

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique

Présenté par : GUELLOUH Tarek  
GUEZOULI Nassr Allah

Thème

**Diagnostic d'un système industriel par  
les bond-graphs.**

Soutenu publiquement, le 28 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M L. MERAD	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mme M. BENALLEL	MCA	Université de Tlemcen	Directrice de mémoire
MR. MOKHTARI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
MH. MEGNAFI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique

Présenté par : GUELLOUH Tarek  
GUEZOULI Nassr Allah

Thème

**Diagnostic d'un système industriel par  
les bond-graphs.**

Soutenu publiquement, le 28 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M L. MERAD	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mme M. BENALLEL	MCA	Université de Tlemcen	Directrice de mémoire
MR. MOKHTARI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
MH. MEGNAFI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

# Remerciements

Nous remercions dieu avant tout le Clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de réaliser et de finir ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos loyaux remerciements à notre cher encadreur :Mme M. Benallel maitre de conférences à l'université de Tlemcen faculté de technologie département GEE qui n'a pas épargné le moindre effort pour nous aider à mener à bien ce mémoire, nous orienter à tout moment et nous soutenir en toute circonstance nous le remercions également pour ces précieux conseils sa présence et ces encouragements continue. Ses grandes connaissances et ses critiques constructives ont permis d'affiner et de mieux situer ces travaux de thèse.

Nous remercions Monsieur L . Merad professeur à l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen et chef du département du deuxième cycle , pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ma soutenance .

Nous tenons à remercier également Monsieur R. Mokhtari maitre de conférence à l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen , Monsieur H. Megnafi maître assistant à l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen d'avoir accepté d'être membres du jury et d'examiner notre travail.

# Dédicases

A Mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A Mes chers frères et sœurs (Faress , Bouthaina , Wahiba, Soltane,Massi)

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde , éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A MA GRAND MERE

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et bcp de santé et de bonheur dans les deux vies.

A mes chers amis

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

GUELLOUH TAREK

# Dédicases

A Mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A Mes chers frères et sœurs (Abdelkader , Amina , Salah, Assia)

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde , éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A Ma chère petite ange Anfel

l'amour que j'ai pour vous ne peut jamais être exprimer par une dédicace Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A la mémoire de ma tante

Vous avez toujours fait confiance en moi , vous m'avez soutenu depuis le début, vous m'avez poussé vers l'avant, nous avons grimpé les escaliers ensemble pour me voir atteindre le sommet, mais le destin voulait que vous alliez en avance. J'aurais tant aimé que vous soyez présente.

A ma grand-mère

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et bcp de santé et de bonheur dans les deux vies.

A mes chers amis

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

GUEZOULI NASSR ALLAH

# SOMMAIRE

<b>Intorducion Générale</b>	<b>0</b>
<b>1 Modélisation par Bond Graph</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Modélisation par bond graph . . . . .	5
1.2.1 Concepts et définitions . . . . .	5
1.2.2 Variables d'énergie et de puissance . . . . .	6
1.2.2.1 Variables de puissance . . . . .	6
1.2.2.2 Variables d'Energie . . . . .	6
1.3 Pseudo bond graphs . . . . .	8
1.3.1 Pourquoi les pseudo bond graphs ? . . . . .	8
1.3.2 Variables d'énergie et de puissance . . . . .	8
1.4 Éléments du bond graph . . . . .	8
1.4.1 Éléments passifs 1-port . . . . .	9
1.4.2 Élément résistif R . . . . .	9
1.4.3 Élément de stockage C . . . . .	10
1.4.4 L'élément d'inertie I . . . . .	10
1.4.5 Éléments actifs . . . . .	12
1.4.6 Éléments de jonction . . . . .	13
1.4.7 Jonction "1", "0" . . . . .	13
1.4.8 Transformateur (TF) et gyrateur (GY) 2-port . . . . .	14
1.5 Liens d'information . . . . .	16
1.6 Causalités . . . . .	17
1.7 Chemin causal . . . . .	19
1.8 Conclusion . . . . .	20
<b>2 Diagnostic des systèmes</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction . . . . .	22
2.2 De la maintenance préventive au diagnostic . . . . .	22
2.3 Définitions . . . . .	24
2.3.1 Fonctionnement normal d'un système . . . . .	24
2.3.2 Défaut . . . . .	25
2.3.3 Défaillance . . . . .	25
2.3.4 Panne . . . . .	25
2.3.5 Résidu . . . . .	25
2.3.6 Perturbation . . . . .	25
2.3.7 Les différents étapes de surveillance . . . . .	25
2.3.8 Génération de résidus . . . . .	25
2.3.8.1 Acquisition de données . . . . .	25
2.3.8.2 Elaboration d'indicateurs de défauts . . . . .	26

# SOMMAIRE

---

2.3.9	Evaluation de données . . . . .	26
2.3.9.1	La détection . . . . .	27
2.3.9.2	La localisation . . . . .	27
2.3.10	Prise de décision . . . . .	27
2.4	Classification des méthodes de diagnostic . . . . .	27
2.4.1	Méthodes sans modèle analytique . . . . .	28
2.4.1.1	Analyse fréquentielle . . . . .	28
2.4.1.2	Redondance matérielle . . . . .	29
2.4.1.3	Capteur spécifiques . . . . .	29
2.4.1.4	Réseaux de neurones artificiels . . . . .	29
2.4.1.5	Systèmes d'inférence flous . . . . .	30
2.4.1.6	Reconnaissance de formes . . . . .	31
2.4.2	Méthode avec modèles analytiques . . . . .	32
2.4.2.1	Espace de parité . . . . .	33
2.4.2.2	Observateurs . . . . .	33
2.4.2.3	Estimation paramétrique . . . . .	33
2.4.2.4	Bond Graph . . . . .	34
2.5	Diagnostic à base de Bond Graph . . . . .	35
2.5.1	L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph . . . . .	36
2.5.2	L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph . . . . .	37
2.6	PLACEMENT DE CAPTEURS . . . . .	37
2.6.1	Algorithme . . . . .	37
2.7	Génération des relations de redondance analytique . . . . .	39
2.8	Matrice de signature des défaillances . . . . .	39
2.9	Conclusion . . . . .	40
<b>3</b>	<b>Symbols Shakti</b> . . . . .	<b>41</b>
3.1	Introduction . . . . .	42
3.2	Caractéristiques principales du logiciel Symbols . . . . .	42
3.3	Environnements Symbols . . . . .	42
3.4	Modules du symbols Shakti . . . . .	42
3.4.1	Le Module BOND PAD . . . . .	43
3.4.2	Le module de simulation . . . . .	44
3.4.3	Le module de commande "Controls" . . . . .	45
3.4.4	Le Module FDI Pad . . . . .	45
3.5	Création et Incorporation des Capsules sous Symbols . . . . .	48
3.5.1	Caractéristiques des capsules . . . . .	48
3.6	Conclusion . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Surveillance du moteur à courant continu</b> . . . . .	<b>51</b>
4.1	Introduction . . . . .	52
4.2	Constitution : . . . . .	52
4.2.1	Structure de la machine à courant continu : . . . . .	52
4.2.2	Induit(rotor) : . . . . .	53
4.2.3	Collecteur : . . . . .	53
4.2.4	Balais . . . . .	53
4.3	Principe de fonctionnement : . . . . .	54

# SOMMAIRE

---

4.4	MODES D'EXCITATION : . . . . .	55
4.4.1	Excitation indépendante(séparée) : . . . . .	55
4.4.2	Excitation série : . . . . .	56
4.4.3	Excitation shunt : . . . . .	57
4.4.4	Excitation composée : . . . . .	57
4.5	Bilan des puissances : . . . . .	57
4.6	Simulation . . . . .	60
4.6.1	Excitation séparée : . . . . .	60
4.6.2	Excitation série : . . . . .	62
4.6.3	Excitation shunte : : . . . . .	63
4.7	Surveillance d'un Moteur à Courant Continu : . . . . .	66
4.7.1	Excitation série : . . . . .	66
4.7.1.1	Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $I_e$ »	74
4.7.1.2	Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $R_e$ »	75
4.7.1.3	Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $I_a$ »	75
4.7.1.4	Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $R_a$ »	76
4.7.1.5	Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $j$ » .	76
4.7.1.6	Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $f$ » .	77
4.7.1.7	Génération automatique des RRAs . . . . .	78
4.7.1.8	Réalisation des capsules : . . . . .	78
4.7.2	Excitation shunte et séparée . . . . .	83
4.7.2.1	Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $I_e$ » .	91
4.7.2.2	Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $R_e$ » .	92
4.7.2.3	Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $R_a$ »	92
4.7.2.4	Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $I_a$ » .	93
4.7.2.5	Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $j$ » .	93
4.7.2.6	Génération automatique des RRAs : . . . . .	94
4.7.2.7	Réalisation des capsules : . . . . .	94
4.8	Conclusion . . . . .	96

<b>Conclusions générales et perspectives</b>	<b>99</b>
--	-----------

## LISTE DES FIGURES

1.1	Représentation énergétique dans bonds graph. . . . .	6
1.2	Informations fournies par une représentation bond graph. . . . .	6
1.3	Représentation des éléments passifs à 1 port. . . . .	9
1.4	Représentation d'éléments-R dans les différents domaines physiques. . .	10
1.5	Représentation générale de l'élément c. . . . .	10
1.6	Représentation de l'élément c dans les différents domaines. . . . .	11
1.7	Stockage d'énergie dans le cas linéaire et non linéaire. . . . .	11
1.8	Représentation générale de l'élément I. . . . .	12
1.9	Représentation de l'élément I dans les différents domaines. . . . .	12
1.10	Source d'effort et flux. . . . .	12
1.11	Source d'effort et flux modulée. . . . .	13
1.12	Les jonctions "1" and "0" dans bond graph. . . . .	13
1.13	Exemples de modèle bond graph des différents systèmes (jonction "0").	14
1.14	Exemples de modèle bond graph des différents systèmes (jonction "1").	15
1.15	TF. (1) : Transformateur électrique. (2) : Piston-hydraulique. (3) : Lever. . . . .	15
1.16	(1) : Gyrateur. (2) : Gyrateur modulé. . . . .	16
1.17	Lien d'information (1), détecteurs d'effort (2) et de flux (3). . . . .	16
1.18	La notion de causalité. . . . .	17
1.19	Causalité dans Bond graph. . . . .	17
1.20	Les différentes règles de causalité des éléments de bond graph. . . . .	18
1.21	Chemin causal simple. . . . .	19
1.22	Chemin causal mixte. . . . .	19
2.1	Maintenance préventive systématique. . . . .	23
2.2	Maintenance préventive conditionnelle. . . . .	23
2.3	Structure générale d'un système de diagnostic. . . . .	24
2.4	Structure générale d'un système de diagnostic. . . . .	26
2.5	La classification des méthodes de diagnostics. . . . .	28
2.6	Les étapes de la mise en œuvre d'un système d'inférence flou (SIF). . .	30
2.7	Représentation bond graph d'un système de surveillance. . . . .	34
3.1	Les éléments SYMBOLS. . . . .	43
3.2	Fenêtre du module (bond pad). . . . .	43
3.3	Interface graphique de la partie BondPad du logiciel SYMBOLS. . . . .	44
3.4	Fenêtre du simulateur. . . . .	44
3.5	Fenêtre de compilation. . . . .	45
3.6	Fenêtre des courbes. . . . .	46
3.7	Fenêtre de commande "Controls". . . . .	46
3.8	Système modélisé par bond graph sur le module FDI Pad. . . . .	47
3.9	Le sous menus FDI de ModelBuilder. . . . .	47

# LISTE DES FIGURES

---

3.10	Matrice de monitorabilité en utilisant le module FDI Pad. . . . .	47
4.1	La fonctionnement de la machine à courant continu. . . . .	52
4.2	Structure générale d'une MCC. . . . .	52
4.3	L'induit(rotor). . . . .	53
4.4	Collecteur. . . . .	53
4.5	Balais montés sur collecteur. . . . .	54
4.6	l'action d'un champ magnétique B sur un courant I dans un conduc- teur (Loi de Laplace). . . . .	54
4.7	Modèle électrique du MCC à excitation indépendante. . . . .	55
4.8	Modèle électrique du MCC à excitation série. . . . .	56
4.9	Modèle électrique du MCC à excitation shunte. . . . .	57
4.10	Modèle électrique du MCC à excitation composé. . . . .	58
4.11	Bilan des puissances. . . . .	58
4.12	modèle bond graph du moteur à courant continu à excitation séparée. . . . .	60
4.13	Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation séparée (à vide). . . . .	61
4.14	Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation séparée (en charge). . . . .	61
4.15	modèle bond graph du moteur à courant continu à excitation série. . . . .	62
4.16	Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation série (à vide). . . . .	63
4.17	Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation série (en charge). . . . .	63
4.18	Modèle bond graph du moteur à courant continu à excitation shunte . . . . .	64
4.19	Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation shunte (à vide). . . . .	65
4.20	Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation shunte (en charge). . . . .	65
4.21	Modèle bond graph du Moteur à excitation série avec des détecteurs virtuels. . . . .	66
4.22	Signature pour toutes les combinaisons possibles. . . . .	70
4.23	Modèles bond graph du résidu « $r_1$ ». . . . .	71
4.24	Modèles bond graph du résidu « $r_3$ ». . . . .	72
4.25	Modèles bond graph du résidu « $r_5$ ». . . . .	72
4.26	Modèles bond graph du résidu « $r_6$ ». . . . .	73
4.27	Réponses des résidus sans défauts. . . . .	73
4.28	Réponses des résidus sans défauts. . . . .	74
4.29	Réponses des résidus au défaut de « $I_e$ ». . . . .	74
4.30	Réponses des résidus au défaut de « $R_e$ ». . . . .	75
4.31	Réponses des résidus au défaut de « $I_a$ ». . . . .	76
4.32	Réponses des résidus au défaut de « $R_a$ ». . . . .	76
4.33	Réponses des résidus au défaut de « $j$ ». . . . .	77
4.34	Réponses des résidus au défaut de « $f$ ». . . . .	78
4.35	Toutes les capsules de MCC à excitation série. . . . .	79
4.36	Modèle architectural du MCC a excitation série. . . . .	79
4.37	Boite de dialogue pour l'identification d'une capsule . . . . .	80
4.38	Le menu « FDI » de ModelBuilder. . . . .	80
4.39	Le menu « FDI » de ModelBuilder. . . . .	81

