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 (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche). Les algorithmes de surveillance reçoivent les informations en ligne issues des capteurs 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.

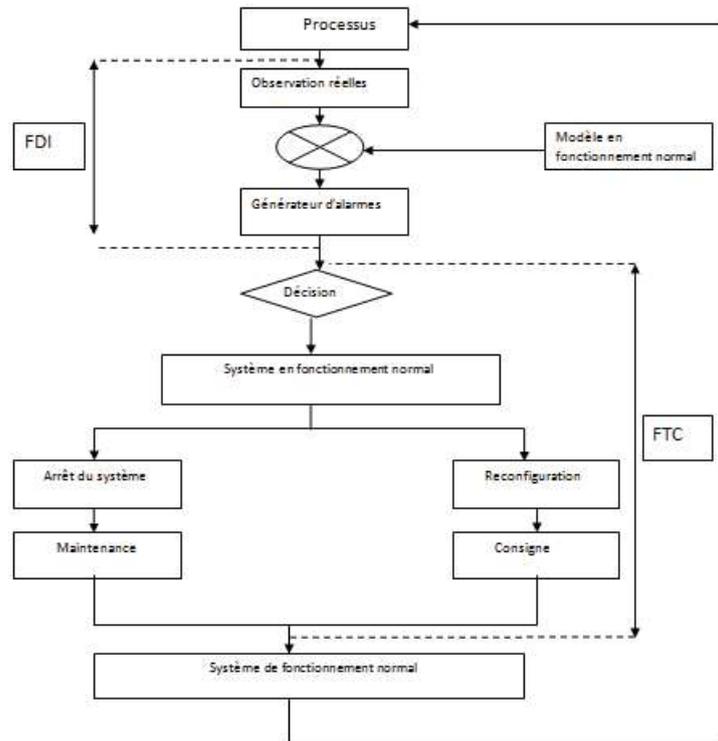


FIGURE 3.1 – Schéma de principe de la supervision

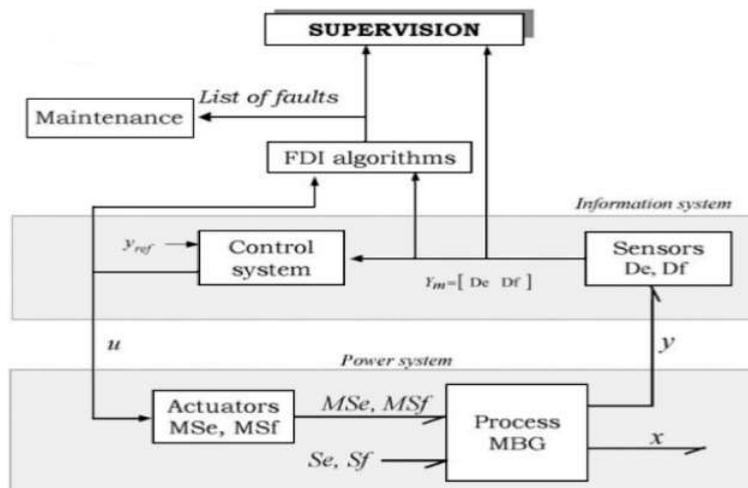


FIGURE 3.2 – Représentation bond graph d'un système de surveillance.

Nous nous intéressons dans ce chapitre aux méthodes de diagnostic à base du modèle bond graph. Au début, on présente le principe de diagnostic et méthodologie bond graph pour la surveillance. Par la suite, on expose les approche qualitative et quantitative pour la surveillance utilisant les bond graph toujours, après on fait rappel au étapes de diagnostic par bond graph, on passe à la procédure de génération des RRAs qui sont détaillés dans ce chapitre. et le calcul de matrice de signature de défaillance et on termine avec la procédure de détection et d'isolation de défaillances.

3.2 La modélisation par les bonds graph

Plus général possible et représente de manière homogène des systèmes qui pouvant contenir des composants électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques. Le moteur à courant continu constitue un exemple de système hybride présentant un couplage fort entre les domaines électrique et mécanique. Malgré la flexibilité des modèles mathématiques, ils perdent rapidement la signification physique du système et ne permettent pas généralement de faire un retour sur le modèle pour purifier la modélisation ou améliorer la conception du système pour simplifier sa commande[62][63]. Le bond graph est un des outils répondant à ces critères [64]. En effet, comme il est déjà déclaré dans le chapitre précédent ce langage est basé principalement sur la notion de transfert de puissance entre les différentes parties ou composants du système et sur la transformation de l'énergie dans ces composants. Le caractère unifié du bond graph constitue un langage de communication universel entre les experts de différentes disciplines. En effet, il est facile de décomposer le système en parties ou sous-parties et de faire un retour sur n'importe quelle sous-partie pour améliorer sa conception ou tenir compte d'un phénomène physique non pris en compte. Le modèle bond graph peut être alors considéré comme un modèle intermédiaire entre le système physique et le modèle mathématique qui lui est associé [64] [65].

Parmi les travaux demandé dans cette mémoire, est de montrer comment qu'on arrive à superviser un système (MCC) par un logiciel de supervision, pour notre cas, on a choisi le Bond-graph (Symbols). Le moteur a courant continu mis en uvre des puissances électrique et mécanique et des pertes de puissance. Les schémas (a, b, c, d) représentés dans la figure sont les schémas physiques des différentes excitations du moteur à courant continu, avec les phénomènes pris en considération pour la modélisation, la partie électrique et représenter par des résistances et des inductances, la partie mécanique qui englobe le frottement et l'inertie et la charge mécanique, et le moteur qui fait le lien entre la partie électrique et mécanique (transformation d'énergie) [66][67][68].

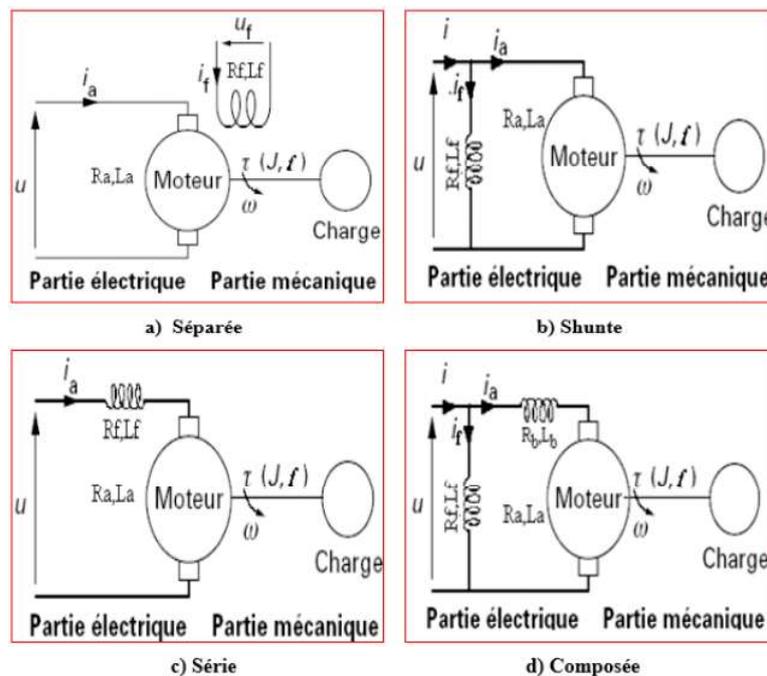


FIGURE 3.3 – Schéma physique d'un moteur à courant continu (a, b, c, d : types d'excitations).

La réalisation de la modélisation nécessite une méthodologie à suivre pour réaliser un modèle bond graph d'un système physique : [69][70][71]

1. Bien décrire le système à modéliser (tous les éléments qui échangent la puissance).
2. Faire le bond graph a mots du système à modéliser.
3. Dans le logiciel Symbols shakti(à décrire dans le chapitre suivant), placer les éléments, les assembler par des liens, numérotation des liens, préciser le sens de transfert de puissance et affecter la causalité intégrale préférentielle pour les éléments, ces étapes sont réuni sous le terme modèle bond graph.
4. Enfin, la validation du modèle. En effet, à ce niveau la modélisation s'appuie sur une description énergétique des phénomènes physiques. On introduit les concepts fondamentaux de la physique : dissipation d'énergie, transformation, accumulation, sources, etc. Les variables manipulées ont une sémantique physique forte : (énergie, puissance, effort, flux, ...etc.). C'est à ce niveau qu'intervient la prise en compte des bilans d'énergies, de matières, de quantités de mouvements. [63] [68]

3.2.1 Bond Graph

La construction d'architecture du système est abordée par l'assemblage de différentes sous-parties qui échangent de la puissance. L'interconnexion des composants est assurée par un couple de variables (effort et flux) [72][73]. Le modèle bond graph a mots du moteur a courant continu est présenté dans la figure 3.4, comme il est dédié dans notre exemple , l'effort de la source électrique vers le moteur c'est la tension u et entre moteur et le charge c'est U_e avec même ordre pour le flux c'est (i et ω)les différents types d'excitations du moteur n'apparaissent pas dans ce niveau de modélisation.

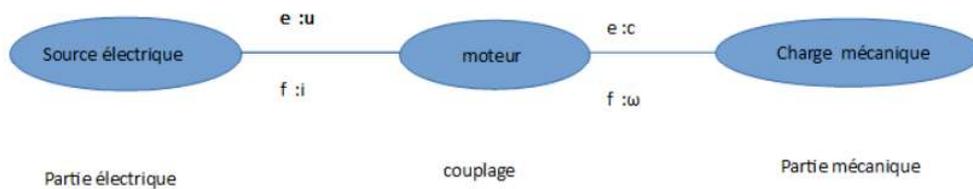


FIGURE 3.4 – Bond graph à mots du MCC

3.3 Méthodologie Bond Graph pour la surveillance

Le modèle bond graph est un modèle de connaissance pour la simulation. L'idée d'utiliser une seule représentation pour la modélisation, l'analyse et la synthèse des lois de commande en exploitant la causalité est récente. Plusieurs travaux ont été développés dans ce domaine . La démarche de l'équipe Bond Graph du LAIL consistant à considérer le modèle bond graph comme un modèle à part entière, constituant un outil d'aide à la modélisation, à la conception, à l'analyse, à la commande et à la surveillance grâce à sa structure causale est originale .

L'utilisation des propriétés causales des bonds graph pour des problèmes de commande concernaient l'extension de la règle de Mason. Plus tard le bond graph est utilisé comme outil de calcul formel et d'analyse structurelle pour la résolution de problèmes de commande : commandabilité en sortie, inversibilité, observabilité, placement de pôles etc... La surveillance, avec les aspects détection et localisation des défaillances, mais aussi le choix et le placement des capteurs, trouve aussi un intérêt à l'existence d'un tel modèle.

3.3.1 Surveillance des systèmes par bond graph

On distingue essentiellement deux parties dans une représentation par une approche bond graph :

- L'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie.
- La seconde représente les signaux de système [74]

Le processus utilisée représente la partie énergétique du système, il est modélisé généralement par les éléments bond graph usuels, les actionneurs, 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.

Le système d'information est formé par les capteurs et le système de commande. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche traduite par les variables d'effort et de flux. Dans le deuxième système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche). On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus : l'approche quantitative et l'approche qualitative.

L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph [75]

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, ...), Cette approche nécessite pas un modèle très précis. Les bond graph qualitatifs ne décrivent explicitement que la localisation des composants du système et leurs interconnexions.

Ces modèles sont planifiés sans aucune considération des paramètres du système. Ils se basent sur des valeurs qualitatifs définies par l'ensemble [1] [+] [0] [-] [-1] [?] représente 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 : $\{+, -, x, /, =\}$.

La résolution d'un système d'équations qualitatives sert à déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique d'occurrence de la faute [75][76].

L'avantage de cette approche est qu'elle nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres.

L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph

Cette approche compare le comportement réel du processus à celui du modèle qui est sensé représenter fidèlement le système. Elle se base sur des lois physiques et nécessite 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 ou sur la base d'une identification statistique des paramètres.

L'avantages que présente cette approche est la simplicité de la compréhension des relations de redondance analytique (RRA) puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph[74][76].

3.3.2 Placement de capteurs

La surveillabilité d'un système industrielle dépend du nombre et de placement de capteur. Grace à son architecture graphique, le modèle bond graph permet un placement explicite de capteurs. On peut soit proposer un placement combinatoire de capteur ou d'une façon manuelle directement sur le bond graph. L'ajout du capteur redondant améliore la surveillabilité, et ça est montré dans la MSF (matrice de signature de faute).