## *LISTE DES FIGURES*

---

4.40	Les RRAs générées. . . . .	81
4.41	Sélection des variables à exclure. . . . .	82
4.42	Surveillabilité de Moteur. . . . .	82
4.43	Modèle bond graph du Moteur à excitation shunte avec des détecteurs virtuels. . . . .	83
4.44	Signature pour toutes les combinaisons possibles. . . . .	88
4.45	Modèle bond graph du résidu $r_2$ . . . . .	88
4.46	Modèles bond graph du résidu « $r_3$ ». . . . .	89
4.47	Modèles bond graph du résidu « $r_4$ ». . . . .	89
4.48	Modèles bond graph du résidu « $r_6$ ». . . . .	90
4.49	Modèles bond graph du résidu « $r_7$ ». . . . .	90
4.50	Réponses des résidus sans défauts. . . . .	91
4.51	Réponses des résidus au défaut de « $I_e$ ». . . . .	91
4.52	Réponses des résidus au défaut de « $R_e$ ». . . . .	92
4.53	Réponses des résidus au défaut de « $R_a$ ». . . . .	93
4.54	Réponses des résidus au défaut de « $I_a$ ». . . . .	93
4.55	Réponses des résidus au défaut de « $j$ ». . . . .	94
4.56	Tous les capsules de MCC à excitation shunte. . . . .	95
4.57	Modèle bond graph du Moteur à excitation shunte avec des détecteurs virtuels. . . . .	95
4.58	Modèle bond graph du Moteur à excitation shunte avec des détecteurs virtuels. . . . .	96

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Variables généralisées d'effort et de flux. . . . .	7
1.2	Variables généralisées de moment et de déplacement. . . . .	8
1.3	Variables généralisées pseudo bond graph. . . . .	9
4.1	Paramètres du Moteur à excitation Séparée. . . . .	61
4.2	Paramètres du Moteur à excitation Série. . . . .	62
4.3	Paramètres du Moteur à excitation shunte. . . . .	64
4.4	Matrices de signatures des défaillances de la combinaison [111111] . .	69
4.5	matrices de signatures des défaillances de la combinaison [101011] . .	70
4.6	La nomenclature des variables utilisées dans le moteur. . . . .	81
4.7	Matrices de signatures des défaillances de la combinaison [1111111] .	86
4.8	Matrices de signatures des défaillances de la combinaison [0111011]. .	87

# TABLEAU DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

$I$	Élément inertiel
$C$	Élément de capacité
$R$	Élément résistif
$TF$	Transformateur
$MTF$	Transformateur modulé
$GY$	Gyrateur
$MGY$	Gyrateur modulé
$MSF$	Matrice de signature des fautes
$RN$	Réseaux de neurones
$BG$	Bond Graph
$FDI$	Fault Detection and Isolation
$FTC$	Fault Tolerant Control
$RRA$	Relation de Redondance Analytique
$D_e$	Détecteur d'effort
$D_f$	Détecteur de flux
$S_e$	Source d'effort
$S_f$	Source de flux
$e(t)$	l'effort
$f(t)$	le flux
$D_b$	DéTECTABILITÉ
$I_b$	ISOLABILITÉ

# Intorducion Générale

Les systèmes actuels d'ingénierie des processus sont de plus en plus complexes, les processus industriels automatisés modernes utilisent des lois de contrôle complexes afin d'améliorer la qualité de la production finale, la sécurité et l'efficacité. En plus, l'automatisation des processus comprend la supervision des processus pour aider l'opérateur humain à gérer les situations alarmantes, et pour améliorer la fiabilité, la disponibilité et la sécurité du processus.

Les systèmes modernes d'ingénierie des processus sont multidisciplinaires. Les processus sont composés de sous-systèmes ou de parties en interaction provenant de différentes disciplines, ces interactions d'un processus sont souvent complexes, l'amélioration de la sûreté de fonctionnement de ces systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts, connus sous l'expression anglaise FDI « Fault Detection and Isolation », 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.

Divers ouvrages ont été écrits jusqu'à présent pour traiter les questions mentionnées ci-dessus dans le cadre de la supervision du processus moderne, la plupart de ces livres utilisent des modèles mathématiques abstraits au lieu d'une représentation structurée adaptée aux systèmes multidisciplinaires.

Toutefois, à notre avis, le choix d'une méthode de modélisation adéquate, adaptée à l'analyse du comportement du système pluridisciplinaire, qui fait apparaître l'interaction entre les différents sous-systèmes, est très important car il peut réduire considérablement le temps de développement, c'est pourquoi nous utilisons l'approche bond graph dans cette thèse, dans le but d'une part de présenter d'une façon pédagogique l'outil bond graph pour la modélisation des systèmes et de montrer d'autre part comment à l'aide d'outils logiciels (SYMBOLS 2000) qui est facile à utiliser, on peut générer sous forme formelle et d'une façon générique des modèles dynamiques destinés à la supervision des procédés complexes, l'approche bond graph permet une modélisation fonctionnelle par leur représentation par bond graph à mot et par la mise en évidence des phénomènes des dissipation, de stockage et de transformation d'énergie grâce aux éléments bond graphs (R, C, I, TF, GY, . . .), du point de vue de la supervision, le modèle permet à l'opérateur de visualiser clairement la dissipation, le stockage, le transfert ainsi que la dynamiques des phénomènes du processus. Les propriétés structurelles (base de l'aspect diagnostic pour la génération des RRas) sont assurées par la visualisation des propriétés causals et comportementales, et par la déduction systématique des modèles mathématiques du modèles bond graph, par son organisation causale, il permet aussi de mettre en évidence les cause et les conséquences des défauts, ce qui permet de retrouver les origines des alarmes.

Le présent mémoire est composé, en plus de l'introduction générale, de quatre chapitres et d'une conclusion.

D'abord, Dans le premier chapitre présente la modélisation par bond graph ces concepts et définitions ,les différents éléments et composants. Puis, la deuxième chapitre présente les principes de base du diagnostic et les différents étapes de la diagnostic pour un système,les classification des méthodes de diagnostic :quantitative et qualitative notamment diagnostic à base de bond graph ainsi que le placement de capteurs ,génération des relations de redondance analytiques et la matrice de défaillance. Ensuite le chapitre suivant est une présentation générale du logiciel Symbols Shakti. Enfin le dernier chapitre présente une théorie sur la machine à courant continu qui est l'application de notre travail, la modélisation bond graph du moteur à courant continu avec ces différents types d'excitations ainsi que leur simulation, en plus la surveillance de ces moteur notamment placement de capteur ,génération des RRas, et la matrice de défaillance en utilisant le logiciel Symbols Shakti.

# Chapitre 1

## Modélisation par Bond Graph

## 1.1 Introduction

L'une des étapes principales et les plus difficiles de la conception et de l'analyse des systèmes est de générer un modèle informatique pour l'analyse de contrôle, la conception de diagnostics, les capteurs la sélection/le positionnement et le dimensionnement des actionneurs.

La modélisation est une tâche difficile, en particulier des systèmes mécatroniques. En effet, les systèmes mécatroniques sont régis par de nombreux effets de différentes disciplines d'ingénierie (mécanique, électrique, pneumatique, thermique, etc.) et de divers composants technologiques (capteurs, contrôleurs, actionneurs, transducteurs, etc.). La modélisation classique basé sur les équations qui consiste à étudier les échanges en stationnaire ou en transitoire est compliquée dans les systèmes à caractère multi énergie et non stationnaire. L'outil bond graph à une orientation pluridisciplinaire permet par sa nature graphique, en utilisant un langage unifié d'afficher explicitement la nature des échanges de puissance dans le système, pour la tâche de modélisation, cette méthodologie permet, (indépendamment de la nature physique du système étudié), d'afficher l'échange d'énergie dans un système, y compris le stockage, la dissipation et la transformation[1].

L'outil bond graph pour la modélisation des systèmes mécatroniques est bien développé dans la littérature. Le premier livre a été présenté en 1959 par Paynter, l'inventeur des bond graph [2]. Ensuite ils ont été étendus par Karnopp et al. Dans [3] où la présentation commence par les éléments de base et conduit à des modèles adaptés à la simulation informatique automatisée. Cette capacité à générer Les modèles dynamiques formels sont dus à l'aspect graphique de bond graph. Il n'est pas seulement un outil puissant de modélisation et de simulation des systèmes, mais permet également le contrôle et l'analyse des diagnostics. C'est pourquoi on l'a choisi dans notre travail (PFE).

Le modèle de bond graph peut être affiné en ajoutant graphiquement plus d'éléments comme les effets de friction, de rigidité, sans avoir à tout recommencer. En raison de leur complexité, les systèmes mécatroniques ont besoin d'une approche structurée pour représenter le processus de modélisation des étapes de manière hiérarchique en utilisant un langage unifié. De cette façon, quatre niveaux de modélisation peuvent être représentés par un modèle de bond graphe :

### — Le niveau technologique

Ce niveau représente l'architecture du système par l'assemblage des différents modèles de sous-systèmes sous forme d'icônes, qui correspondent à des différents éléments de l'installation (échangeur de chaleur, chaudière, tuyau, etc.). Il peut être représenté par un "Bond graph à mots". Cela signifie que le système est représenté comme des sous-systèmes interconnectés. Contrairement aux schémas-blocs (où les entrées et les sorties sont des variables d'information), l'interconnexion en Bond graph à mots est réalisé par les variables de puissance (paires d'efforts et de flux).

### — Le niveau physique

A ce niveau, la modélisation utilise une description énergétique des phénomènes physiques. On utilise les concepts de base de la physique tels que la dissipation d'énergie, transformation, d'accumulation, sources, etc. en considérant les phénomènes physiques pertinents (inertie, frottement), sous une forme discrétisée, pour

introduire la dynamique du système à travers une description graphique. Bond graph est utilisé comme un langage universel pour la modélisation des paramètres qui englobent tous les domaines de la physique.

— **Niveau mathématique**

Le modèle mathématique est représenté par des équations (algébriques et différentielles) qui décrivent le comportement de système. Il est obtenu à partir de bond graph en écrivant les équations constitutives des composantes et des contraintes.

— **Niveau mathématique**

Le modèle mathématique est représenté par des équations (algébriques et différentielles) qui décrivent le comportement de système. Il est obtenu à partir de bond graph en écrivant les équations constitutives des composantes et des contraintes.

— **Niveau algorithmique**

Le niveau algorithmique est directement lié à l'information de traitement, il indique comment les modèles mathématiques sont calculés. Le problème algorithmique est résolu dans la méthodologie de Bond graph par l'attribution systématique des causalités, qui sont indiquées par des lignes perpendiculaires aux extrémités des bonds. Alors les avantages de la modélisation par bond graph sont les suivants : -un langage unique pour tous les domaines de la physique.

- il montre clairement les relations de cause à effets dans le modèle.
- il permet de poursuivre le développement et l'évolution du modèle.
- un outil d'analyse des propriétés structurelles du système.

## 1.2 Modélisation par bond graph

### 1.2.1 Concepts et définitions

Considérons deux systèmes S1 et S2, respectivement, représentés par un moteur à courant continu et une charge, qui échangent leur puissance comme le montre la (**fig 1.1(a)**). Cette puissance échangée est représentée par un lien étiqueté par deux variables appelées effort ( $e$ ) et flux ( $f$ ), qui sont appelées les variables de puissance. L'effort est la variable intensive (par exemple, la pression, le potentiel électrique, température, potentiel chimique, force, couple, etc.) et le flux est la dérivée de variable étendue (par exemple, le débit volumétrique, le courant, le débit entropique, la vitesse, le débit molaire, etc.). Pour la représentation, la variable de l'effort peut être placée sur un côté du bond et la variable flux de l'autre côté, bien que ces placements ne soient pas nécessaires dans de nombreux cas, sauf dans le but d'explication. Par convention, la variable flux est toujours placée de côté de la demi-flèche sur bond, comme indiqué dans la (**fig 1.1(b)**) et elle est appelée direction de la puissance. Dans la théorie des bonds graph, Les liens (appelées power bonds) représentent un canal d'échange d'énergie entre les multiports. Cette puissance est le produit des deux variables de puissance.

$$p_u(t) = e(t) f(t)$$

Dans l'exemple mécanique : l'effort est le couple  $\tau$  et le flux est la vitesse angulaire  $\omega$ .(fig 1.1(c))

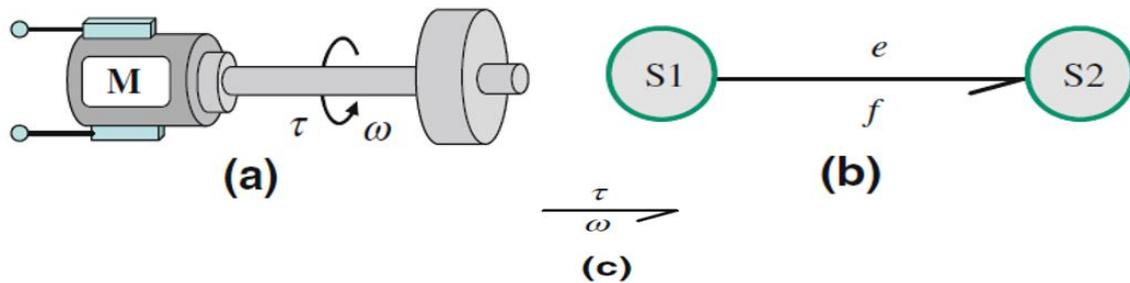


FIGURE 1.1 – Représentation énergétique dans bonds graph.

Les quatre informations principales d'une représentation bond graph sont montrées dans la figure ci-dessous (Fig 1.2) :

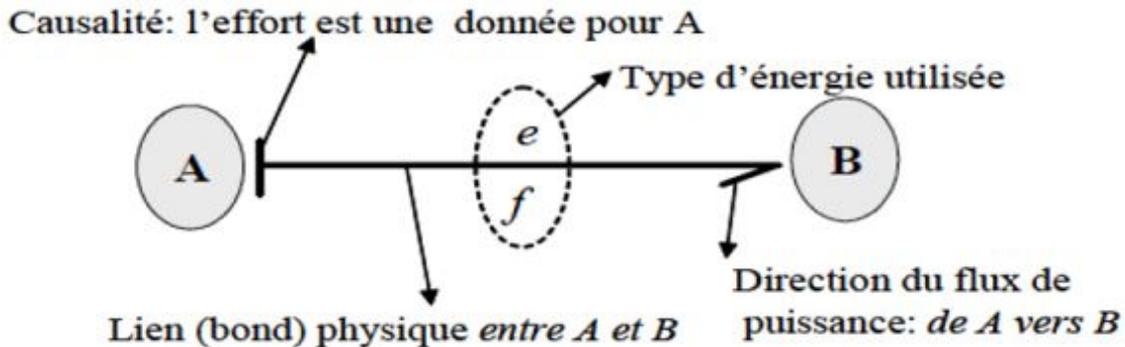


FIGURE 1.2 – Informations fournies par une représentation bond graph.

## 1.2.2 Variables d'énergie et de puissance

### 1.2.2.1 Variables de puissance

Les interactions de puissance sont toujours présentes lorsque deux systèmes sont connectés. Les variables de puissance sont généralement appelés effort et flux. On les appelle ainsi, car leur produit a la grandeur d'une puissance :  $P = e * f$ . Elles ont des significations différentes dans chaque domaine de la physique, alors ce type de bond graph est alors appelé vrai bond graph.

Le (Tab 1.1) donne des variables d'effort et de flux pour certains des domaines physiques :

### 1.2.2.2 Variables d'Énergie

Les variables d'énergie sont importantes pour la description dynamique des systèmes, ces variables sont le moment généralisé  $p(t)$  et le déplacement généralisé  $q(t)$ . Elles sont définies par les relations intégrales des variables de l'effort et du flux comme suit :

En utilisant une forme différentielle on peut réécrire ces équations différemment :  
L'énergie est calculée par l'intégration de puissance :

Domaine physique	Effort	Flux
Electrique	Tension $u$ [Volt]	Courant $i$ [A]
Mécanique de translation	Force $F$ [N ]	Vitesse de translation $\dot{x}$ [m/s]
Mécanique de rotation	Couple $\Gamma$ [N.m/]	Vitesse angulaire $\omega$ [rad/s/]
Hydraulique	Pression $P$ [pa]	Débit volumique $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]
Thermique	Température $T$ [k]	Flux d'entropie $\dot{S}$ [J/(K.s)]
Chemique(transformation)	Potentiel chimique $\mu$ [j/mol/]	Flux molaire $\dot{n}$ [mol/s]
Chimique (cinétique)	Affinité chimique $A$ [j/mol]	Vitesse de la réaction $\xi$ [mol/s/]

Tableau 1.1 – Variables généralisées d'effort et de flux.

$$p(t) \equiv \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau = p_0 + \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau,$$

$$q(t) \equiv \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau = q_0 + \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau.$$

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

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

$$E(t) = \int_{-\infty}^t P_u(\tau) d\tau = \int_0^t e(\tau) f(\tau) d\tau + E_0.$$

Basant sur l'équation 2, Il est facile d'exprimer  $E$  en fonction des variables énergétiques  $q$  ou  $p$  Basant sur l'équation 2, Il est facile d'exprimer  $E$  en fonction des variables énergétiques  $q$  ou  $p$  :

$$E(q) = \int_{q_0}^q e(q) dt + E_{(q=q_0)}.$$

$$E(p) = \int_{p_0}^p f(p) dt + E_{(p=p_0)}.$$

Exemple, l'énergie potentielle stockée  $E_p$  dans un ressort de raideur  $k$  en supposant que la force  $F$  (l'effort) est proportionnelle au déplacement  $x$  (variable d'énergie

q)  $F = k * x$ , est bien :

$$E_p(t) = \int_{q_0}^{q_1} e(q) dq = \int_{x_0}^{x_1} kx dx = \frac{1}{2}k (x_1^2 - x_0^2).$$

Les variables d'énergie pour différents domaines physiques sont indiquées dans le tableau.2 suivant :

Domaine physique	Moment	Déplacement
Electrique	Flux magnétique	Charge q[coulomb]
Mécanique de rotation	Moment angulaire $\Omega$ [N.m.S]	Angle $\theta$ [rad]
Mécanique de translation	Moment J [N.S]	Elongation x[m]
Hydraulique	Impulsion de pression $p_p$ [N.s/m <sup>2</sup> ]	Volume V [m <sup>3</sup> ]
Chimie	//	Nombre de moles n
Thermique	//	Entropie

Tableau 1.2 – Variables généralisées de moment et de déplacement.

## 1.3 Pseudo bond graphs

### 1.3.1 Pourquoi les pseudo bond graphs ?

Comme un exemple l'utilisation des vrais bond graphs pour la modélisation des systèmes thermodynamiques, avec des variables d'effort et de flux thermique et chimique qui sont de nature complexe, non accessibles aux mesures, parce qu'ils ne respectent pas les simples lois de conservation par exemple l'entropie n'est pas conservée.

Afin de modéliser ces types de systèmes on utilise Pseudo bond graph développé initialement par Karnopp [4, 5] dans lequel les propriétés classiques d'un vrai bond graph (causales, structurelles, mise en équations...) restent valables mais le produit des variables d'effort et de flux n'a plus la dimension d'une puissance.

### 1.3.2 Variables d'énergie et de puissance

## 1.4 Éléments du bond graph

Dans le langage bond graph, on retrouve deux éléments actifs (Se et Sf), trois éléments passifs généralisés (I, C et R), deux jonctions (0 et 1) et deux transducteurs (TF et GY). Ces éléments sont utilisés pour modéliser tout processus énergétique.

Domaine	Effort $e$	Flux $f$	Déplacement $q$	Impulsion $p$
Chimique	Concentration $C$ [mol/m <sup>3</sup> ]	Flux molaire $\dot{n}$ [mol/s]	Nombre de moles $n$	//
Hydraulique	Pression $P$ [N/m <sup>2</sup> ]	Débit massique $\dot{m}$ [Kg/s]	Masse $m$ [kg]	Impulsion de pression $P$ [(N.s)/m <sup>2</sup> ]
Thermique (convection)	Température $T$ [k]	Flux D'enthalpie $\dot{H}$ [J/s]	Energie interne $U$ [j]	//
Thermique (conduction)	Température $T$	Flux thermique $Q$ [J/s]	Quantité de chaleur $Q$ [j]	//

Tableau 1.3 – Variables généralisées pseudo bond graph.

Lorsque l'énergie échangée est négligeable, ou l'énergie est obtenue à partir d'une source externe non modélisée, elle est alors représentée par un lien (liaison) d'information ayant des flèches pleines pour indiquer la direction de l'imposition de l'information. La flèche pleine dans le lien d'information (aussi appelé lien activé) peut représenter le signal transmis par un capteur, un intégrateur, etc.

### 1.4.1 Eléments passifs 1-port

Les éléments passifs transforment la puissance reçue en énergie dissipée (élément R), stocker l'énergie sous forme d'énergie potentielle (élément C) ou l'énergie cinétique (élément I) par conséquent la demi flèche est orientée vers l'élément passifs. Alors ils sont des éléments 1-port avec un seul port (bond) entrant.(fig1.3)

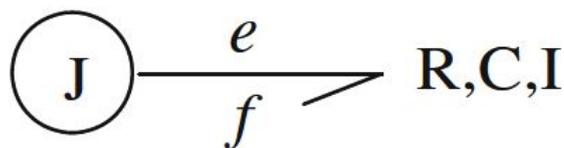


FIGURE 1.3 – Représentation des éléments passifs à 1 port.

### 1.4.2 Elément résistif R

Un élément de type R (résistance ou dissipateur) si elle définit une équation algébrique constitutive entre l'effort et le flux. Cet élément modélise tous les phénomènes de type dissipation d'énergie. On peut citer les résistances dans les différents domaines : résistances électriques, les frottements mécaniques, les résistances hydrauliques et les résistances chimiques généralement on représente  $r$  par le type de

phénomène identifié ( $R_e$ ,  $R_m$ ,  $R_h$  ou  $R_c$ ) (**fig1.4**).  
L'équation qui caractérise l'élément R :

$$\phi_R * (e, f) = 0$$

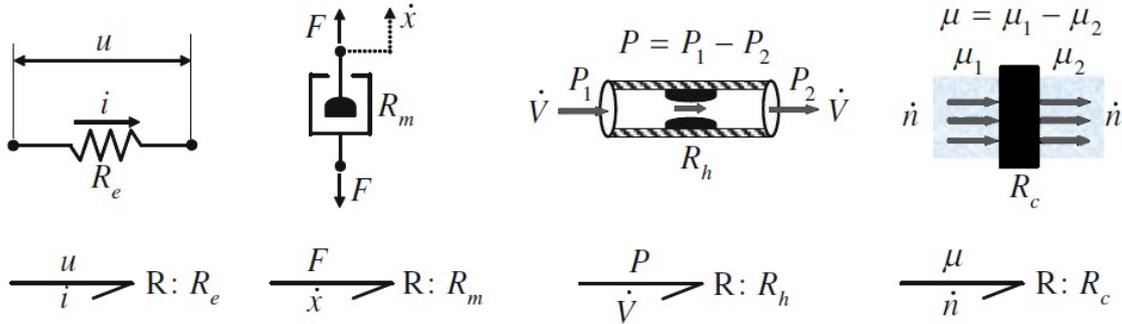


FIGURE 1.4 – Représentation d'éléments-R dans les différents domaines physiques.

### 1.4.3 Élément de stockage C

Un élément bond graph est appelé élément C (stockage) s'il est défini par une équation dynamique reliant le déplacement (intégrale temporelle du flux) et l'effort. Cet élément représente tout système qui transforme la puissance reçue en énergie potentielle sans perte.

La loi régissant l'élément C'est toujours relié l'effort  $e$  à l'intégrale temporelle du flux (soit le déplacement généralisé)(**fig1.5**) :

$$\Phi_c (e, (t) dt) = \Phi_c (e, q) = 0$$

$$\frac{e}{f = \frac{dq}{dt}} \rightarrow C : C_i$$

FIGURE 1.5 – Représentation générale de l'élément c.

L'élément C stocke l'énergie pour la décharger à la demande par le reste du système.

Alors dans le cas linéaire ((**fig1.7**) la loi s'écrit  $\frac{-q}{c} = 0, p - \frac{(\rho \cdot g)}{A}, V = 0, F - k * x = 0$  dans les différents domaines respectivement en électricité (**fig 1.6(b)**), hydraulique (**fig 1.6(c)**), mécanique (**fig 1.6(d)**).