Algorithme correspondant pour le placement

Nous utilisons les détecteurs d'effort De et de flux Df pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance ; nous utilisons donc un lien de type signal «une flèche». Le but est d'obtenir un placement optimal de capteurs qui assure la surveillance des composants c'est à dire assurer la détection et la localisation des défaillances des composants. On admet que les défauts sur les composants ne sont pas multiples, les sources et les capteurs ne sont pas défaillants [77]. On a un modèle bond graph d'un processus physique. On suppose que les capteurs ne sont pas encore placés sur le modèle bond graph. Les variables booléennes y_i et z_j Correspondant au placement d'un capteur sur une jonction sont telles que :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ capteur est à la place } i^{\text{ème}} \text{ jonction } 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{si le } j^{\text{ème}} \text{ capteur est à la place } j^{\text{ème}} \text{ jonction } 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

- N_0 le nombre de jonctions 0
- N_1 le nombre de jonctions 1
- n_i le nombre de liens attachés à la $i^{\text{ème}}$ jonction 0 ($i = 1, \dots, N_0$).
- m_j le nombre de liens attachés à la $j^{\text{ème}}$ jonction 1 ($j = 1, \dots, N_1$).

e et f représentent l'effort et le flux respectivement. Les équations de la $i^{\text{ème}}$ jonction 0 sont :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n_i} a_k f_k = 0 & \text{où } a_k = \begin{cases} 1 & \text{si le demiflèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ e_k = e_{c_i} & k = 1, \dots, n_i - 1 \end{cases}$$

Les équations de la $j^{\text{ème}}$ jonction "1" sont :

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^{m_j} a_l e_l = 0 & \text{où } a_l = \begin{cases} 1 & \text{si le demiflèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ f_l = f_{R_j} & l = 1, \dots, m_j - 1 \end{cases}$$

L'ensemble des variables connues K contient les détecteurs et les sources :

$$K = MSe \cup MSf \cup De \cup Df \cup Se \cup Sf \quad (3.3)$$

L'ensemble des variables inconnues X est composé des liens de puissance dans les éléments C , I et R :

$$K = e1, f1 \cup e2, f2 \dots \cup e_{ne} f_{ne} / X \in R^{2*ne} \quad (3.4)$$

Où ne est le nombre de liens de puissance dans les éléments C, I et R. Les variables inconnues peuvent être calculées par le parcours des chemins causaux. Le flux et l'effort d'un élément I lié à une jonction 1 sont les suivants :

$$\begin{cases} e_{I_j} = \Phi_{I_j} [s\{(1 - z_j)f_{I_j} + z_j Df_j\}] ; j = 1, \dots, N_1 \\ f_{I_j} = \frac{1}{s}(1 - z_j)\Phi_{I_j}^{-1}(e_{I_j}) + z_j Df_j \end{cases}$$

Avec s est la variable de Laplace. Mais si l'élément «I» est placé sur une jonction «0», les variables effort et flux seront calculées comme suit :

$$\begin{cases} e_{I_i} = \Phi_{I_i} s(1 - y_i)f_{I_i} + y_i D e_i ; i = 1, \dots, N_0 \\ f_{I_i} = \frac{1}{s} [(1 - y_i)\Phi_{I_i}^{-1}(e_{I_i}) + y_i \Phi_{I_i}^{-1} D f_i] \end{cases}$$

La relation ci-dessous, présente comment calculer l'effort et le flux d'un élément «R» placé sur une jonction «1»>> :

$$\begin{cases} e_{R_j} = \Phi_{R_j} [(1 - z_j)f_{R_j} + z_j Df_j] ; j = 1, \dots, N_1 \\ f_{R_j} = (1 - z_j)\Phi_{R_j}^{-1}(e_{R_j}) + z_j Df_j \end{cases}$$

Et la relation ci-dessous si l'élément «R» est placé sur une jonction «0»>> :

$$\begin{cases} e_{R_i} = \Phi_{R_i}(1 - y_i)f_{R_i} + y_i D f_i ; i = 1, \dots, N_0 \\ f_{R_i} = (1 - y_i)\Phi_{R_i}^{-1}(e_{R_i}) + y_i \Phi_{R_i}^{-1} D f_i \end{cases}$$

3.4 PROCÉDURE GÉNÉRATION des RRAs

Une relation de redondance analytique (RRA) est une contrainte calculée à partir d'un sous système d'un modèle bond graph qui ne présentant pas de relations non linéaires complexes non inversibles, de plus les RRA sont exprimés en termes de variables connues du processus de la forme symbolique :

$$F(K) = 0 \quad (3.5)$$

L'évaluation numérique d'une RRA conduit à un résidu r, dont la valeur numérique en l'absence de défaillances doit être nulle :

$$r - f(K) \approx 0 \quad (3.6)$$

Dans une représentation par Bond graph, la relation d'une RRA devient :

$$F(D_e D_f S_e S_f M S_e M S_f D_e \theta_m) = 0 \quad (3.7)$$

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.

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, la puissance échangée est représentée par une demi-flèche qui traduit les variables de puissance (e et f). Les capteurs et le système de commande (PID, etc...) forment le système d'information, la puissance échangée est négligeable, elle est représentée par un lien d'information. Sur un modèle bond graph, l'observabilité peut être vérifiée en utilisant les propriétés structurelles développées [78].

3.4.1 Algorithme de génération des RRAs

L'algorithme permettant de générer des RRAs de façon systématique à partir d'un modèle bond graph est le suivant :

1. Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle BGD (en inversant la causalité des détecteurs si possible).
2. Écrire les équations du modèle obtenues : de comportement des jonctions de mesure des sources et de commande.
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.

3.4.2 Exemple d'application d'algorithme des RRAs

Appliquons cet algorithme de génération des RRA sur le système hydraulique de la figure 3.5 et son modèle bond graph en causalité intégrale.

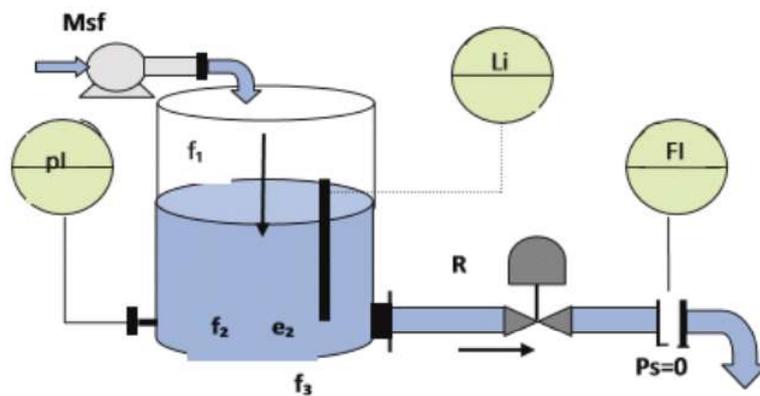


FIGURE 3.5 – Exemple d'illustration pour la génération des RRAs

Étape 1 : Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle en employant la notion de la dualisation des détecteurs (De, SSe, Df et SSf).

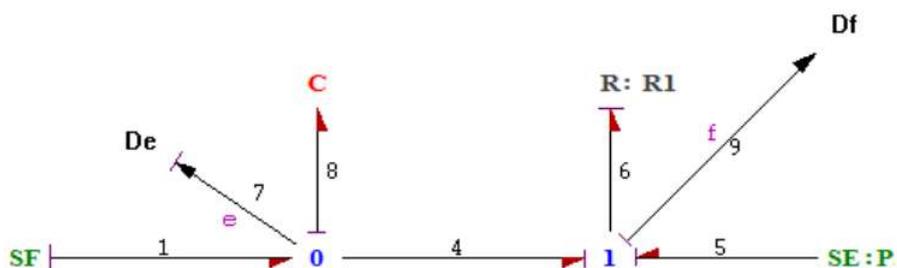


FIGURE 3.6 – Modèle BG en causalité Intégrale

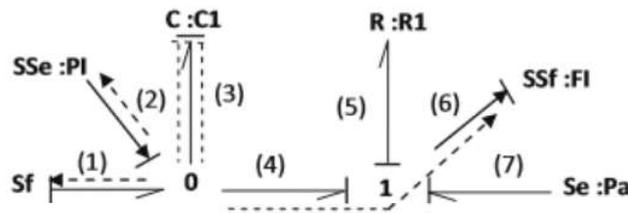


FIGURE 3.7 – Modèle BG en causalité dérivée

Étape 2 : Les RRAs sont déduites à partir des équations aux jonctions associées aux détecteurs, dans notre cas avons les équations issues des jonctions 0 et 1 .

Jonction 0 :

$$f1 - f3 - f4 = 0 \quad (3.8)$$

Jonction 1 :

$$e4 - e5 + e7 = 0 \quad (3.9)$$

En parcourant les chemins causaux pour éliminer les variables inconnues présentes dans les équations de structure ci-dessus, nous obtenons par conséquent :

$$F1 = SF, f3 = C1 \cdot \frac{dP1}{dt}, f4 = FI \quad (3.10)$$

$$e7 = -Pa, e4 = PI, e5 = \phi_R(FI) \quad (3.11)$$

Les résidus suivants sont déduits :

$$RRA = SF - C1 \cdot \frac{dp}{dt} - f4 - FI \quad (3.12)$$

$$RRA2 = -Pa + PI - \phi_R(FI) \quad (3.13)$$

3.4.3 Les propositions important pour les relations de redondance

Dans un modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle et observable, pour chaque jonction, 0 ou 1 avec un seul détecteur, correspond une RRA. Dans le cas où n détecteurs de même nature (effort ou flux) sont présents sur une seule jonction, (n-1) RRAs directes sont obtenues en mettant simplement à égalité les valeurs Fournies par chaque détecteur. Dans un modèle bond graph totalement observable, le nombre de RRAs est égal au nombre de détecteurs. En outre, les RRAs obtenues sont structurellement indépendantes.

3.5 Matrice de signature des défaillances

Une matrice binaire S_{ij} est formé par la structure des RRAs, cette matrice nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique (capteurs, actionneurs,..). Les éléments de la matrice sont définis comme suit :

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la } i\text{ème RRA contient des variables de } j\text{ième composant} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- S_{ij} 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 Db (défectabilité) et Ib (isolabilité).
 - Une défaillance d'un composant est détectable si la variable associée au composant est présente dans au moins une RRA.
 - Cette défaillance est localisable si et seulement si sa signature est unique, i.e. différente des signatures des autres composants [77][79].
 - A partir du cahier des charges demandé, la liste des composants à surveiller sera fixée.
- Tous les performances du système de surveillance dépendent du nombre d'éléments à surveiller et des différences de leurs signatures de défaillance. La matrice de signature des défaillances correspondant à cette exemple de la figure 3.7 est donnée au tableau '3.1

	COMP ₁	...	COMP _j	...	COMP _k
RRA ₁	S ₁₁	...	S _{j1}	...	S _{k1}
⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
RRA _i	S _{1i}	...	S _{ji}	...	S _{ki}

TABLE 3.1 – Matrice des signatures des fautes

En effet, la matrice des signatures des fautes de notre exemple de réservoir de la figure 3.5 est la suivante :

	F1 :sf	F2 :PI	F3 :C1	F4 :R1	F5 :FI	F6 :Pa
r1	1	1	1	0	1	0
R2	0	1	0	1	1	1
Db	1	1	1	1	1	1
Ib	0	0	0	0	0	0

TABLE 3.2 – Matrice de signature des fautes MSf de l'exemple étudié

Sf et C ont la même signature $S(Sf)=S(C1) = (1,0)t$, et par conséquent une faute au niveau de la pompe et une faute paramétrique au niveau du réservoir (déformation du réservoir par exemple), ne sont pas surveillables, par contre, deux fautes paramétrique au niveau de la vanne (vanne bloquée). Toutes les défauts sont détectables mais ne sont pas isolable.

exemple 2 : voici les relation redondance d'un système :

$$RRA1 = \phi(u1)_{pompe} - \frac{\rho \cdot A \cdot dL}{dt} - F = 0 \quad (3.14)$$

$$RRA2 = \rho * g * L - \Phi_R(F) - P_a t m \quad (3.15)$$

$$RRA3 = \phi(u1)_{pompe} \cdot T1 \cdot C_p + \phi(u2)_{chauffe} - A\rho \cdot Cp \left[\frac{dL}{dt} \cdot T + \frac{(L \cdot dT)}{dt} \right] - F \cdot C_p \cdot T \quad (3.16)$$

$$RRA4 = U1 - \phi_{LC} = 0 \quad (3.17)$$

$$RRA5 = U2 - \phi_{TC} = 0 \quad (3.18)$$

$$RRA6 = \frac{dm}{dt} - \phi(u1)_{pompe} = 0 \quad (3.19)$$

$$RRA7 = \frac{d\theta}{dt} - \phi(u2)_{chauffe} = 0 \quad (3.20)$$

$$RRA8 = P - \rho \cdot g \cdot L = 0 \quad (3.21)$$

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	Ib	Db
De :P	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
De :L	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
De :T	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
Df :m	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
Df : $\dot{\varphi}$	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
De :F	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
Réservoir	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
Vanne	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Pompe	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1
Chauffe	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
Lc	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
Tc	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1

TABLE 3.3 – Matrice de signature du système

Après une petite analyse, on voit bien que :

- la variable associée à chaque composant est présente dans au moins un résidu.
- la signature de chaque composant est différente des autres.
- Toutes les défaillances du processus sont théoriquement détectables ($Db = 1$) et isolables ($Ib = 1$).
- La non détectabilité et la non isolabilité, des défaillances d'un composant, correspondent respectivement à $Db = 0$ et $Ib = 0$.