### 1.4.4 L'élément d'inertie I

Un élément bond graph est appelé élément I (stockage) s'il est défini par une équation dynamique reliant la partie intégrante de l'effort (le moment généralisé) dans le temps et flux. Cet élément modélise tout système qui transforme la puissance

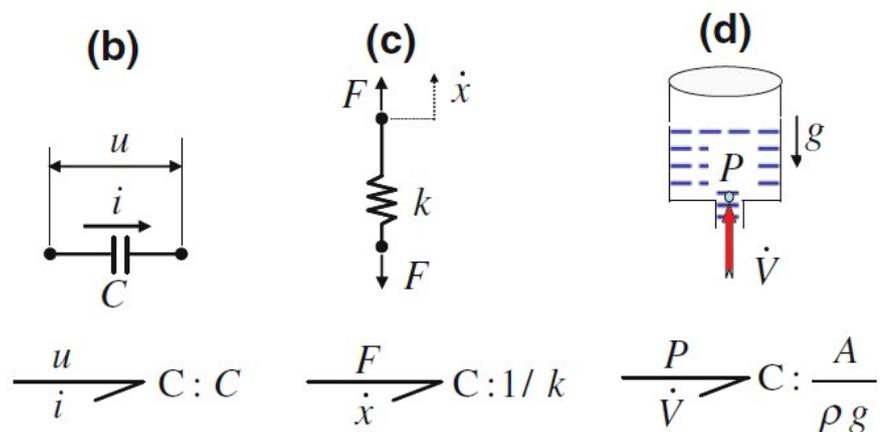


FIGURE 1.6 – Représentation de l'élément c dans les différents domaines.

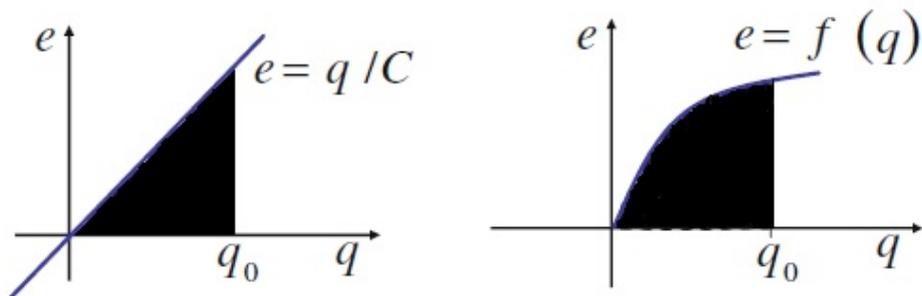


FIGURE 1.7 – Stockage d'énergie dans le cas linéaire et non linéaire.

reçue en énergie cinétique pour les systèmes mécaniques, électriques et hydrauliques etc...

La loi qui le caractérise est une relation dynamique liant l'intégrale de l'effort (soit L'impulsion) et le flux (**fig1.8**) :

$$\Phi_I (f, (t) dt) = \Phi_I (f, p) = 0$$

$$e = \frac{dp}{dt} \xrightarrow{f} I: I_i$$

FIGURE 1.8 – Représentation générale de l'élément I.

Alors dans le cas linéaire la loi s'écrit  $u - L \frac{di}{dt} = 0$ ,  $F - M \ddot{x} = 0$ ,  $P - M \dot{x} = 0$  dans les différents domaines respectivement en électricité (**fig 1.9(b)**), hydraulique (**fig 1.9(d)**), mécanique (**fig 1.9(c)**).

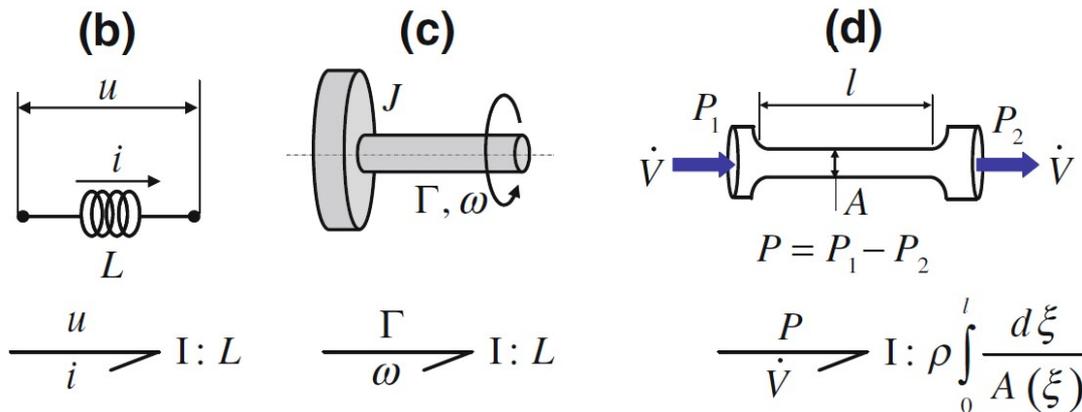


FIGURE 1.9 – Représentation de l'élément I dans les différents domaines.

### 1.4.5 Eléments actifs

Les sources alimentent le processus elles sont des éléments actifs dans la notation de bond graph, Ce sont le seul moyen pour introduire de l'énergie au système. La modélisation de bonde graph a deux éléments sources : la source d'effort (Se) et la source de flux (Sf)(**fig1.10**). Comme les sources fournissent de l'énergie, le bond est conventionnellement orienté vers le système, c'est un bond sortant de la source.

$$\text{Sf} \xrightarrow{e} f$$

$$\text{Se} \xrightarrow{e} f$$

FIGURE 1.10 – Source d'effort et flux.

On représente les sources par Se ou Sf si elles sont indépendantes (pompe, gravité, courant d'alimentation ou tension,..), si par contre elles sont modulées par des variables externes (pompe commandée par exemple) on les désigne par Mseou MSf ("M" pour modulée)(**fig1.11**).

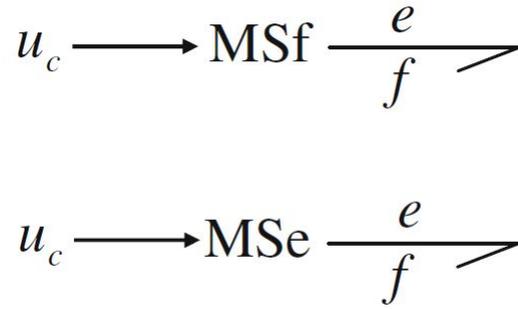


FIGURE 1.11 – Source d’effort et flux modulée.

### 1.4.6 Eléments de jonction

Afin de coupler les éléments R, I et C et construire l’architecture du système à modéliser on utilise les éléments notés 0,1, Tf et Gy.

### 1.4.7 Jonction "1", "0"

Pour exprimer les contraintes du système global modélisé, les éléments bond-graph (R, C, I) sont interconnectés par une jonction "0" lorsque les ports interconnectés ont un effort commun et par une jonction "1" si ils ont la même valeur du flux, les jonctions permettent de relier les éléments (en parallèle et en série). La représentation graphique des jonctions "0" et "1" est illustrée dans la (fig1.12).

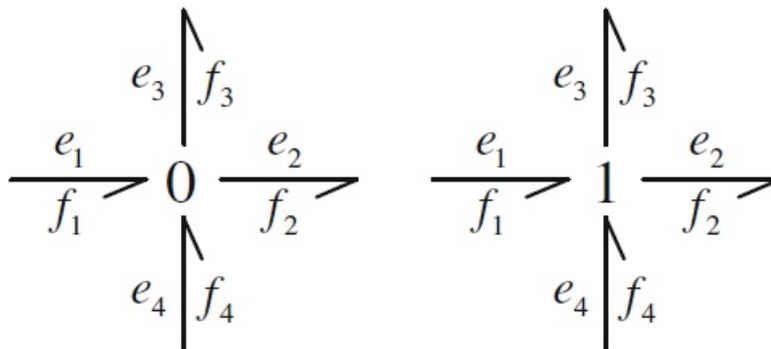


FIGURE 1.12 – Les jonctions “1” and “0” dans bond graph.

Dans toutes les jonctions, nous avons la conservation de l’énergie, qui peut être exprimée comme suit :

$$\sum_{i=1}^n f_i e_i = 0$$

L’application de toutes ces lois dans un modèle bond graph de l’exemple de la (fig1.12)

**Pour la jonction 0 :**

Égalité des efforts :  $e_1 = e_2 = e_3 = e_4$  .

Bilan des puissances :  $e_1 f_1 - e_2 f_2 - e_3 f_3 + e_4 f_4 = 0$  .

Somme algébrique des flux nulle :  $f_1 - f_2 - f_3 + f_4 = 0$

**. Pour la jonction 1 :**

Égalité des efforts :  $f_1 = f_2 = f_3 = f_4$  .

Bilan des puissances :  $e_1 f_1 - e_2 f_2 - e_3 f_3 + e_4 f_4 = 0$  .

Somme algébrique des flux nulle :  $e_1 - e_2 - e_3 + e_4 = 0$

La Jonction-0 d'effort commun : Elle relie les éléments soumis au même effort, ce qui signifie un circuit série en mécanique, même force , ou un circuit parallèle en électricité même tension et en hydraulique même pression, des exemples présentés respectivement dans la (fig1.13). La jonction-1 de flux commun : Elle associe des

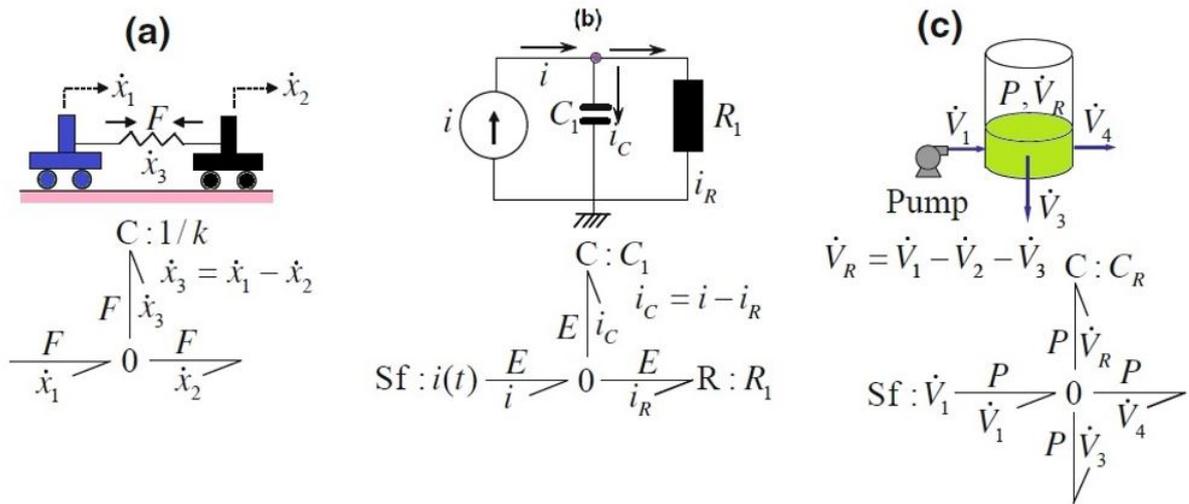


FIGURE 1.13 – Exemples de modèle bond graph des différents systèmes (jonction"0").

éléments ayant le même flux, ce qui signifie un circuit en série pour l'électricité même courant et en hydraulique même débit volumique, mais un circuit en parallèle pour mécanique même vitesse, des exemples présentés respectivement dans la (fig1.14).

### 1.4.8 Transformateur (TF) et gyrateur (GY) 2-port

#### Transformateur "TF"

Un transformateur TF est un élément à deux ports modélisant la transformation de puissance dans un même domaine, tels qu'un transformateur électrique, un système d'engrenage ou un bras de levier, représenté respectivement dans la (fig1.15) le transformateur est dit modulé Si le module " m " n'est pas constant, il est noté par "mTF".

Le transformateur conserve la puissance donc :

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

Alors les relations qui caractérisent le transformateur :

$$e_1 = m e_2, f_2 = m f_1$$

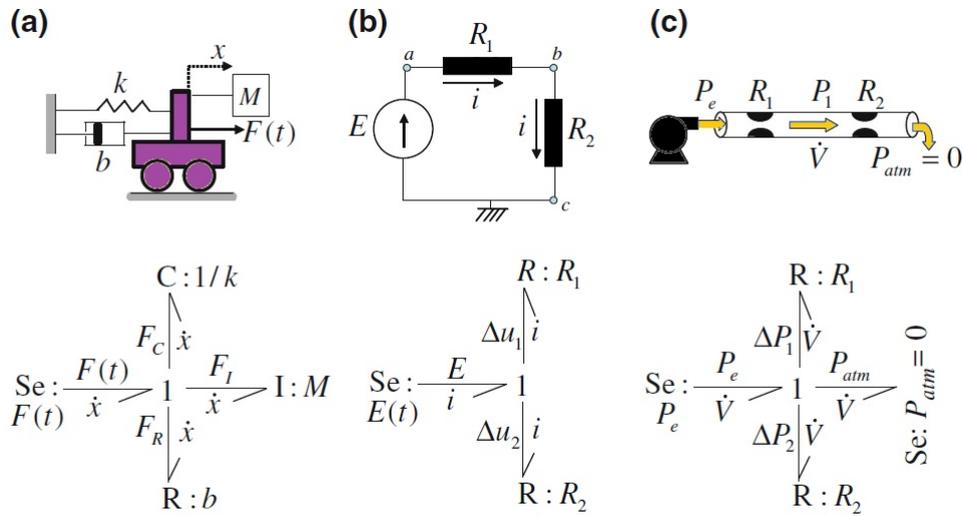


FIGURE 1.14 – Exemples de modèle bond graph des différents systèmes (jonction "1").