3.5.1 Procédure de détection et d'isolation des défaillances

La procédure de décision est la prochaine étape dans la conception d'un système de surveillance une fois les relations de redondance analytique obtenues et la matrice de signature de défaillances générée. 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 [80]. La procédure de décision est appliquée sur l'ensemble des résidus r , 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.



CONCLUSION

Nous avons montré dans ce présent chapitre comment l'outil bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissances de systèmes physiques pluridisciplinaires, peut être aussi un excellent support pour la conception des systèmes de surveillance. Du point de vue industriel, un gain en coût est évident car les propriétés graphiques et causales du bond graph permettent d'analyser les conditions de surveillabilité (aptitude à détecter et localiser les défauts pouvant affecter les équipements pertinents) avant conception et ensuite dans une deuxième phase à générer les algorithmes de diagnostic en ligne d'une façon générique. De plus ces procédures sont automatisées par des outils logiciels dédiés tels que les logiciel 20sim et SYMBOLS, ce dernier va être présenté dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 4

LES CONCEPTS DE LOGICIEL SYMBOL SHAKTI, ET LA CONCEPTION DU MCC AVEC FDIPAD, BONDPAD ET SIMULATION

4.1 Introduction

SYMBOLSShakti (SYstem Modeling by Bond graph Language and Simulation) créé par l'institut indien de la technologie ; consultant High Tech, développé par A. Mukherjee et A. K. Samantaray, est un logiciel de modélisation et de simulation, spécialement pour simuler le comportement des systèmes dynamiques, tels que l'électrique, mécanique, chimique, thermique, et les systèmes hydraulique ou tout combinaison de ces systèmes. Symbols est composé de quatre modules qui sont les suivants :

- BondPad (constructeur de modèles graphiques),
- Simulator (interface de simulation),
- Controls (outil d'analyse théorique de commande),
- FDIPad (constructeur de modèles graphiques pour le FDI).

SYMBOLS a plusieurs algorithmes de l'intégration avancés qui garantit une simulation rapide et donne des résultats exacts. Vous pouvez inscrire vos modèles dans une représentation graphique d'une manière très facile, pour utiliser BondPad puissant et crée des sous modèles qui sont combinées dans un modèle global. SYMBOLS donne plusieurs sous modèles standard qui permettent de construire une simulation, simple et complexe.

La modélisation avec le bond graph attire de plus en plus l'attention des spécialistes dans le monde entier, ils découvrent que cette méthode peut augmenter considérablement la productivité.

4.2 Modules du symbols Shakti

SYMBOLS assure une simulation rapide et donne des résultats corrects et satisfaisants, il contient plusieurs algorithmes d'intégration avancés. Symbols shakti contient des modèles génériques (capsules) qui permettent de construire un modèle complexe. La construction de tous les modèles dans une représentation graphique est réalisée d'une manière très facile par l'utilisation du module " Bond Pad ", les sous modèles sont combinés dans un modèle global. SYMBOLSSHAKTI contient des modèles génériques (capsules) qui permettent de construire un modèle complexe, il est composé des modules suivants :

4.2.1 Le module BondPad (constructeur de modèles graphiques)

La tâche entière de la modélisation de système est accomplie dans ce module. Quand l'utilisateur ouvre BondPad, la fenêtre principale apparaît avec 3 fenêtres enfants comme montrés la fig 4.1 BondPad est une plate forme simple pour exécuter les activités suivantes :

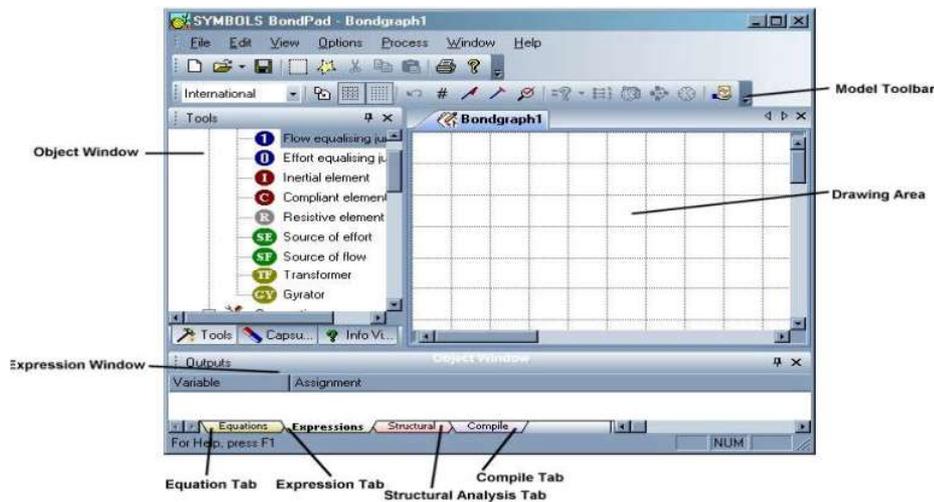


FIGURE 4.1 – Interface graphique de la partie BondPad du logiciel SYMBOLS 2000

- La fenêtre gauche contient les outils de dessin et de modification du modèle bond graph.
- La fenêtre inférieure est d'expression qui affiche les équations sous une forme symbolique et permet à l'utilisateur de faire des équations.
- La fenêtre droite est vide au début. L'utilisateur peut ouvrir un nouveau document pour dessiner un nouveau modèle en cliquant sur le bouton «open» qui se trouve dans la barre d'outils aussi ou il clique sur new pour dessiner un nouveau modèle.
- La fenêtre gauche contient 3 onglets pour les outils, les capsules et l'information.
- L'onglet «visualisation d'information» dans la fenêtre objet fournit une information détaillée sur BondPad. Si l'on clique sur l'onglet «outils», plusieurs outils de dessin et d'édition sont affichés sous forme de liste. Si l'on clique sur «capsule», des capsules listées sous plusieurs groupes s'affichent. On peut même sélectionner et incorporer des capsules dans le modèle.

4.2.2 Le module du simulateur (interface de simulation)

Le module du simulateur permet de résoudre les équations dynamiques. C'est le module dans lequel les utilisateurs peuvent intervenir pour la simulation. La fenêtre du simulateur est montrée par :



FIGURE 4.2 – Fenêtre du simulateur

Le point d’entrée du simulateur est le fichier de définition de module (fichier.sym) généré à partir du module (Bond Pad). Ce fichier doit être compilé pour créer un fichier d’expérimentation du simulateur. Une fois la compilation démarrée, l’état de compilation, les messages d’erreurs et d’avertissement sont affichés par la fenêtre de compilation comme le montre la Figure 4.3.



FIGURE 4.3 – Fenêtre de compilation

Après la compilation, il faut passer par trois étapes pour tracer les courbes de simulation :

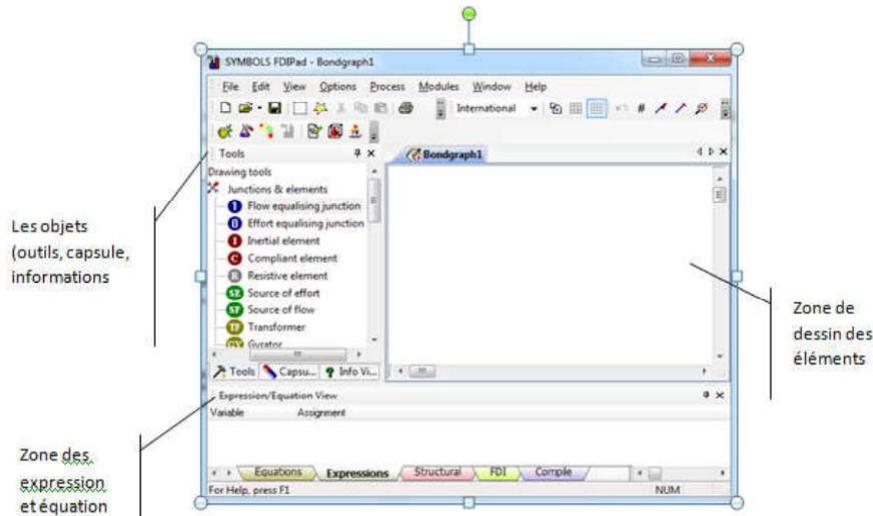
- Affecter les valeurs des composants.
- Affecter les valeurs initiales et les valeurs finales des courbes de simulation.
- Appuyer sur la commande “START” pour faire la simulation.

4.2.3 Le module de commande “Controls”

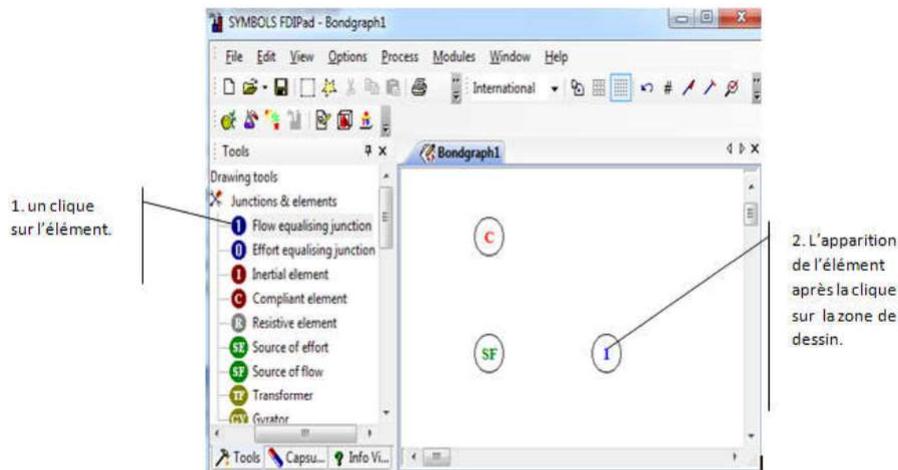
Le logiciel SYMBOLS contient aussi un module de commande “Controls” (outil d’analyse théorique de commande) qui consiste à effectuer l’analyse des systèmes linéaires continus ou discrets. Dans ce module le système étudié doit être décrit par sa fonction de transfert ou par son modèle d’état.

4.2.4 Le module “FDIPad”

Le dernier module “FDIPad” (constructeur de modèles graphiques pour le FDI) quatrième module qu’un utilisateur rencontre. L’objectif principal de cet outil est de décrire le comportement du processus, d’analyser ses propriétés structurelles, de dériver symboliquement les relations de redondance analytique (ARR) et de générer les signatures de défaut. La sortie de cet outil est destinée à la mise en œuvre en temps réel de l’ARR symbolique pour le calcul résiduel et des signatures de défaut pour la formulation des algorithmes de détection et d’isolation des défauts (FDI).



L'accès aux éléments du SYMBOLS est simple, avec un seul clique sur l'icône d'élément souhaitable on sort ce dernier et on le met où on veut, évidemment sure la zone de dessin exprimé comme montré sur la figure :



4.3 Création et Incorporation des Capsules sous Symbols

L'outil bond graph permet la décomposition d'un système complexe en système beaucoup plus simple qui vont être appelé bond graph a mot. Dans ce but, les éléments constitutifs simplifiés en génie électrique ont été introduits sous forme de capsules dans le logiciel Symbols. Les capsules sont des sous système d'un modèle beaucoup plus simple pour l'interprétation et pour la lisibilité du modèle.

4.3.1 Caractéristiques des capsules

SYMBOLS permet la création de capsules avec les caractéristiques suivantes :

- Une capsule peut être incorporée dans un modèle avec un nombre quelconque d'occurrences.
- Une capsule peut en contenir d'autres.
- Une capsule doit être complète, c'est à dire les paramètres de ses é constitutives non linéaires doivent être décrits soit directement par des expressions ou par des appels de fonction de la bibliothèque.

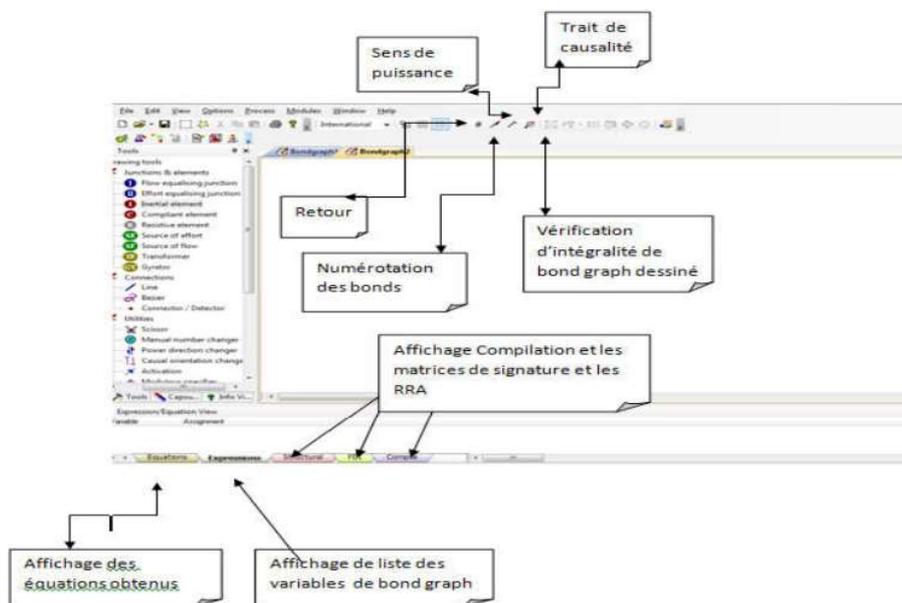
- La numérotation des capsules est faite selon la direction du transfert d'énergie.
- La modélisation acausale est effectuée par le biais de capsules génériques. Ces capsules représentent les différents choix de causalités possibles. Lors de l'implantation dans le modèle, la capsule adéquate est insérée.

La procédure de construction d'un modèle sur SYMBOLS 2000

La procédure de construction d'un modèle sur SYMBOLS SHAKTI commence par :

- La réalisation d'un modèle acausal,
- puis les arcs sont numérotés pour faire référence aux efforts et flux qui les traversent.
- Ensuite, les causalités sont affectées.

S'il existe des incohérences dans les relations de causes à effets, un message d'erreur s'affiche sur l'écran, sinon le message indiquera qu'il n'y a aucune erreur et que le modèle est causalement correct.



La présence de boucles algébriques est signalée par des warning. Pour résoudre numériquement les boucles algébriques, SYMBOLS SHAKTI propose deux méthodes, et c'est l'utilisateur qui choisit la méthode appropriée à son application. Une fois les équations générées, les paramètres et les sources modulées par des équations non linéaires sont spécifiées dans la fenêtre «Expressions» avec des notations du langage C++. Sur SYMBOLS SHAKTI, le modèle d'un système peut être représenté sous forme d'une interconnexion de plusieurs sous-modèles appelés capsules, qui figurent dans une fenêtre spécifique appelée également Capsules. L'avantage qu'offre SYMBOLS SHAKTI pour la modélisation LFT (transformation fractionnelle linéaire) est la possibilité de définir des variables internes (effort et flux) comme des variables globales par un double clic sur l'arc correspondant, puis de les utiliser pour moduler des sources d'effort ou de flux. Ces dernières constitueront les entrées fictives ω_i du modèle LFT. Les sorties fictives D_e et D_f n'apparaissent pas explicitement sur le modèle, mais apparaissent implicitement dans la fenêtre Expressions, et sont égales aux variables internes (effort-flux) définies comme des variables globales.

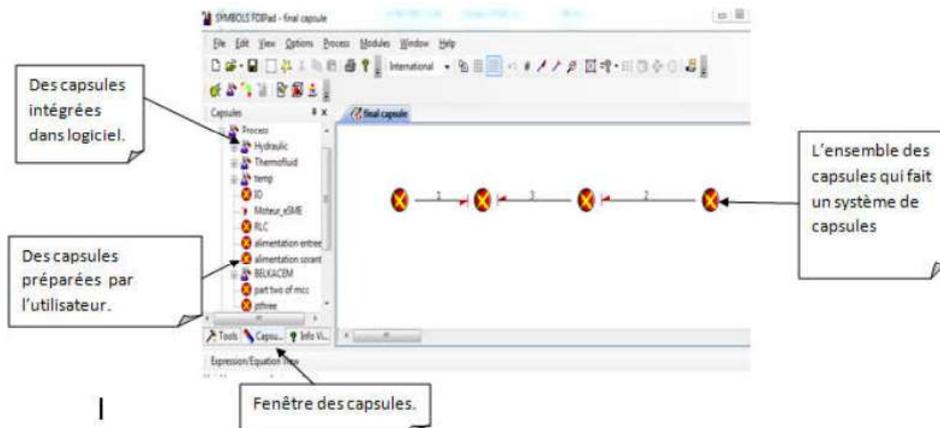
Caractéristiques principales du logiciel Symbols

Les caractéristiques principales du logiciel Symbols sont les suivantes :

- Deux niveaux d'interconnexion sont pris en compte : le niveau des équations et le niveau graphique et Structurel. Adapter la causalité (en ajoutant ou en supprimant des capteurs, composants,... etc.).
- Détecte et localise les défaillances dans le modèle.
- Facilite le regroupement des sous modèles pour construire de nouvelles classes de composants.

Génération automatique des RRAs robustes

L'interface FDIPad est spécifiée à la réalisation de modèles pour la génération des RRAs. Le modèle global doit être une interconnexion de capsules(notre application de ce mémoire consiste à faire cette partie), où aucun élément bond graph ou source ne doit apparaître(il apparait juste les capsules) car chaque capsule du modèle est analysée indépendamment des autres.



La première étape dans la génération des RRAs robustes sur FDIPad consiste à créer une boîte à outil pour les systèmes incertains, en réalisant de nouvelles capsules ou en modifiant les capsules déjà existantes en déterministe. La partie incertaine d'une RRA peut être facilement distinguée de la partie nominale en spécifiant une étiquette aux entrées fictives correspondant aux incertitudes paramétriques. Si la lettre w est consacrée exclusivement à la désignation des entrées fictives sur le modèle LFT dans l'étape de modélisation, alors la somme des w_i constitue la partie incertaine de la RRA.

Prenons l'exemple d'un système thermofluide construit à partir de capsules déjà réalisées pour le génie des procédés. Le système est constitué d'une cuve d'eau connectée à une pompe, le fluide est ensuite pompé vers le milieu extérieur. Le système est instrumenté par deux capteurs : un capteur de pression sur la cuve et un capteur de débit massique à la sortie de la pompe. Le modèle bond graph déterministe du système est une interconnexion de capsules représentant les modèles bond graph déterministes de la cuve, la pompe commandée en tout-ou-rien et l'environnement. Le système est en réalité complexe, car il met en jeu deux phénomènes couplés (thermique et fluidique). Il est caractérisé par deux variables d'état : la masse et l'énergie interne stockée par la cuve. L'équation d'état est non linéaire et l'utilisation de l'espace de parité ou des observateurs pour le diagnostic n'est pas triviale.

Possibilités de symbols bondPad

- Dessin d'un modèle bond graph.
- Augmentation d'un modèle par énumération des bonds, assignation de la direction de puissance, causalité, modulo 2 d'élément port, activation de bonds,...

- validation du bond graph. L'intégrité de bond graph est validée après la création du modèle.
- Création des observateurs non intégrés sous forme de détecteurs.
- Génération d'équation et affichage dans une palette simple.
- Création des expressions.
- Génération de code programme.
- Création des modèles de sous ensemble comme capsules et incorporation des capsules dans un modèle de bond graph.
- Diagnostic de défauts.
- Addition facile de gestionnaires.
- Exportation du modèle à l'environnement Matlab/simulink.

Application : Conception d'un système de supervision d'un moteur courant continue

→ **Représentation d'état du système**

Pour obtenir les équations d'état pour un tel système à partir d'un modèle bond graph il faut suivre une procédure après avoir réglé le problème de causalité. On a procédé de la manière suivante :

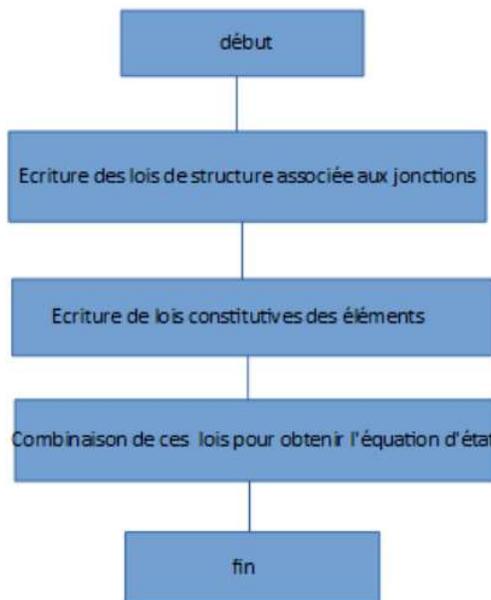


FIGURE 4.4 – étapes d'obtention des équations de système

→ **Construction du modèle étudié**

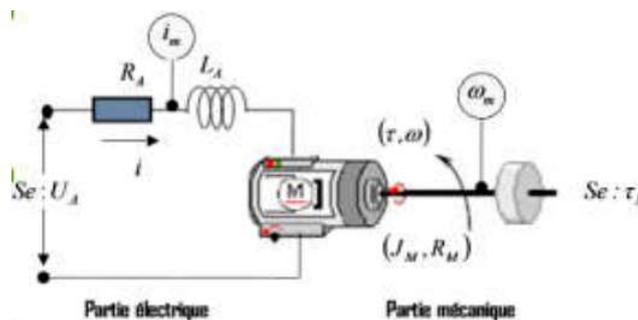


FIGURE 4.5 – moteur à courant continu

- Pour la partie électrique : Une source d'effort «SE : U», qui alimente l'induit . La résistance «R : Ra» et l'inductance «I : Ia» de l'induit sont en série et elles sont portées sur une jonction «1».
 - Pour la partie mécanique : Le frottement, est présenté par l'élément «R : RM», l'inertie par «I : JM» et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc «RM, JM» ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction n° 1 z avec le couple «Se : τ_p ».
- Si le moteur est couplé à une charge, cette dernière applique sur le moteur un couple résistant, donc on met source effort «Se : τ_p », pour présenter le couple résistant qui représente la charge.
- Pour l'excitation : Le gyrateur «GY» qui représente le moteur il reçoit le signal de commande de l'induit , le gyrateur transformer l'effort en flux, notre cas de moteur la tension dans la partie électrique devient une vitesse dans partie mécanique.

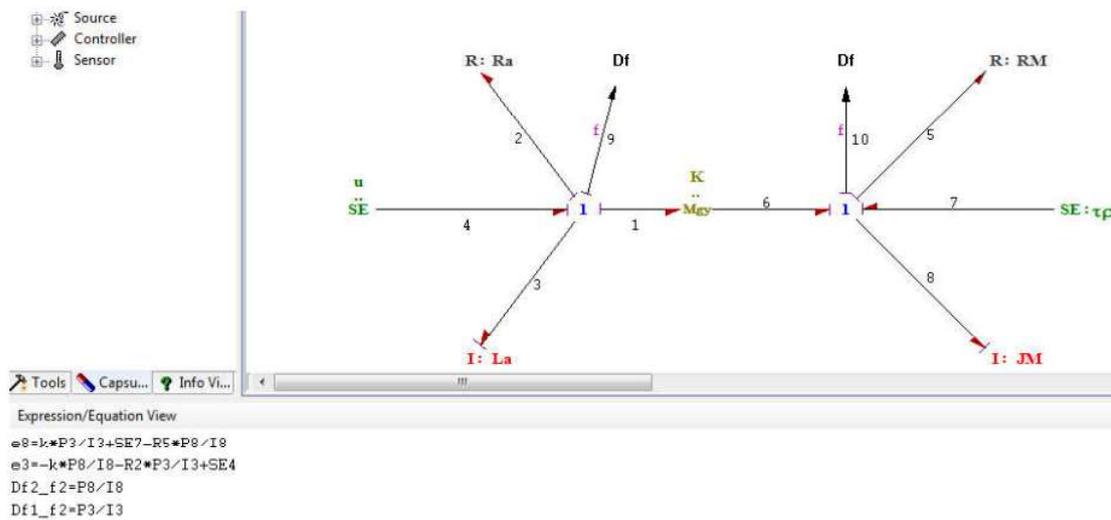


FIGURE 4.6 – Modèle bond graph du moteur à courant continu

→ Les équations d'état

Le modèle d'état issu d'un bond graph a une forme parfaitement définie, puisque les variables d'état sont fixées de manière systématique. La méthode la plus directe qui conduit au résultat sans difficulté.