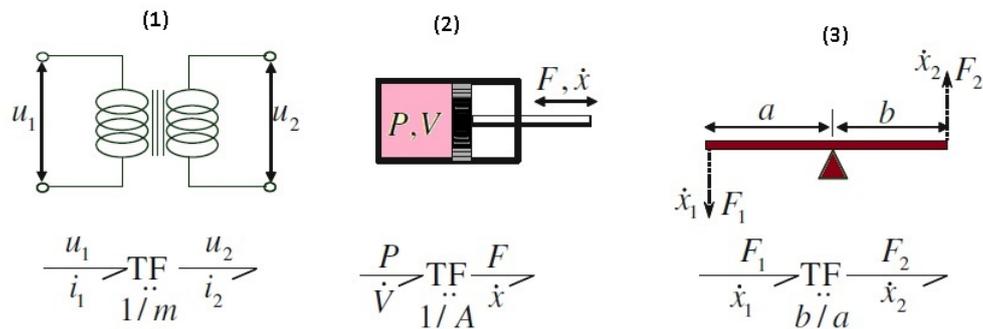


FIGURE 1.15 – TF. (1) : Transformateur électrique. (2) : Piston-hydraulique. (3) : Levier.

### Gyrateur "GY"

Le gyrateur est une autre sorte de transformateur, seulement qu'il transforme la puissance entre deux systèmes de natures différentes. Il est également conservateur d'énergie, il est régit par ses lois caractéristiques qui sont les suivantes :

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

Alors les relations qui les caractérisent le gyrateur :

$$e_1 = r f_2$$

$$e_2 = r f_1$$

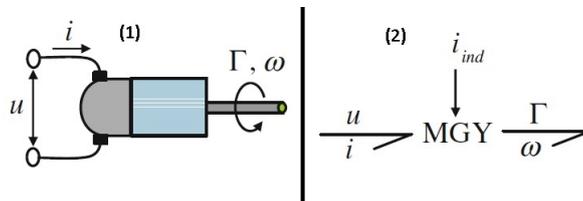


FIGURE 1.16 – (1) : Gyrateur. (2) : Gyrateur modulé.

Pour le gyrateur, " $r$ " est le coefficient de proportionnalité liant le courant " $i$ " et le couple  $\Gamma$  ( $\Gamma = r * i$ .) Si " $r$ " est variable, l'élément "GY" devient Gyrateur modulé (MGY)(fig1.16).

## 1.5 Liens d'information

Les composants du système de mesure, d'instrumentation et de contrôle sont dits actifs. Une alimentation externe est fournie aux ces composants actifs elle n'interfère pas avec les parties passives du système. L'énergie transférée par le signal est négligeable par rapport à celui échangé entre les composants physiques. Par exemple, amplificateur de puissance, capteur capacitif, etc.

Alors aucune puissance n'intervient dans la modélisation de système physique (puissance transmise négligeable), dans ce cas on n'utilise pas un lien de puissance mais un lien d'information représenté par une flèche entière, par exemple les capteurs ne consomment aucune puissance ils sont considérés idéaux ils mesurent la variable effort (De) ou flux (Df) ils sont représentés dans la (fig1.17).

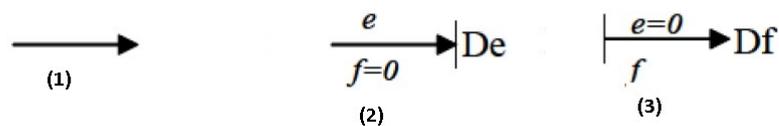


FIGURE 1.17 – Lien d'information (1), détecteurs d'effort (2) et de flux (3).

## 1.6 Causalités

Si nous devons simuler efficacement le comportement physique décrit par le modèle, nous devons décider comment les variables (effort et flux) doivent être calculées. Par conséquent, nous devons prendre une série de décisions de cause à effet, ce qui est décrit par la notion de causalité. Un trait sur le lien, appelé "trait causal" indique comment le chemin du flux d'information pour les variables  $e$  et  $f$  est simultanément déterminé sur un lien causal (fig 1.18).

Afin de comprendre l'aspect de causalité nous Considérons un système électrique

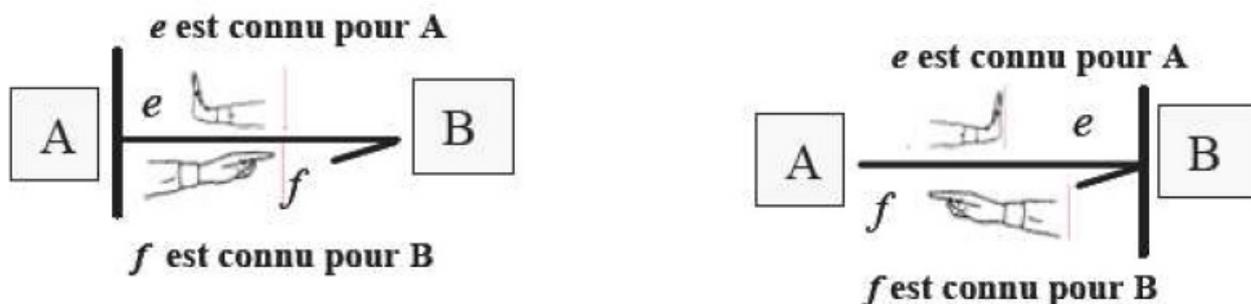


FIGURE 1.18 – La notion de causalité.

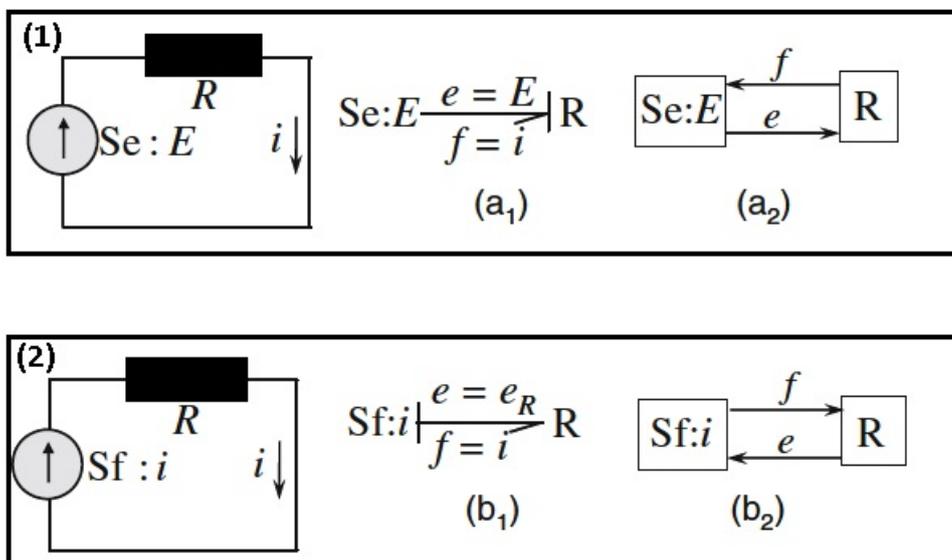


FIGURE 1.19 – Causalité dans Bond graph.

qui consiste en une source de tension  $E$  connectée à une résistance  $R$  (fig 1.19(1)). La tension  $E$  et le courant  $i$  sont des variables de puissance. Pour la source de tension,  $E$  est une variable de sortie et  $i$  est une variable d'entrée. Ainsi, nous avons une causalité fixe à la source. Par conséquent, pour la résistance, la source  $E$  est une variable d'entrée et  $i = E/R$  est une variable de sortie. Cette forme de calcul du modèle est représentée par le bond graph causal (fig 1.19(a1)). Le schéma fonctionnel correspondant est donné dans la (fig 1.19(a2)) :  $e$  est connu pour  $R$ .

Élément	Symbole	Équation causale	Bloc diagramme	Règle
Source d'effort Se	Se:e →	e donné		L'effort (ou flux) imposé par la source d'effort (ou de flux) est une donnée connue pour le système. <i>Règle : La causalité est obligatoire</i>
Source de flux Sf	Sf:f →	f donné		
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 <sub>1</sub> ). <i>Règle : Un seul trait causal près de la jonction 0.</i>
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 <sub>1</sub> ). <i>Règle : Un seul lien sans trait causal près de la jonction 1</i>
TF		$\begin{cases} e_1 = me_2 \\ f_2 = mf_1 \\ e_2 = \frac{1}{m}e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m}f_2 \end{cases}$		Un effort et un flux sont imposés au TF <i>Règle : Un seul trait près de TF</i>
GY		$\begin{cases} e_1 = rf_2 \\ e_2 = rf_1 \\ f_2 = \frac{1}{r}e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r}e_2 \end{cases}$		Deux flux ou deux efforts sont imposés au GY <i>Règle : Deux traits ou aucun trait près de GY</i>
C		$e = \Phi_C(\int f dt) = \Phi_C(q)$ $f = \frac{d}{dt}(\Phi_C^{-1}(e))$		Causalité préférentielle intégrale Causalité dérivée
I		$f = \Phi_I(\int e dt) = \Phi_I(p)$ $e = \frac{d}{dt}(\Phi_I^{-1}(f))$		Causalité préférentielle intégrale Causalité dérivée
R		$e = \Phi_R(f)$ $f = \Phi^{-1}_R(e)$		Causalité résistance Causalité conductance

FIGURE 1.20 – Les différentes règles de causalité des éléments de bond graph.

Dans la (fig 1.19(b1)), b1 nous avons une source de courant. Le courant fournit I représentant le flux  $f$  est une entrée pour  $R$  et la tension  $Er = Ri$  est la variable d'effort en est une sortie de  $R$ . Le schéma fonctionnel correspondant est donné à la (fig 1.19(b2)). Les formes causales des différents éléments bond graph, leurs équations et les schémas fonctionnels, ainsi que les règles d'attribution de la causalité, sont donnés dans (Tab 1.20).

## 1.7 Chemin causal

Un chemin causal dans une structure de jonction (0,1,T F ou GY) est une alternance de liens et d'éléments de base ( $R$ ,  $C$  ou  $I$ ), appelés nœuds tels que tous les nœuds ont une causalité complète et correcte, et deux liens du chemin causal ont en un même nœud ont des orientations causales opposées.

le chemin causal est simple si il est parcouru en suivant la même variable (effort ou flux)(fig 1.21).

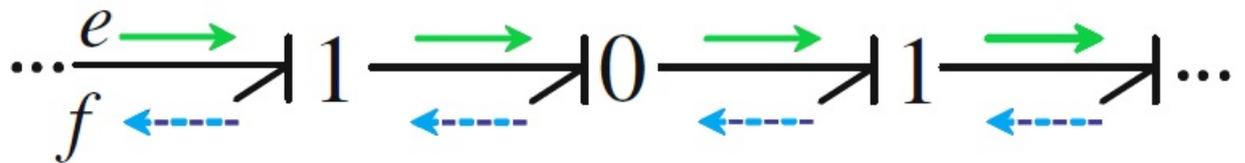


FIGURE 1.21 – Chemin causal simple.

Par contre un chemin causal est mixte si on change la variable lors du parcours. Par Exemple en présence d'un GY (fig 1.22).

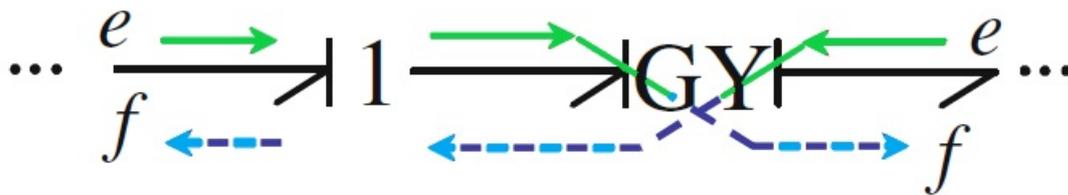


FIGURE 1.22 – Chemin causal mixte.

## 1.8 Conclusion

L'outil bond graph à vocation pluridisciplinaire est une approche unifiée et adapté pour les processus industriels qui sont caractérisés par l'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes de différentes natures et combinent des éléments technologiques qui mettent en œuvre des lois de différentes disciplines. Ces systèmes sont décrits généralement par des équations différentielles non linéaires, l'utilisation des méthodes classiques pour trouver les équations et les variables d'état est compliquées. Par conséquent leur modélisation impose une approche structurée qui permet de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'état, ces variables sont déduites directement du modèle graphique de bond graph. Dans ce chapitre nous avons présenté les propriétés structurelles et causales de langage bond graph, ensuite dans le chapitre suivant utilisé ses propriétés structurelles et son architecture fonctionnelle dans le diagnostic pour la génération des relations de redondance analytique et le placement de capteurs afin de pouvoir détecter et localiser un élément défaillant à partir de l'information disponible sur le système.

# Chapitre 2

## Diagnostic des systèmes

## 2.1 Introduction

Dans le passé, les systèmes de production automatisés ont aidé les opérateurs à contrôler le processus afin d'améliorer la qualité du produit fini, la sécurité et l'efficacité des unités industrielles.