Vecteur d'état :

- les variables d'état sont les variables d'énergie associés aux éléments I et C :
- le vecteur d'état n'apparaît pas sur le bond graph, mais seulement sa dérivée.
- Les variables d'état ont un sens physique, ce qui permet d'utiliser le modèle d'état issue du bond graph comme observateur dans le cas où certains variables d'état utilisé dans une commande par retour d'état ne sont pas mesurables.
- Si tous les éléments I et C sont en causalité intégrale, alors la dimension de x donne l'ordre du modèle.
- Si I et C sont en causalité dérivé, alors le vecteur x se décompose en xi de dimension ni (i : intégrale), et xd de dimension nd (d : dérivé).

► Écriture des lois structurelles associées aux jonctions

- Jonction 1 : $f_4 = f_2 = f_1 = f_3, e_4 = e_2 + e_1 + e_3.$
- Gyrateur : $e_1 = r * f_6, e_6 = r * f_1.$
- Jonction 1 : $f_4 = f_2 = f_1 = f_3, e_6 = -e_7 + e_8 + e_5.$

► Écriture des lois constitutives des éléments

- $e_4 = e_2 + e_1 + e_3.$
 - $e_6 = -e_7 + e_8 + e_5.$
 - $e_4 = U, f_4 = \dot{q}_1.$
 - $e_2 = R_a * f_2, f_2 = \dot{q}_1.$
 - $e_3 = \dot{p}_1(t), f_3 = \dot{q}_1.$
 - $e_5 = R_M * f_5, f_5 = \dot{q}_2.$
 - $e_8 = \dot{p}_2(t), f_8 = \dot{q}_2.$
 - $e_7 = \tau_\rho, f_7 = \dot{q}_2.$
 - $e_1 = r * f_6, f_6 = \dot{q}_2.$
 - $e_6 = r * f_1, f_1 = \dot{q}_1.$
 - $e_3 = L_a * \frac{df_3}{dt} \Rightarrow f_3 = \frac{1}{L_a} \int e_3(t)dt = \frac{1}{L_a} p_1(t).$
 - $e_8 = J_M * \frac{df_8}{dt} \Rightarrow f_8 = \frac{1}{J_M} \int e_8(t)dt = \frac{1}{J_M} p_2(t).$
 - $\dot{p}_1(t) = e_3 = U - \frac{R_a}{L_a} * p_1(t) - \frac{r}{J_M} * p_2(t).$
 - $\dot{p}_2(t) = e_8 = \tau_\rho - \frac{r}{L_a} * p_1(t) - \frac{R_M}{J_M} * p_2(t).$
- $$\begin{pmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-r}{J_M} \\ \frac{r}{L_a} & \frac{-R_M}{J_M} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \tau_\rho \end{pmatrix}$$

Les sorties de système sont :

$$Y = \omega_m = f_4 = \frac{1}{J_M} * p_2(t) \rightarrow y = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{J_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}$$

$$Z = i_a + \omega_m = \frac{1}{L_a} * p_1(t) + \frac{1}{J_M} * p_2(t) \rightarrow z = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_a} & \frac{1}{J_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}$$

Tel que : Y regroupe les variables de sorties à commander sous forme d'efforts et de flux, composés de variables mesurées, les variables non mesurées (représentés sur le bond graph par De et Df). Z regroupe les mesures disponibles à partir de capteurs d'efforts et de flux (représentées sur le bond graph par De et Df).

Alors la représentation d'état de système est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-r}{J_M} \\ \frac{r}{L_a} & \frac{-R_M}{J_M} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \\ y = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{J_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \\ z = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_a} & \frac{1}{J_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

- Tel que : $x_1 = p_1, x_2 = p_2$: les états de système
- $u = Ua$: entrée effort de système
- $d = \tau_\rho$: c'est une perturbation
- y, z : les sorties.

4.3.2 Définition des (P&ID)

P&ID (Piping and Instrumentation Diagrams) appelée la définition des Plans des Instruments Détaillés ou diagrammes d'acheminement et d'instrumentation. Il comprend les outils d'agencement général destinés au positionnement et à la localisation des équipements, à la

création et la gestion des lignes d'acheminement et à la création et la gestion des boucles d'instrumentation et de contrôle. Ce diagramme est utilisé pour une description visuelle de l'architecture du processus. Il utilise (selon des normes ISO) des symboles pour représenter les composants technologiques et des lignes pour leur connexion. Les entrées et sorties peuvent représenter des courants et des tensions, pour les composants technologiques et des flux d'information pour les capteurs et les correcteurs.

4.3.3 Étude Structurale

Approche structurale en bond graph

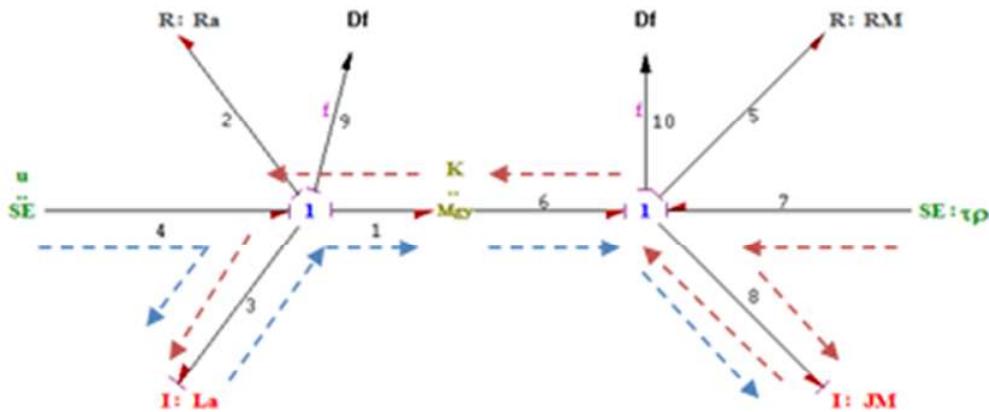
Le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle est noté BGI et le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle BGD. Dans le modèle BGI, tous les éléments I et C sont supposés en causalité intégrale.

Commandabilité structurale

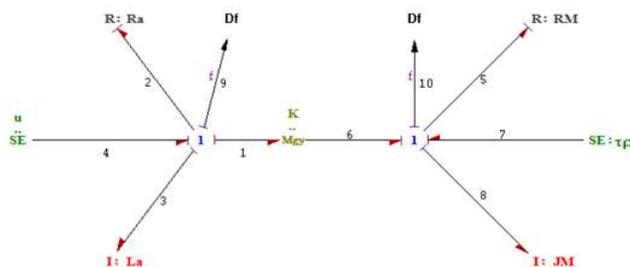
Pour effectuer le calcul de lois de commande d'un processus, il est de nécessaire de s'intéresser aux propriétés de commandabilité et d'observabilité du modèle d'état. Car cette démarche d'analyse suppose que la commande apparait uniquement comme modulation d'élément R, par exemple.

Un modèle bond graph est dite structurellement commandable en état si et seulement si les deux conditions suivant sont vérifier :

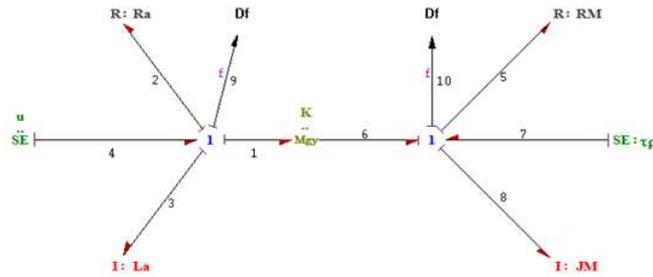
1. sur le modèle bond graph BGI, il existe un chemin causal entre tous les éléments dynamique I et C en causalité intégrale et une source de commande MSE et MSF.
2. Tous les éléments dynamiques I et C admettent une causalité dérivée sur le modèle bond graph BGD. Si les éléments dynamique restent en causalité intégrale, la dualisation de sources de commande MSE et MSF doit permettre de les mettre en causalité dérivé.



Pour notre application sur le MCC : la condition 1 est vérifier.
 Le modèle bond graph en dérivé préférentielle est :



Et par la dualisation de MSe et Se on obtient le modèle BGD suivant :

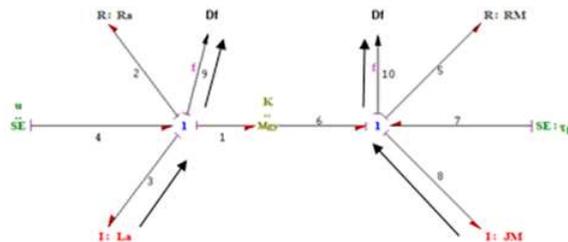


Alors la condition 2 est vérifier donc le modèle bond graph est structurellement commandable.

Observabilité structurelle :

Un modèle bond graph est observable en état si et seulement si les conditions suivant sont respectées :

1. Sur le modèle BGI, il existe un chemin causal entre tous les éléments dynamique I et C en causalité intégrale et un détecteur De ou Df.
2. Tous les éléments dynamiques et C admettent une causalité dérivée sur le modèle bond graph BGD. Si des éléments I et C restent en causalité intégral, la dualisation de détecteur De et Df doit permettre de les mettre en causalité dérivé.



Alors la la condition 1 est vérifier. Et d'après le modèle BGD qui précède l'élément dynamique I admet une causalité dérivé, donc la condition 2 est vérifier.

Donc le modèle est observable.

4.3.4 Diagnostique par bond graph du moteur

Le but est de démontrer comment distinguer les variables surveillables et des non surveillables à partir d'un modèle bond graph avant même de générer les relations de redondance analytique.

L'idée est de voir comment se manifeste une proportionnalité les colonnes sur le modèle bond graph.

L'ensemble des contraintes pour le moteur est déduit directement du modèle bond graph :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{J1E} : -U_L + U_A - U_R - U_e = 0 ; i_R = i_e = i_l = i_A \\ C_{RA} : U_R - R_A * i_A = 0 \\ C_{LA} : U_L - L_A * \frac{d}{dt} i_A = 0 \\ C_{GY2} : J_L - K_e * i_{AL} = 0 \\ C_{J1M} : -\tau_1 + \tau_e - \tau_r - \tau_L = 0 ; \omega_R = \omega_e = \omega_l = \omega \\ C_{GY1} : U_e - K_e * \omega = 0 \\ C_{Rm} : \tau_R - R_M * \omega = 0 \\ C_{Jm} : \tau_l - J_M * \frac{d}{dt} \omega = 0 \\ C_{m1} : i_A = i_m \\ C_{m2} : \omega = \omega_m \\ C_{d1} : z_1 = \frac{d}{dt} i_A \\ C_{d2} : z_2 = \frac{d}{dt} \omega \end{array} \right.$$

Auxquelles sont ajoutées les contraintes de dérivation :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{d1} : z_1 = \frac{d}{dt} i \\ C_{d2} : z_2 = \frac{d}{dt} \omega \end{array} \right.$$

Génération matrice d'incidence :

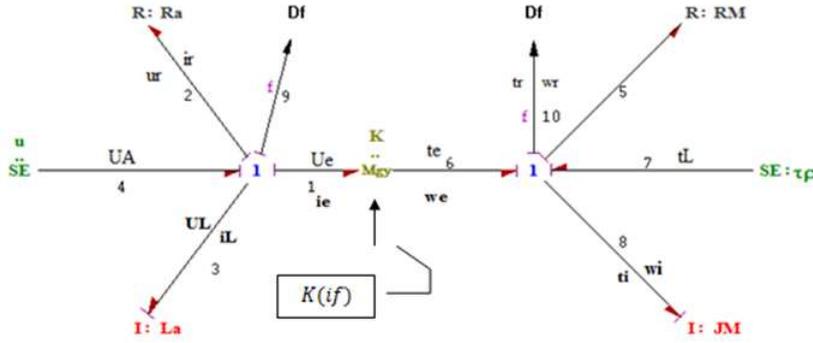
Con/var	U_L	U_R	U_e	τ_e	τ_R	τ_l	i_A	ω	i_m	ω_m	Z_1	Z_2	U_A	τ_L
C_{J1E}	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C_{RA}	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C_{LA}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C_{GY2}	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C_{J1M}	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
C_{GY1}	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
C_{Rm}	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
C_{Jm}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
C_{m1}	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
C_{m2}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
C_{d1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C_{d2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Les variables connues et inconnue déduites de modèle bond graph du moteur sont :

$$X = \{U_R, i_R\} \cup \{U_L, i_L\} \cup \{U_e, i_e\} \cup \{\tau_i, \omega_i\} \cup \{\tau_R, \omega_R\}$$

$$K = \{i_m, \omega_m\} \cup \{U_A, \tau_L\}$$

Aux variables inconnue sont ajoutées les variables z_1 et z_2 .



L'équation de structure issue de la jonction 1 de la partie électrique est :

$$C_{J1E} : -U_L + U_A - U_R - U_e = 0$$

Les variables U_L, U_A, U_R, U_e sont inconnue. Elles seront éliminées sur le graph parcourus de chemin causal de la variable inconnue à une variable connue (capteur ou source d'énergie) comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_A \rightarrow MSe \\ U_R \rightarrow C_{RA} \rightarrow i_R \rightarrow C_{m1} \rightarrow SSf: i_m \\ U_L \rightarrow C_{LA} \rightarrow Z_1 \rightarrow C_{d1} \rightarrow i_L \rightarrow C_{m1} \rightarrow SSf: i_m \\ U_e \rightarrow C_{GY1} \rightarrow \omega_e \rightarrow C_{m2} \rightarrow SSf: \omega_m \end{array} \right\}$$

On génère la première RRA en remplaçant dans l'équation de jonction les variables inconnues par leurs expressions :

$$RRA = MSe - L_a * \frac{di_m}{dt} - K * \omega_m$$

On passe à la jonction suivante :

$$C_{J1M} = -\tau_1 + \tau_e - \tau_r - \tau_L = 0$$

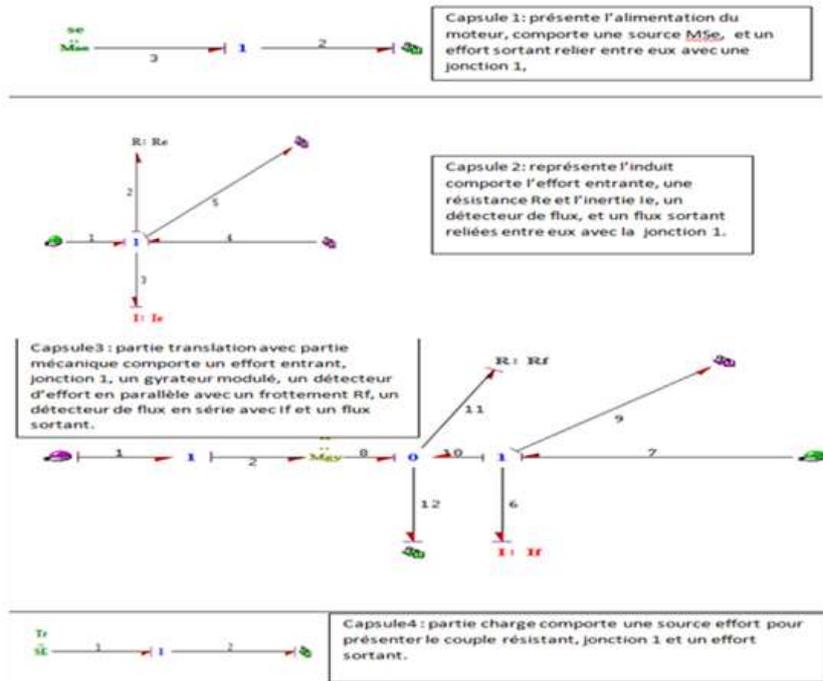
La même procédure conduit à la RRA suivante :

$$RRA2 = -Se - F_{RM}(\omega_m, R_M)^{-1} - J_M * \frac{d\omega_m}{dt} + K * i_m$$

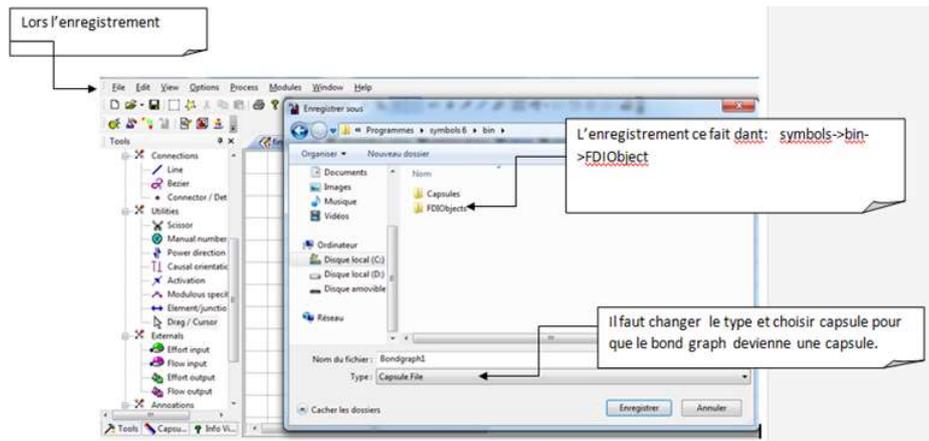
Si la seconde RRA est indépendante (signature différente) de la première, alors elle est gardé, sinon elle est rejetée.

4.4 Les étapes de création des capsules de notre application sur le MCC

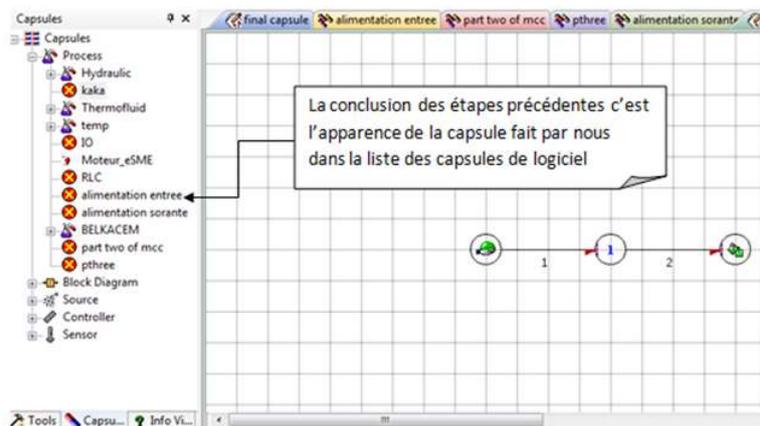
Dans FDIPad toute l'analyse est effectuée sur BG transformé en capsules (déjà existantes ou nouvellement créés), dans ce qui suit, utilisons notre application du moteur on va détaillée comment on a crée les capsules qui sont pas existant. On a divisé le moteur en quatre sous système comme il est montré ci dessous (la réalisation ce fait par FDIPad avec la zone de Tools).



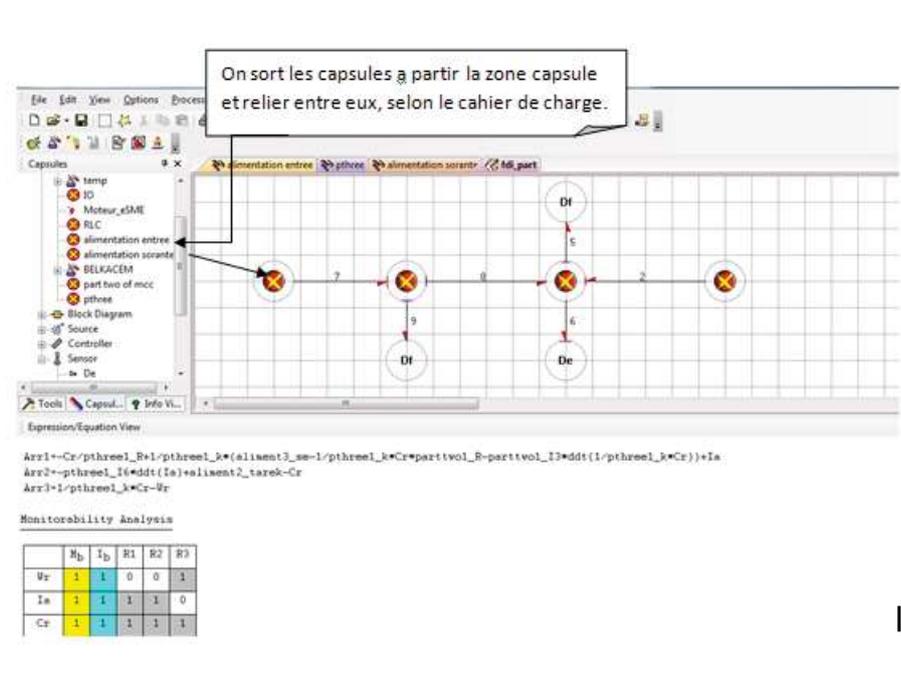
Après la schématisation on saute vers l'étape d'enregistrement qui est la plus important étape File->save as->symbols->bin->FDIObject.



Cet enchainement d'étapes suivis, nous a pris vers la construction d'une capsule comme il est montré dans la figure.



Nous avons procédé de la même façon pour la construction des autres capsules. Après le sort de tous les capsules nécessaire pour la construction d'un moteur, on passe par même algorithme (numérotation ->sens de puissance →causalité->vérification d'intégration).
 Application 2 :



4.5 Application 2 : simulation du moteur courant continue à excitation série, séparé, shunte

4.5.1 Moteur à excitation série

- Inducteur en série avec induit et alimenté par la même source de tension.
- Le courant d'induit est le courant d'excitation $I = I_e$, r : résistance inducteur et R : résistance induit.
- Trois caractéristique décrivent le moteur série :
 1. démarrage fréquent avec couple élevé, couple diminuant avec la vitesse.
 2. ne jamais faire fonctionner le moteur série à vide car $I = 0 \Rightarrow$ la vitesse de rotation $\Omega(rad/s)$ tend vers l'infini.
 3. toujours mettre le moteur en charge mécanique car si le couple C est faible, alors la vitesse de rotation $\Omega \rightarrow$ l'infini.

Pour la partie électrique

- Une source d'effort «SE : U_a », qui alimente l'induit et l'inducteur.
- L'inducteur lui aussi est constitué d'une résistance «R : R_e » et une inductance «I : I_e » en série et elles sont portées sur une jonction «1».
- La résistance «R : R_a » et l'inductance «I : I_a » de l'induit sont en série et elles sont portées sur une jonction «1».

Pour la partie mécanique

Le frottement, est présenté par l'élément «R», l'inertie par «I» et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc «R, I» ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction «1» avec le couple «Se : Tr».

Pour l'excitation

Le gyrateur «GY» qui représente le moteur reçoit le signal de commande de l'induit à travers la flèche pleine.

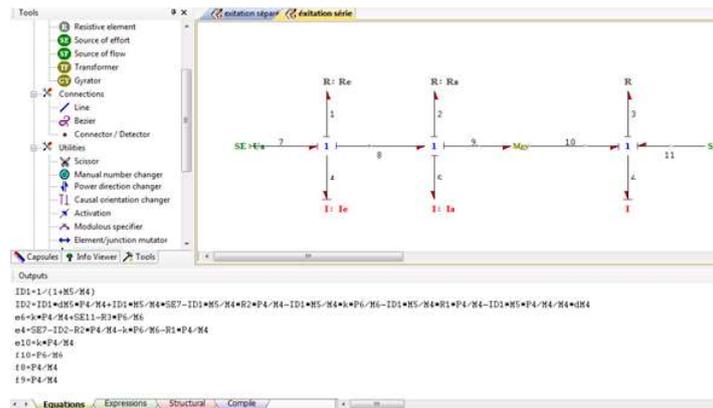


FIGURE 4.7 – Modèle bond graph du MCC à excitation série avec les équation

Après une compilation sans erreurs, on passe à la simulation dans le “simulator”, on doit remplir les valeurs des paramètres et suivre l'enchaînement montré dans la figure ci dessous :

1
2

Parameters			Initial values		
Name	Value	Comment	Vector	Value	Comment
<input type="checkbox"/> re (double)	750	re	Y[0]	0.00	P6
<input type="checkbox"/> ra (double)	2.4	ra	Y[1]	0.00	P4
<input type="checkbox"/> r (double)	0.01	r			
<input type="checkbox"/> ie (double)	44.63	ie			
<input type="checkbox"/> ia (double)	0.44	ia			
<input type="checkbox"/> k1 (double)	0.14	k1			
<input type="checkbox"/> ua (double)	220	ua			
<input type="checkbox"/> tr (double)	2.5	tr			
<input type="checkbox"/> i (double)	0.08	i			
<input checked="" type="checkbox"/> dM5 (double)	0.00	dM5			
<input checked="" type="checkbox"/> dM4 (double)	0.00	dM4			

3
4

Online plot

Plot Blocks

- Horizontal 0 for Time
 - Auto Scale True
 - Minimum 0.00
 - Maximum 0.00
- Vertical 1 User[0] : e10
 - Auto Scale True
 - Minimum 0.00
 - Maximum 0.00
 - Color 0; 0; 0
- Vertical 2 User[1] : f10
 - Auto Scale True
 - Minimum 0.00
 - Maximum 0.00
 - Color 255; 0; 0
- Vertical 3 User[2] : f8
 - Auto Scale True
 - Minimum 0.00
 - Maximum 0.00
 - Color 0; 192; 0
- Vertical 4 User[3] : f9
 - Auto Scale True
 - Minimum 0.00
 - Maximum 0.00
 - Color 0; 0; 255

Simulation

Simulation Settings

- Time**
 - Start time 0.00
 - Final time 10.00
- Precision**
 - Steps 1
 - # Records 1024
 - Error limit 5.0E-2
- Method**
 - Runge-Kutta Gill
 - Properties Not Applicable

Le tableau regroupe les paramètres utilisés pour la simulation du moteur à excitation série.