L'objectif principal était d'augmenter la productivité en établissant des commandes performantes. Récemment, un autre défi est apparu, il concerne l'automatisation des procédures de diagnostic à l'aide d'une commande intelligente. L'amélioration de la sécurité des processus repose essentiellement sur les procédures de détection et d'isolement des défauts (FDI). Les algorithmes FDI sont basés sur le même principe : la comparaison entre le comportement réel du processus et un comportement de référence fourni par un modèle en fonctionnement normal. La contrôlabilité (capacité à détecter et à isoler les défauts) du système dépend principalement de l'architecture d'instrumentation mise en oeuvre [6].

Le but de la maintenance préventive est de ne pas subir l'effet d'une défaillance donc on doit déterminer l'ensemble des actions à appliquer sur le procédé .

Donc on distingue deux types de maintenance possibles : la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle .

Pour la maintenance préventive systématique , les activités de maintenance sont planifiées selon un échancier basé sur le temps ou l'unité d'usage . Après chaque intervention, les éléments sont remplacés même si l'élément n'est pas défaillant.

Dans la maintenance préventive conditionnelle les éléments ne sont remplacés que si nécessaire, L'intervention de maintenance est déclenchée s'il existe une état de dégradation de l'élément considéré.

Dans la suite de notre travail, on utilise la maintenance conditionnelle, basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système dans le temps. Donc, on est obligé d'introduire un système de diagnostic qui nous permet de détecter un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive, lorsque il existe un faible écart par rapport à une caractérisation du fonctionnement nominal . Lorsqu'il est appliqué à des systèmes industriels, une des difficultés du diagnostic réside dans la grande variété de défauts possibles, tant du point de vue de leur source que de leur amplitude et de leur fréquence.

## 2.2 De la maintenance préventive au diagnostic

La maintenance préventive a pour but de déterminer toutes les actions à effectuer dans le processus afin de ne pas être affectée par la défaillance, A cet effet, deux méthodes possibles peuvent être distinguées : la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle.

Dans le premier cas, planifiez les activités de maintenance et effectuez les activités de maintenance en fonction du temps ou des plannings unitaires. Lors de ces interventions, l'élément sera remplacé même s'il n'est pas défectueux (**fig 2.1**).

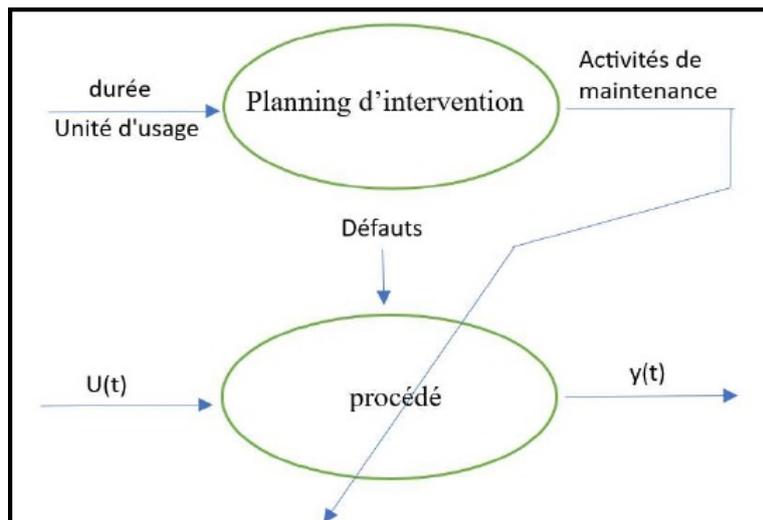


FIGURE 2.1 – Maintenance préventive systématique.

Dans le second cas, les activités de maintenance sont déclenchées sur la base d'informations reflétant l'état de dégradation de l'équipement considéré. Dans ce cas, ne remplacez l'élément que si nécessaire.

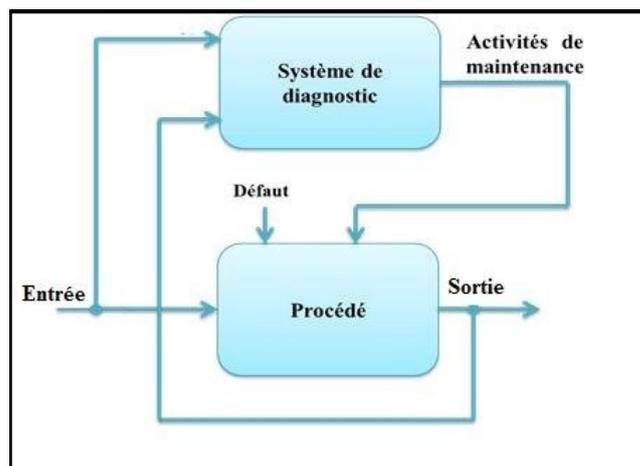


FIGURE 2.2 – Maintenance préventive conditionnelle.

La première méthode est également la plus ancienne, qui a attiré l'attention de la communauté scientifique. Sa mise en oeuvre est bien maîtrisée et l'on dispose pour cela d'une méthodologie générale. La deuxième méthode est plus délicate dans la mise en oeuvre pratique. Cela peut s'expliquer par une variété de méthodes possibles et la diversité des informations nécessaires à son développement.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la maintenance conditionnelle, qui est basée sur une surveillance continue de l'évolution du système considéré. Ce type de méthode nécessite la conception d'un système de diagnostic qui permet de détecter précocement les petits écarts par rapport aux caractéristiques du système en fonctionnement normal pour éviter les pannes avant leur arrivée.

La quantité des grandeurs surveillées peut être très large : un courant électrique , une température , une pression , un pourcentage de particule dans l'huile , un niveau de vibration et bien d'autres encore . pour surveiller une grandeur donnée nous devons effectuer des mesures régulièrement dans le temps. Pendant le fonctionnement de l'équipement, deux types de changements se produisent pour la grandeur à surveiller : des fluctuations autour de sa valeur nominale qui sont dues aux diverses perturbations agissant sur le système considéré, la dérive peut être causée par le phénomène d'usure, phénomène de dégradation progressive ou à cause des conditions environnementales anormales . Le suivi de cette grandeur nous permet de vérifier qu'elle ne s'écarte pas , de façon significative , de sa valeur nominale . Dans le cas d'une déviation jugée anormale (étape de détection d'un défaut ) , il s'agit de localiser l'origine de cette anomalie ( étape de diagnostic du défaut ), puis de prendre, en conséquence, les mesures qui s'imposent pour un retour à la normale du fonctionnement du système ( étape de prise de décision ). Ces différentes étapes seront effectuées à l'aide de ce que nous appellerons un système de diagnostic. Par conséquent, le système de diagnostic doit être en mesure d'effectuer les trois étapes de base suivantes : la détection d'un défaut, le diagnostic du défaut, la prise de décision de revenir à la normale. Toute méthode de diagnostic repose sur l'analyse d'un certain nombre d'indicateurs ou de symptômes qui peuvent caractériser l'état de fonctionnement (état de santé) du système. À la suite de l'analyse, une décision a été prise dans le cadre de la maintenance conditionnelle de ramener l'installation jugée défectueuse à la normale.

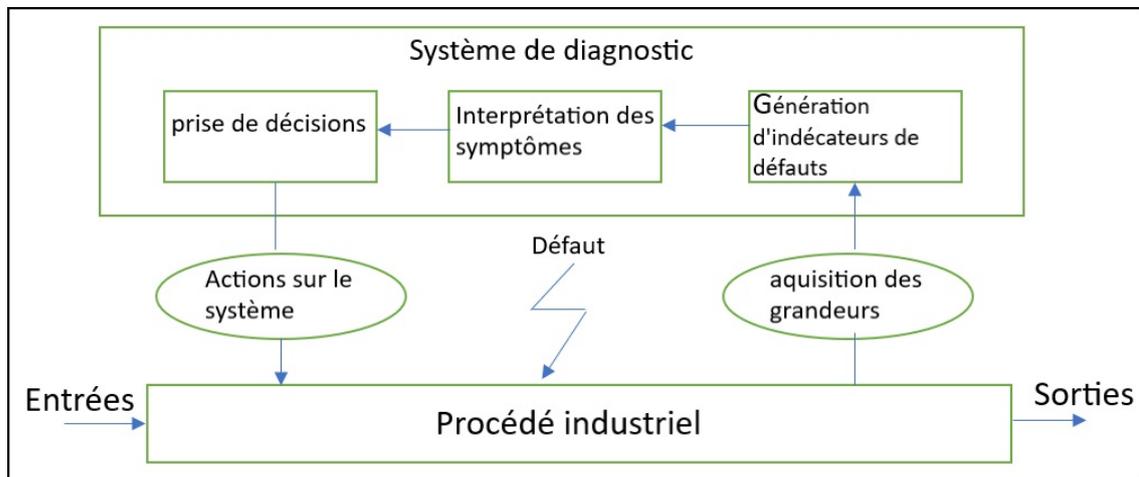


FIGURE 2.3 – Structure générale d'un système de diagnostic.

## 2.3 Définitions

### 2.3.1 Fonctionnement normal d'un système

un système est en fonctionnement normal lorsque les variables qui le caractérisent ( variables d'états, variables de sorties, variables d'entrées, paramètres du système) se convergent au voisinage des valeurs nominales.

### 2.3.2 Défaut

Un défaut peut être défini comme un processus anormal ou comme une imperfection physique liée à la conception ou la mise en œuvre du dispositif. On dit qu'il existe un défaut si il y a une déviation d'une variable observée ou d'un paramètre en dehors d'un intervalle bien défini, un défaut peut donner la naissance à une défaillance [7].

### 2.3.3 Défaillance

On dit qu'on est en présence d'une défaillance si le système du procédé ne peut pas accomplir certaines fonction qui lui sont attribuées. Donc on peut définir une défaillance comme une anomalie fonctionnelle au sein d'un système [8].

### 2.3.4 Panne

On dit qu'un dispositif est en panne lorsque il est incapable d'accomplir sa fonction, lors de l'apparition d'une défaillance on déclare que le dispositif est en panne donc une panne résulte toujours d'une défaillance [7].

### 2.3.5 Résidu

Le résidu est un indicateur de faute qui exprime la différence entre les informations disponibles et les informations fournies par le modèle « qui décrit le fonctionnement du processus » [9].

### 2.3.6 Perturbation

C'est une entrée non contrôlée , elle influe sur le comportement du système.

### 2.3.7 Les différents étapes de surveillance

Pour accomplir la fonction du surveillance nous devons respecter certaines étapes qui sont données dans la figure suivante (**fig 2.4**) [8] :

### 2.3.8 Génération de résidus

Cette phase est réalisée par deux grandes étapes.

#### 2.3.8.1 Acquisition de données

Dans cette phase, on a besoin d'acquérir des informations sur le fonctionnement du système à surveiller, alors nous devons utiliser des capteurs qui vont mesurer les

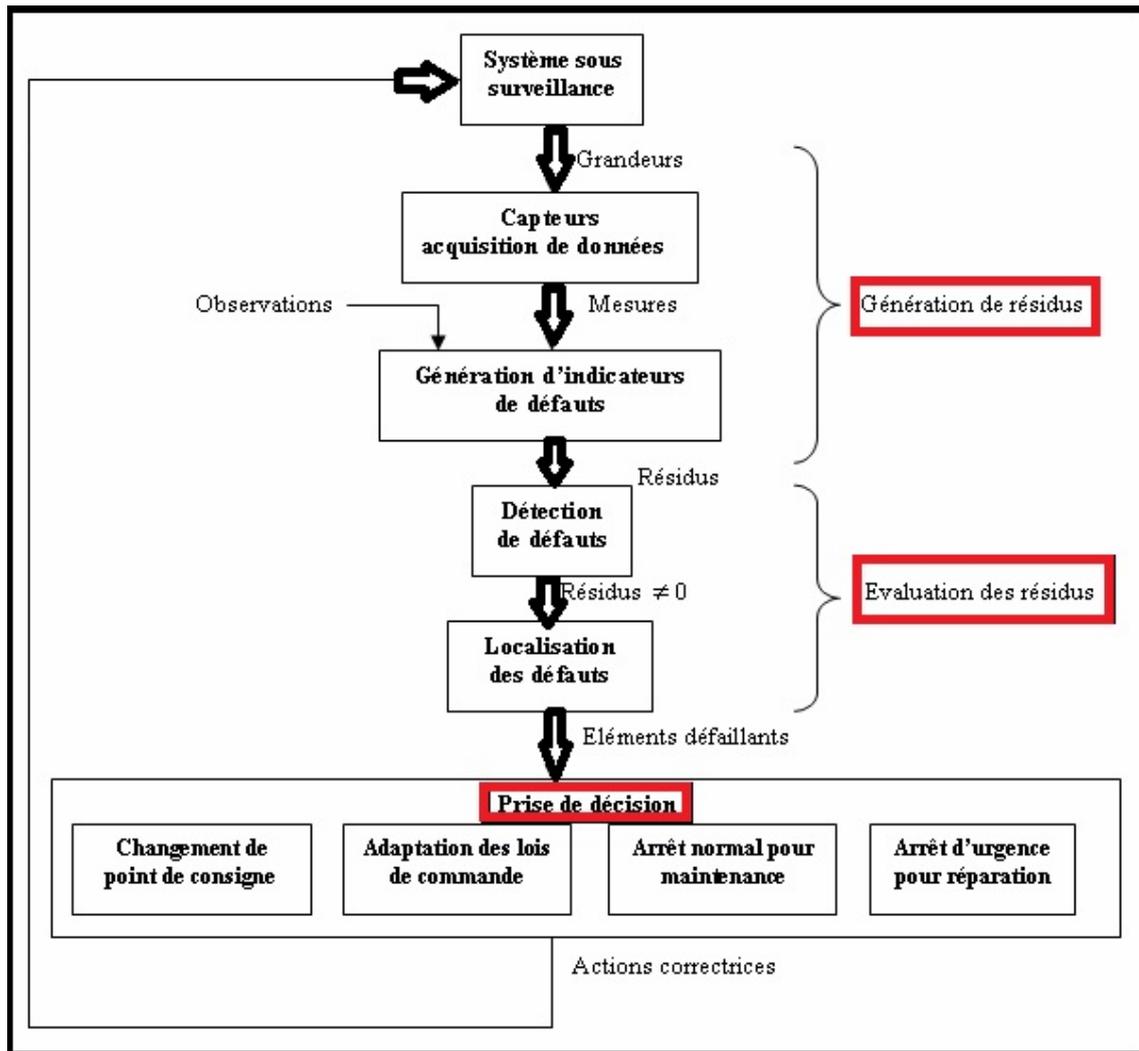


FIGURE 2.4 – Structure générale d'un système de diagnostic.

différents variables des processus.

### 2.3.8.2 Elaboration d'indicateurs de défauts

Dans cette étape, nous allons comparer le fonctionnement réel du système qui a été généré dans l'étape précédente à un comportement de référence ( des observations issues des opérateurs en charge de l'installation) , cette comparaison nous donne un indicateur de défaut (résidu), cet écart de comportement doit être idéalement nul en cas d'absence de défauts et différent de zéro dans le cas contraire.

### 2.3.9 Evaluation de données

Cette phase se divise en deux étapes la détection et la localisation.

### 2.3.9.1 La détection

La fonction principale de cette étape est de décider si le système se trouve dans un état de fonctionnement normal. Dans la pratique, le problème est plus compliqué que ça, car le système à surveiller et les grandeurs mesurées sont toujours soumises à des perturbations non mesurables, donc le modèle est souvent imparfait par conséquent, on ne peut pas conclure sur la non nullité des résidus, pour cela on fait appel aux tests statistiques, ou d'une façon plus simple la réalisée par la méthode du seuillage [10].

### 2.3.9.2 La localisation

Cette étape s'exécute juste après qu'il ait une détection d'un défaut, à partir des résidus non nuls statiquement détectés dans la phase de détection, on doit localiser le défaut c'est-à-dire trouver l'élément défaillant, On appelle signature d'un défaut l'effet de celui-ci sur un ou plusieurs résidus, si on dispose de la signature de défaut nous pouvons remonter aux causes (l'élément défaillant) à partir des effets (résidus non nuls).

### 2.3.10 Prise de décision

Dans cette étape on doit décider la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées d'un système sous surveillance, Après avoir constaté que le système ne fonctionne pas correctement. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires pour que le système revienne au fonctionnement normale de l'installation. Les actions peuvent être : l'adaptation paramétrique de la loi de commande dans le but de conserver les performances de l'installation, un changement de point de consigne afin de compenser l'effet d'un défaut, une procédure normale d'arrêt ou encore un arrêt d'urgence en cas de détection d'une anomalie sévère mettant en danger les personnes ou le matériel, . . . etc.

## 2.4 Classification des méthodes de diagnostic

Dans cette partie, nous fournissons une classification des méthodes de diagnostic actuelles, et nous présentons les méthodes les plus utilisées. Dans l'industrie toutes les méthodes anciennes sont basées sur la redondance matérielle, on trouve ces méthodes le plus souvent, dans les installations à hauts risques, par exemples les installations nucléaires et chimiques, l'inconvénient de ces méthodes est le coût et le poids des composants supplémentaires.

Les chercheurs ont développé des méthodes distinctes qui répondent à tous les types de systèmes, les raisons qui les ont poussés à cela est la diversité des équipements industriels et leurs natures qui diffèrent d'un système à un autre et l'incapacité à trouver une méthode universelle pour les différents systèmes .

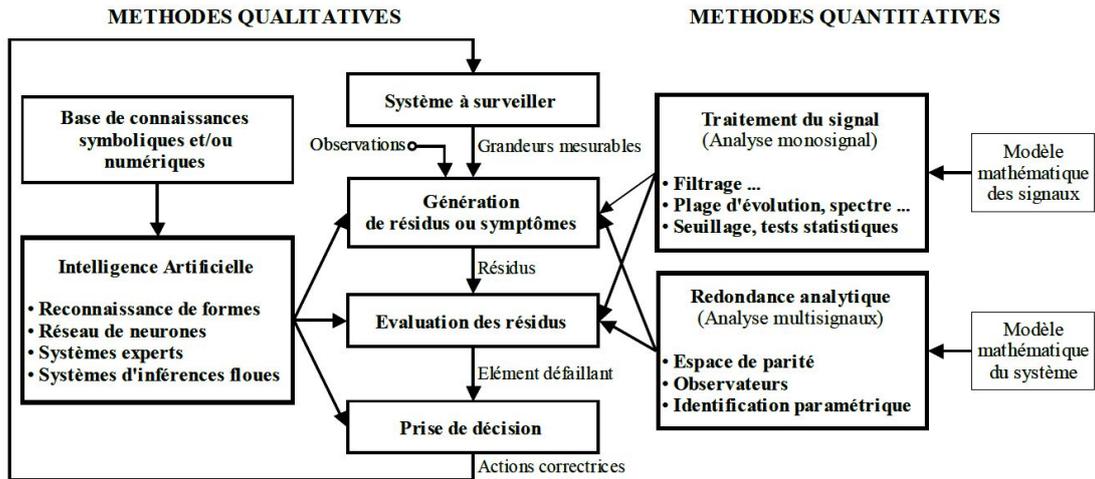


FIGURE 2.5 – La classification des méthodes de diagnostics.

Cependant, nous avons dû balayer un large éventail de techniques actuellement utilisées en surveillance, à savoir [8]

- Méthodes sans modèle analytique basé sur l'intelligence artificielle.
- Méthodes basées sur les modèles analytiques.

La première catégorie de méthodes se divise en deux sous-catégories, la première correspond aux statistiques de traitement du signal qui sont généralement qualifiés d'outils de traitement de bas niveau, parce qu'ils sont en contact direct avec le signal capteur, et généralement ils ne servent que pour la génération d'alarme brutes, sans aucune information sur leur signification. La deuxième sous-catégorie est orientée vers la communication avec l'opérateur, cette sous-catégorie utilise l'intelligence artificielle, et sert comme outil de base pour l'aide à la décision, les méthodes de cette catégorie sont plus efficaces, car elles sont capables de détecter, d'interpréter et de diagnostiquer les défauts.

La deuxième catégorie se base sur le modèle analytique du système à surveiller et utilise généralement des techniques de l'automatique.[11]

## 2.4.1 Méthodes sans modèle analytique

Nous pouvons trouver de nombreuses méthodes qui ne sont pas basées sur un modèle analytique, où chacune de ces méthodes est dédié à un domaine spécifique.

### 2.4.1.1 Analyse fréquentielle

La première méthode de traitement du signal est basée sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est largement utilisée pour détecter des phénomènes périodiques comme dans l'analyse des vibrations. Le contenu spectral des signaux est utilisé pour détecter les défauts dans les machines électriques tels que les barres cassées sur le rotor des machines asynchrones, les roulements dégradés, les décentrages

et les courts-circuits dans les bobinages. Les recherches actuelles se concentrent spécifiquement sur les méthodes qui ont été adaptées pour la caractérisation des signaux non stationnaires : temps fréquence, temps échelle , cela est dû grâce aux développement des applications à vitesse variable .

Les signaux ici sont d'abord analysés dans l'état de fonctionnement normal, puis tout écart par rapport aux propriétés de fréquence du signal est lié à une panne (le problème est que la modification du point de consigne modifie les propriétés de fréquence et ce n'est pas un défaut).L'analyse spectrale des signaux des capteurs permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation surveillé . Cette méthode se distingue par une application pratique relativement simple, mais l'inconvénient est qu'elle est quelque peu sensible au bruit de mesure lorsqu'il coïncide avec la région de fréquence pertinente.De plus, un échantillonnage fréquent est nécessaire pour renouveler le signal de départ tout en réduisant la perte de fréquence [9, 12, 13].

#### 2.4.1.2 Redondance matérielle

Le principe de redondance permet de mettre à disposition plusieurs ressources pour effectuer la même fonction ou la même tâche. Certaines redondances permettent d'intervenir sur le processus et de modifier son comportement, tandis que d'autres permettent à une ressource donnée de multiples façons d'obtenir les mêmes informations.

La redondance matérielle ou physique est l'utilisation de plusieurs ressources pour une précision elle-même dépend du nombre, la précision et l'emplacement sur le système.Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie car sa fiabilité des dispositifs de contrôler ou de détection défaut à l'aide de variables d'état dépend directement de la précision du reconstituer d'état utilisé. Cette méthode est sanctionnée par le poids, l'énergie consommée, la taille et le coût d'achat et de maintenance. Il est donc principalement destiné aux cas où la continuité du service est obligatoire (espace aérien et nucléaire).[7, 8]

#### 2.4.1.3 Capteur spécifiques

Il existe des capteurs particuliers qui peuvent également être utilisés pour nous fournir directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant . ces capteurs spécifiques sont les plus utilisés dans les installations industrielles, on cite comme exemple les capteurs de fin de course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils . . . [9].

#### 2.4.1.4 Réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont utilisés quand la connaissance sur le système à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle du procédé est impossible, l'utilisation d'un modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Leur application dans les domaines de la modélisation, de la commande

et du diagnostic a largement été rapportée dans la littérature.

L'utilisation des RNA se fait en deux phases d'une manière générale. La première phase, la synthèse du réseau a réalisée et comprend plusieurs étapes : le choix du type de réseau, du type de neurones, du nombre de couches, des méthodes d'apprentissage. L'apprentissage permet alors, sur la base de l'optimisation d'un critère, de reproduire le comportement du système à modéliser. Il consiste en la recherche d'un jeu de paramètres (les poids) et peut s'effectuer de deux manières : supervisée (le réseau utilise les données d'entrée et de sortie du système à modéliser) et non supervisée (seules les données d'entrée du système sont fournies et l'apprentissage s'effectue par comparaison entre exemples) quand les résultats d'apprentissage obtenus par le RNA sont satisfaisants, il peut être utilisé pour la généralisation. Il s'agit ici de la deuxième phase où de nouveaux exemples qui n'ont pas été utilisés pendant l'apprentissage sont présentés au RNA pour juger de sa capacité à prédire les comportements du système modélisé [9, 8].

Comme mentionné ci-dessus, les RNA peuvent être utilisés pour la surveillance des défaillances. Leur faible sensibilité aux bruits de mesure, leur capacité à résoudre des problèmes non linéaires et multi variables, à stocker la connaissance de manière compacte, à apprendre en ligne et en temps réel, sont en effet autant de propriétés qui les rendent attractifs pour cette utilisation. Leur utilisation peut se faire en trois niveaux :

- Modèle du système à surveiller en état normal et générer un résidu d'erreur entre les observations et les prédictions.
- Système d'évaluation de résidus pour la surveillance.
- Système de détection en une étape (en tant que classificateurs).

#### 2.4.1.5 Systèmes d'inférence flous

Il existe trois étapes essentielles pour la mise en œuvre d'un système d'inférence flou (SIF) pour la diagnostic, comme indiquer sur le schéma suivant :

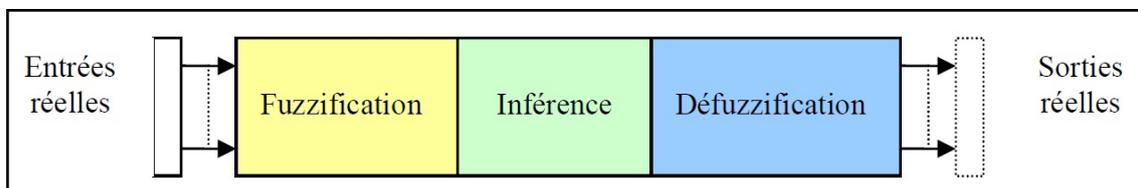


FIGURE 2.6 – Les étapes de la mise en œuvre d'un système d'inférence flou (SIF).

##### **Etape de fuzzification :**

Dans cette première étape nous devons définir des ensembles flous pour les variables d'entrées et de sorties, nous devons connaître à priori pour chacune de ces variables l'intervalle de définition, le nombre d'ensembles flous et les formes des fonctions d'appartenance.

### Étape d'inférence :

Dans cette étape on établit les règles floues qui permettent d'aboutir à la sortie en fonction des valeurs des variables d'entrées.

Les règles floues nous permettent de lier la variable de sortie aux variables d'entrée pour tirer des déductions ou des conclusions.

Après avoir éditer les règles, maintenant nous devons calculer les degrés d'appartenances de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés.