Paramètres	Valeurs []
Se : U	220[V]
R : Ra	2.4 [Ω]
R : Re	750 [Ω]
R : f	0.01 [N. m. s/rd]
I : La	0.44 [H]
I : Le	44.63 [H]
I : J	0.08 [$kg.m^2$]
Se : tr	2.5 [N.m]

TABLE 4.1 – Paramètres du MCC à excitation série.

Sur la figure ci-dessous sont représentés les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation série (e10, f10, f8, f9).

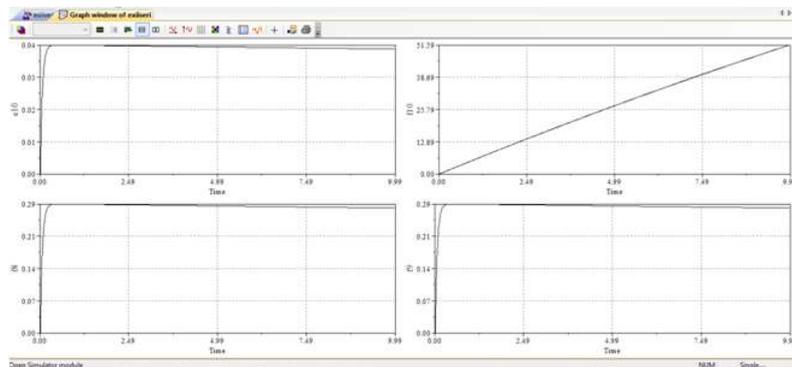


FIGURE 4.8 – Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation série

Interprétation 1 : On a mis un détecteur de flux qui va mesurer le flux qui sort de l'inducteur et entre dans l'induit (f8 représentant le courant d'inducteur), dans un intervalle de temps 10 ms, un détecteur de flux mesure le courant sortant de l'induit et entrant dans GY-RATEUR (le graph f9 représente courant d'induit). Un autre détecteur relève le flux et l'effort en même temps (e10 représente le couple moteur et f10 représente la vitesse de rotation).

4.5.2 Moteur à excitation séparé

- inducteur et induit sont alimentés par deux sources distinctes.
- les cas fréquent c'est où la tension d'excitation est constante qui sont équivalent à des moteurs à aimant permanent, dont le flux est constant.
- le moteur à excitation séparé fournit un couple important à faible vitesse.

Pour la partie électrique

- Sources d'efforts «SE : U» qui alimente l'induit.
- La résistance «R : Ra» et l'inductance «I : Ia» de l'induit sont en série et elles sont portées sur une jonction «1».
- Sources d'efforts «SE : Ue» pour alimenter l'inducteur.
- L'inducteur lui aussi est constitué d'une résistance «R : Re» et une inductance «I : Ie» en série, et portées sur jonction «1».

Pour la partie mécanique

Le frottement, est présenté par l'élément «R : f», l'inertie par «I : JM» et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc «f, JM» ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction «1».

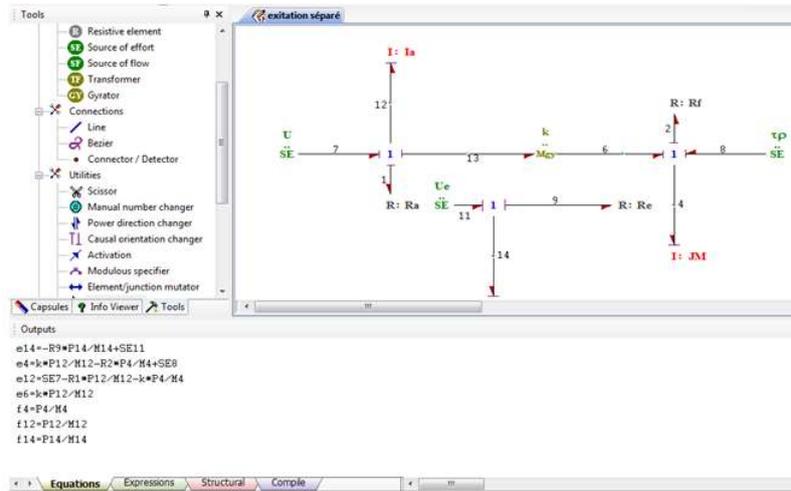


FIGURE 4.9 – Modèle bond graph du MCC à excitation séparé avec ses équation

Le tableau regroupe les paramètres utilisés pour la simulation du moteur à excitation séparé.

Paramètres	Valeurs []
Se : U	220 [v]
R : Ra	2.4 [Ω]
R : Re	750 [Ω]
R : f	0.01 [N. m. s/rd]
I : La	0.44 [H]
I : Le	44.63 [H]
I : J	0.08 [$kg.m^2$]
Se : Ue	220 [v]
Se : tr	2.5 [N.m]

TABLE 4.2 – Paramètres du MCC à excitation séparé

Sur la figure ci-dessous sont représentés les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation séparé (e6, f6, P4, P12).

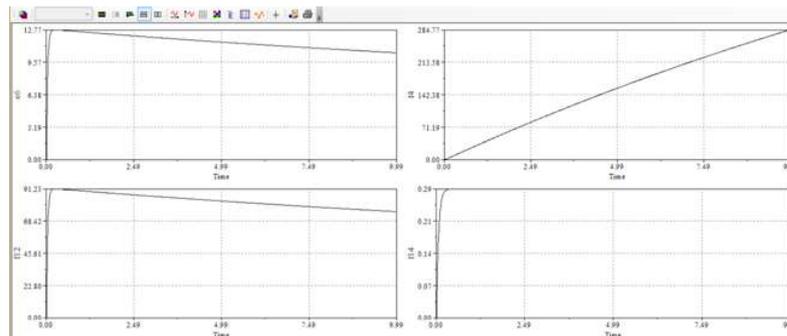


FIGURE 4.10 – Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée

On a mis un détecteur de flux qui mesurant le flux sortant de l'inducteur et entrant dans l'induit (f14 représentant le courant d'inducteur), dans un intervalle de temps 10 ms, un détecteur de flux mesurant le courant sortant de l'induit et entrant dans GYRATEUR (le graph f12 représente courant d'induit). Un autre détecteur relève l'effort en même temps (e6 représente le couple moteur), un détecteur de ux dans la partie mécanique (f4 représente courant de frottement).

4.5.3 Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation shunte

- Induit et inducteur sont connectés en parallèle et alimentés par une seul source.
- Le couple est constant quelque soit la charge.

Pour la partie électrique

- Une source d'effort «SE : U», qui alimente l'induit et l'inducteur.
- une jonction «1» qui porte La résistance «R : Ra» et l'inductance «I : Ia» de l'induit qui sont en série.
- Une jonction «1» qui porte les deux éléments qui constitue l'inducteur, la résistance «R : Re» et l'inductance «I : Ie» qui sont en série.
- L'induit et l'inducteur sont en parallèle, donc une jonction «0» qui relie les deux jonctions «1» précédentes.

Pour la partie mécanique

Le frottement, est présenté par l'élément «R : f», l'inertie par «I : J» et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc «f, J» ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction «1».

Pour l'excitation

Le gyrateur «GY» qui représente Le moteur reçoit le signal de commande de l'induit à travers la flèche pleine. En suivant les étapes précédentes pour modéliser le moteur à courant continu à excitation shunte, Pour éviter ce conflit on était obligé d'ajouter un élément «R : R» porté sur une jonction «1», cette élément représente une faible résistance due au câble reliant la source au circuit ou parvient de la protection interne de la source.

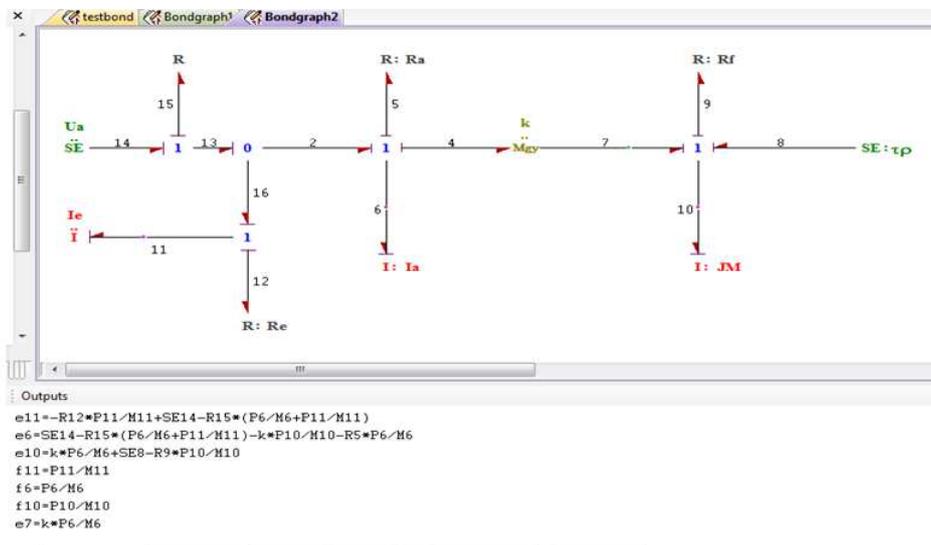


FIGURE 4.11 – Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (sans conflit)

Les paramètres utilisés pour la simulation du moteur à excitation shunte sont :

Paramètres	Valeurs []
Se : U	220[v]
R : Ra	2.4 [Ω]
R : Re	750 [Ω]
R : f	0.01 [N. m. s/rd]
I : La	0.44 [H]
I : Le	44.63 [H]
I : J	0.08 [$kg.m^2$]
Se : tr	2.5 [N.m]

TABLE 4.3 – Paramètres du MCC à excitation shunte

Sur la figure ci-dessous sont représentés les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation shunte (f6, f11).

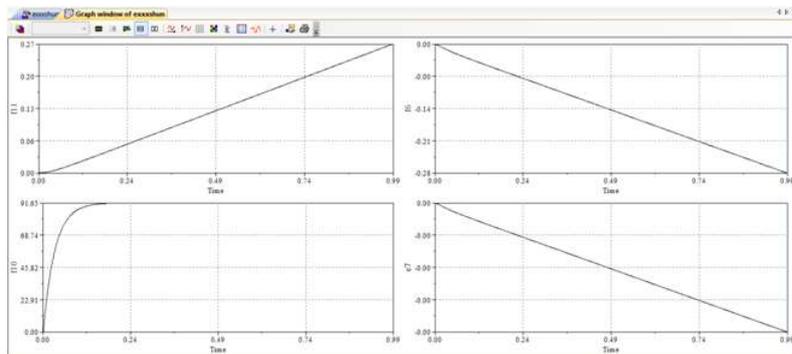


FIGURE 4.12 – Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (sans conflit)

On a met un détecteur de flux mesurons le flux qui sort de l'inducteur et entre dans l'induit (f11 représentant le courant d'inducteur), dans un intervalle de temps 10 ms, un détecteur de flux mesure courant sortant de l'induit et entrant dans GYRATEUR (le graph f6 représente courant d'induit). Un autre détecteur relève l'effort en même temps (e7 représente le couple moteur), un détecteur de flux dans la partie mécanique (f10 représente courant de frottement).

CONCLUSION

A partir de ces résultats, nous constatons que l'approche bond graph est très fiable dans le domaine de modélisation car elle est simple et ne prend pas compte des équations mathématiques parfois inconnues et surtout qu'elle nous fait gagner beaucoup de temps. Ce chapitre consiste en une étude analytique du logiciel de modélisation de SYMBOLS, comportant ses utilisations, ses avantages et ses inconvénients. Les progrès technologiques de pointe nécessitent de se développer du jour en jour, ainsi que leurs applications dans différents secteurs, notamment le secteur de l'industrie. On a constaté de ce chapitre que logiciel SYMBOLS est un logiciel de modélisation, d'analyse, de contrôle de différents systèmes et de simulation, mais qui répond partiellement aux besoins des exigences technologiques. Nous avons détaillé l'utilité pour les capsules parce que elle sont nécessaire pour le diagnostic des système.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire nous avons présenté une nouvelle approche intégrée pour la supervision. Nous avons utilisé un seul outil pour la modélisation, la génération des indicateurs de défaillances, l'analyse de la surveillabilité et le placement de capteurs en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance.

Dans le premier chapitre on a montré les critères principaux de classification des méthodes de surveillance qui sont basés sur le type de la connaissance, on a distingué deux types d'approches : les méthodes avec ou sans modèle. Utilisant l'outil bond graph, nous avons rappelé l'approche qualitative et l'approche quantitative pour la surveillance des systèmes physiques. Dans le deuxième et troisième chapitre on a essayé d'éclairer les concepts de bond graph et l'utilisation de cet outil en vue de la modélisation, de la détection et de la localisation des défauts dans les systèmes hydrauliques vient de paraître très efficace du fait de sa simplicité et de ses supports de modélisation et de simulation. Notre contribution concerne une méthode à base du modèle Bond graph, la génération des relations de redondance analytiques (résidus), l'analyse de la surveillabilité et l'isolabilité des fautes.

La génération des relations de redondances analytiques (RRAs) par l'approche bond graph présente quelques caractéristiques intéressantes : elles sont simples à comprendre, puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph image du processus physique, ces relations sont déduites directement de la représentation graphique, elles peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique.

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et causales d'une part et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est donc introduit en génie des procédés pour l'analyse et la surveillance des processus. Cet outil, par ses aspects génériques, permet la mise en place d'un outil logiciel pour l'automatisation des procédures diminuant le coût de la conception des systèmes de surveillance.

Dans ce travail, nous avons modélisé un système électrique qui est le moteur à courant continu avec une source d'effort comme source d'entrée et une charge comme sortie.

Nous avons généré le modèle dynamique, spécifié des indicateurs de fautes et calculer la matrice de signatures des fautes par une interface conviviale et un menu approprié Symbols Shakti. Nous avons utilisé des capsules pour chaque parties de notre système et grâce à ce modèle nous avons obtenu les relations de redondance analytique.

RÉFÉRENCES

- [1] D. M. Johnson. A review of fault management techniques used in safety-critical avionic systems. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(5) :415431, 1996.
- [2] P. Goupil. Airbus state of the art and practices on FDI and FTC. In *Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Barcelona, Spain, pages 564572, 2009.
- [3] X. Olive. FDI(R) for satellite at Thales Alenia Space : how to deal with high availability and robustness in space domain ? In *Proceedings of the IEEE Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, SysTol10*, Nice, France, pages 837842, 2010.
- [4] M. Basseville and I. V. Nikiforov. *Detection of Abrupt Changes : Theory and Application*. Prentice Hall Englewood Clis, NJ, 1993.
- [5] S. X. Ding. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques : Design Schemes, Algorithms, and Tools* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] A. S. Willsky. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatic*, 12(6) :601611, 1976.
- [7] M. Kinnaert. Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems-a tutorial. In *Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Washington D.C., USA, pages 3750, 2003.
- [8] Perrin et al .., 2004. *Automatique et informatique industrielle : Bases théoriques, méthodologiques et techniques*, Nathan Technique.
- [9] Valette et al .., 1989. "Monitoring manufacturing systems by means of Petri nets with imprecise markings", dans *IEEE Conference Intelligent Control*, NY, p. 233238.
- [10] Combacau et al .., 2000 ; Boufaïd, 2003. "Réflexions sur la terminologie : Surveillance - supervision", Groupement pour la recherche en Productique, Systèmes de Production Sûrs de Fonctionnement.
- [11] Chow, E. et A. Wilsky. 1984, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems", *IEEE transactions on Automatic and Control*, vol. 29, no7, p.603614.
- [12] SALOWA METHANI, 2012. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. *Automatique / Robotique*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f
- [13] Sobhani-Tehrani et khorasani, 2009. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. *Automatique / Robotique*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f

- [14] Ducard, 2009. . Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f
- [15] ZEMOURI, 2003. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f
- [16] Combacau, 1991. Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : applications aux ateliers exibles, thèse de doctorat, L'université Paul Sabatier de Toulouse
- [17] Swigelstein, 1995. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f
- [18] willsky, 1976. «Analytical redundancy and the design of robust failure detection system», IEEE transactions on Automatic and Control, vol. 29, no7, p. 603614.
- [19] Iserman, 1984. Process fault detection based on modeling and estimation methods A survey. Automatic, 20(4) :387404,
- [20] Basseville, 1988, «Detecting changes in signals and systems - a survey», Automatic, vol. 24, no3, p. 309326.
- [21] Haïthem Derbel. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.
- [22] Xue, F., D. Zheng et L. Yan. 2005, «Fault diagnosis of distributed discrete event systems using obdd», IEEE Transactions On Automatic Control, vol. 16, no 3, p. 431448.
- [23] C. Berbra, S. Gentil, and S. Lesecq. Identification of multiple faults in an inertial measurement unit. In Proceedings of the 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis ACD'2009, ZielonaGora, Poland, 2009.
- [24] Interprétation qualitative de simulation pour le diagnostic en ligne de procédé continu, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [25] P. Frank, J. Wuennenberg. (1989). 'Fault Diagnosis in Dynamic Systems'. Chap. Robust Fault Diagnosis using Unknown Input Observer Schemes. pp. 46-98. Prentice Hall.
- [26] Isermann, R. 1984, «Process fault detection based on modeling and estimation methode a survey», Automatic, vol. 20, no 4, p. 387404.
- [27] B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, A. K. Samantaray. (2006). Software for Supervision System Design in Process Engineering. IFAC World Congress 2006. Pp.691-695.
- [28] Dustegor et al., 2004. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f
- [29] Ploix et al ..., 2005. S. Ploix. (1998). Diagnostic des systèmes incertains : l'approche bornante., Ph.D. de I.N.P.L, C.R.A.N.
- [30] Gertler, 1991 «A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation», Automatic, vol. 26, no 2, p. 381388.
- [31] Gertler, 1991, Manajemy, 1993. «A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation», Automatic, vol. 6, no 2, p. 381388.
- [32] Thomson, 1999. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f

- [33] Lesecq, S. Gentil, A. Barraud, and C. Godin. Diagnosis of an inertial measurement unit based on set membership estimation. In Proceedings of the 17th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Thessaloniki, Greece, pages 211216, 2009.
- [34] Bishop, 1994. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.Français. ftel-00445949f
- [35] Koivo H.N, Artificial Neural Networks in fault diagnosis and control, Control. Engineering Practice, Vol. 2, Nr.1, 1994.
- [36] Kempowsky T., Surveillance de Procédés à Base de Méthodes de Classification. Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 2004.
- [37] Waissman J., Construction d'un modèle comportemental pour la supervision de procédés : Application a une station de traitement des eaux Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000.
- [38] Lurette C., Développement d'une technique neuronale auto adaptative pour la classification dynamique de données évolutives Application a la supervision d'une presse hydraulique, Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences Technologies de Lille, Lille France, 2003.
- [39] Marie-Josèphe I., Méthodologie de diagnostic appliquée à la maintenance Préventive d'unités de production d'électricité en sites isolés. Thèse de Doctorat de l'Université des Antilles et de la Guyane, 2003.
- [40] Casimir R., Diagnostic des Défauts des Machines Asynchrones par Reconnaissance des Formes. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [41] Chiang L., Russell E., Bratz R. Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems. Springer, 2001.
- [42] Gentil S., Celse B., Charbonnier S., Cocquempot V., Hamelin F., Lesecq S., Maquin D., Montmain J., Ragot J., Sauter D., Supervision des Procédés Complexes, Lavoisier, 2007.
- [43] Y. B. Ivonne 'Fault Diagnosis Using Neural Technique Based on the Simulation Results of Stator Faults for a Three-Phase Induction Motor Drive System' IEEE.
- [44] Muntmain, 1992. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.Français. ftel-00445949f
- [45] Dubuisson, 1990. Diagnostic et reconnaissance des formes, Hermès. Ondel, O. 2006, Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon.
- [46] Farreny, 1989. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.Français. ftel-00445949f
- [47] Zwigelstein, 1995. Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009.Français. ftel-00445949f
- [48] M. Barty, R. J. Patton, M. Syfert, S. de las Heras, and J. Quevedo. Introduction to the DAMADICS actuator FDI benchmark study. Control Engineering Practice, 14(6) :577596, 2006.
- [49] Benallal Mounira,manuelle d'initiation à la modélisation par band graph.

- [50] Gandanegara, 2003. Thèse Méthodologie de conception systémique en Génie Electrique à l'aide de l'outil Bond Graph Application à une chaîne de traction ferroviaire préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH
- [51] G. Dauphin-Tanguy, P. Borne, D. Meizel. 1982. On order reduction of multi-time scale systems by singular perturbation and frequency like methods. IEEE. Int. LSS Symp., Virginia Beach, USA, pp. 190-196.
- [52] Tagina (1995) M. TAGINA. Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 1995.
- [53] Karnopp D. K, State Variables and Pseudo-Bond graphs for Compressible Thermofluid Systems, Journal of Measurement and Control, pp. 185-196, vol. 313, n° 4., 1976.
- [54] Ould Bouamama et al. (2005b) B. Ould Bouamama, K. Medjaher, A.K. Samantary et M. Staroswiecki Supervision of an industrial steam generator. Part I et II : Control Engineering Practice, CEP (sous presse disponible sciences direct <http://www.sciencedirect.com/science>).
- [55] S. Rimaux, B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy. (1996). 'Bond graph model of the shrink and swell phenomenon in a PWR nuclear power plant'. In IEEE-SMC, IMACS Multiconference CESA'96, pp. 288-292, Lille, France.
- [56] G. Dauphin-Tanguy. Les bonds graphs. Paris, France, 2000
- [57] F. Busson, A. Aïtouche, B. Ould Bouamama et M. Staroswiecki. Sensors failures detection in steam condensers. In 3rd IFAC Workshop, on-Line-Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries, volume 2, 1998.
- [58] J. P. Cassar, R. Litwak, V. Coquempot et M. Staroswiecki. Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour les procédés industriels complexes. JESA, RAIRO-APII, 31(9) :179202, 1994 .
- [59] BENHAMMOU MOHAMED THEME SURVEILLANCE DES MODELES REPRESENTES PAR BOND-GRAPH APPLICATION EN SYMBOLS 2000 .
- [60] J. Feenstra, P. J. Mosterman, Biswas G. et P. C. Breedveld. Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of complex ow processes. In Proceedings of the Internatiol Conference on Bond Graph Modeling and Simulation, pages 7782, Phoenix Arizona, January 2001.
- [61] S. Gentil. Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus. In Actes de L'école D'été D'automatique de Grenoble, page Tome 1, Grenoble, France, 2-6 septembre 1996.
- [62] P. Borne et al : Modélisation et identification des processus Tome 2. Technip, Paris, 1992.
- [63] M. Rivera : Modélisation des systèmes dynamiques à topologie variable. Thèse de Doctorat. Université de Lyon 1, 2005.
- [64] G. Dauphin Tanguy : Les bonds graphs en mécatronique. Les Techniques de l'Ingénieur n° S7222.
- [65] G. Dauphin Tanguy : Les bonds graphs. Paris, Hermès Science Publication Paris, 2000.
- [66] A. Achir : Contribution à l'étude de la propriété de platitude sur des modèles bond graphs non linéaires. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.
- [67] P. Lautier : Modélisation des convertisseurs à découpage pour la conception et la commande : Application à l'onduleur. Thèse de Doctorat université de Lyon 1, 1998.

- [68] J. Richalet : Modélisation et identification des processus. Les Techniques de l'Ingénieur n° R7140.
- [69] G. Gandanegara : Méthodologie de conception systémique en Génie Électrique à l'aide de l'outil Bond Graph. Application à une chaîne de traction ferroviaire. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 2003.
- [70] M. Vergé et al : Modélisation structurée des systèmes avec les bond graphs. Technip, Paris, 2004.
- [71] M. Vergé : Modélisation pour l'ingénieur : Approche par bond graph. 6ème congrès européen de science des systèmes 19-22 septembre 2005.
- [72] D. Arzelier : Représentation et analyse des systèmes linéaires. LAAS-CNRS, <http://www.laas.fr/arzelier>.
- [73] F. Busson : Les bond graphs pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2002.
- [74] W. Elostá : Surveillabilité structurelle et platitude pour le Diagnostic des modèles bond graphs couplés. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.
- [75] I. Dif et al : Détection et localisation des défauts par l'approche bond graph. Premier congrès international sur le génie électrique, CIGE04, 206-210, Sétif, Algérie, 10-12 Octobre, 2004.
- [76] A.K. Samantaray et al : Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. ELSEVIER Simulation Modelling Practice and Theory 14, (2006) 237262.
- [77] K. Medjaher : Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.
- [78] Modélisation et identification des processus, P.Borne et al., éditions Technip, Paris 1991.
- [79] B. Ould Bouamama et al : Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. ELSEVIER Control Engineering Practice 13, (2005) 875891.
- [80] paynter.H ,analysis and design of engineering system MIT press 1961.