Chaque règle doit être composée de prémisse liée par les opérateurs ET,OU et donne lieu à une implication par l'opérateur ALORS.

La dernière étape est l'agrégation de ces règles , c'est une opération qui doit amener à une seule valeur de la variable de sortie après la défuzzification.

### Étape défuzzification :

Le but de cette étape est de transformer le résultat de la variable linguistique issue du système d'inférence flou en valeur numérique. il existe trois grandes méthodes pour la réaliser :

- La méthode du maximum.
- La méthode de la moyenne pondérée.
- La méthode des centroïdes est la meilleure.

En effet, ils explicitent la connaissance experte sous la forme de règles d'inférence, tout en classant les entrées et les sorties de façon qualitative. Ils effectuent également des calculs sur la base de poids et de fonctions fixées de façon à faire correspondre des comportements observés sans qu'il y ait de signification physique explicite. Le mode de fonctionnement d'un SIF permet donc de manier ensemble des quantités et des symboles pour faire des calculs et d'expliquer le cheminement parcouru pour obtenir un résultat. D'autre part, les tâches de surveillance reposent sur des quantités heuristiques difficiles à formaliser dans un modèle mathématique :

- La corrélation entre des variables très différentes.
- Des observations qualitatives (par exemple : couleur, bruit).
- Des intuitions liées à des statistiques (par exemple tel appareil pose plus de problèmes qu'un autre...) difficilement quantifiables mais pourtant très efficaces [14].

#### 2.4.1.6 Reconnaissance de formes

La fonction principale fournie par la méthode de reconnaissance de formes est d'aider les opérateurs humains à réaliser automatiquement la classification des signatures extraits d'un système, cela par les comparer avec des formes types afin d'associer un ensemble de mesures à des états de fonctionnement. On peut la déviser en deux classes, la première classe est destinée à la détection tandis que la deuxième

classe est destinée au diagnostic.

Pour les méthodes de détection il existe plusieurs méthodes, on peut citer les méthodes par carte de contrôle, les méthodes par analyse en composantes principales et les méthodes par projection dans les structures latentes. Pour les méthodes de diagnostic, on peut citer toutes les méthodes de classification [15].

La méthode de reconnaissance de forme réunit toutes les méthodes permettant la classification automatique d'objets, par rapport à sa ressemblance à un objet de référence. Le but de cette opération est de décider après avoir fait une comparaison par rapport à un objet, à quelle forme celui-ci a plus de ressemblance, pour définir une forme on a besoin de «  $p$  » paramètres, appelés descripteurs, ses derniers sont les composants d'un vecteur forme que nous noterons  $(X)$ , pour résoudre un problème de reconnaissance de forme nous avons besoin de :

- Définir avec précision les  $l$  classes entre les quelles va s'opérer la décision. Cette étape est spécifique au problème posé car elle est liée à la nature des objets à classer.
- Faire un choix pertinent du jeu de caractères pour la discrimination des vecteurs de formes. Malheureusement, pour choisir les paramètres les plus appropriés à la résolution d'un problème donné il n'existe pas de méthodes systématiques permettant de faire ceci. Par conséquent, un choix adéquat des paramètres de forme nécessite une bonne connaissance du problème à résoudre. On note que le nombre de caractères fixe la dimension de l'espace de représentation. Ceci peut représenter une contrainte sévère dans un contexte de traitement en temps réel des objets à classer.
- Pour l'affectation d'une forme observée à l'une des classes présentes nous devons élaborer un classificateur. généralement on établit Ce dernier à l'aide d'un ensemble d'apprentissage constitué de formes pour lesquelles on connaît l'appartenance aux différentes classes.

### 2.4.2 Méthode avec modèles analytiques

Dans cette partie nous allons nous concentrer sur le diagnostic basé sur un modèle physique qui consiste à estimer les variables mesurées à l'aide d'un modèle mathématique. le modèle est censé décrire le comportement dynamique du système à surveiller, l'existence d'un écart entre le comportement prévu par le modèle et le comportement mesuré (réel) traduit l'apparition d'un ou de plusieurs défauts comme résidus. Afin de détecter le moment de l'apparition du défaut, il est nécessaire de comparer les résidus aux seuils de détection.

La plupart des méthodes de détection et de diagnostic en ligne s'appuient sur les mesures. Il existe des méthodes qui utilisent plus de connaissances que celles apportées par les seuls capteurs physiques.

Il existe plusieurs méthodes de détection utilisant des modèles mathématiques, parmi ces méthodes nous trouverons principalement l'espace de parité, les observateurs l'estimation paramétrique, et par bond graph que nous allons utiliser dans ce travail .

#### 2.4.2.1 Espace de parité

La méthode de diagnostic par espace de parité nous permet la vérification et la comparaison entre les relations mathématiques du système à surveiller et les mesures issues des capteurs et les entrées connues (consigne, signale de commande. . . ).

Une relation de redondance analytique est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. Après La génération de telles relations ça sera facile d'engendrer des résidus. Pour la détection de défauts basée sur l'utilisation de modèles, un résidu est un signal temporel, en fonction des entrées et des sorties du processus, indépendant (le plus possible) du point de fonctionnement de celui-ci. En l'absence de défauts, ce résidu est statistiquement nul. Lors de l'apparition d'un défaut, son amplitude évolue de manière significative.

L'espace de parité est l'approche la plus classique. Les relations de parité utilisent la redondance directe au moyen de relations algébriques statiques liant les différents signaux ou la redondance temporelle issue de l'utilisation de relations dynamiques. Le terme « parité » a été emprunté au vocabulaire employé pour les systèmes logiques où la génération de bits de parité permet la détection d'erreur. [15].

#### 2.4.2.2 Observateurs

Un observateur est un modèle représenté sous forme de représentation d'état. Pour générer des résidus à l'aide d'une estimation d'état à l'aide d'observateur, nous devons reconstruire l'état, en prenant en compte la sortie du processus et l'entrée de commande et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée parce qu'elle donne la possibilité de la conception de générateurs de résidus flexibles [13, 9].

#### 2.4.2.3 Estimation paramétrique

La méthode d'estimation paramétrique considère qu'un défauts peut influencer sur les paramètres et non pas uniquement sur les variables du système physique, comme c'est le cas des observateurs. Le principe de cette approche consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé. L'estimation paramétrique a l'avantage de fournir l'information sur l'importance des déviations. L'un des inconvénients majeurs de cette méthode est la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. dans le cas de procédés dangereux ceci pose donc des problèmes dans la pratique. De plus, les relations entre paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de

façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus.

#### 2.4.2.4 Bond Graph

Un modèle Bond Graph est représenté généralement par les éléments bond graphs usuels (R, C, I, et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux), les sources peuvent être simples ( $S_e, S_f$ ), ou commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur dites modulées ( $MS_e, MS_f$ ). Les capteurs et le système de commande forment le système d'information [16].

Dans la surveillance par Bond Graph il existe deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie (qui peut être formée par le processus et l'ensemble des actionneurs), et la seconde représente les signaux (le système d'information, qui est composé par les capteurs et le système de régulation).

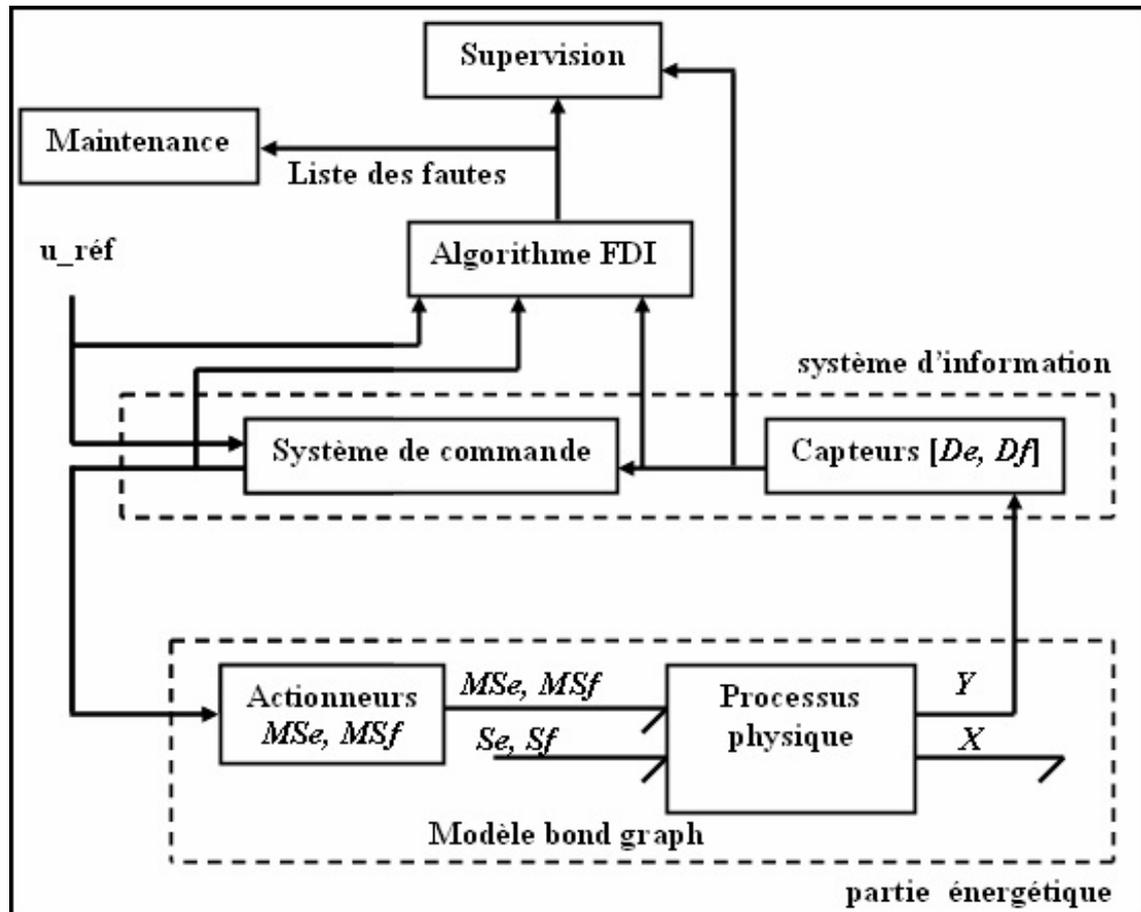


FIGURE 2.7 – Représentation bond graph d'un système de surveillance.

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) qui est utilisé dans les blocs diagrammes classiques.

C'est une méthodologie particulièrement adaptée au développement de modèles de systèmes multidisciplinaires pouvant être utilisés pour la surveillance basée sur Bond Graph. de nombreuses recherches ont été consacrées à l'application de Bond Graph comme un moyen de surveillance FDI basé sur un modèle avec une approche qualitative et quantitative.

Pour l'approche qualitative basée sur le Bond Graph, un certain nombre d'approches ont été proposées en exploitant les informations causales dans un Bond Graph et en utilisant des graphiques arborescents ou des graphiques causaux temporels.

Pour l'approche quantitative basée sur Bond Graph utilisent des RRAs, cette approche se base sur des lois physiques, donc elle exige une grande connaissance sur le système. Récemment, cette approche a été appliquée à divers systèmes tels qu'un générateur de vapeur industriel, un réacteur chimique industriel, un banc d'essai de robot mobile ou un véhicule autonome intelligent.

## 2.5 Diagnostic à base de Bond Graph

La surveillance en ligne n'est pas bien développée par contre le contrôle et la régulation industrielle sont très maîtrisés dans les industries. L'ambiguïté dans sa définition la réduit généralement à des simples tâches pour la surveillance des paramètres (appelés monitoring) ou de gérer les alarmes via un seuillage de variables. L'amélioration de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement du système dépend essentiellement de l'algorithme de détection et d'isolement des défauts en ligne, connu en anglais sous le nom de "Fault Detection and Isolation" (FDI).

La méthode Bond Graph est un langage de modélisation graphique multidisciplinaire et unifié qui s'est avéré être un outil de diagnostic pratique et utile dans la diagnostic, en particulier dans cette perspective. De plus, les propriétés causales et structurelles des Bond Graph sont utiles pour la génération d'indicateurs de défaut de manière systématique et générique. Cependant, dans les tâches de supervision, les opérateurs humains ne considèrent pas le processus en cours en termes de modèle de comportement mathématique, mais en termes de fonctions qu'il remplit. Cependant, dans les tâches de supervision, l'opérateur ne considérera pas le processus actuel sur la base du modèle de comportement mathématique, mais considérera les fonctions qu'il remplit. Pour que l'opérateur ait une compréhension claire de l'organisation fonctionnelle du système et pour estimer la capacité du système à atteindre ses objectifs, il est très utile de fournir des outils de modélisation fonctionnelle à l'opérateur. En plus de son ambiguïté et de son subjectivisme, un inconvénient de la représentation fonctionnelle est qu'elle ne décrit pas la fonction du système à l'exception des buts et des fonctions, sans tenir compte du comportement physique et dynamique. Par

conséquent, la relation entre Bond graph et le modèle fonctionnel est très nécessaire.

Pour une représentation avec l'approche Bond graph ,nous pouvons dire que il existe deux parties essentielles : la première est concernée par le transfert de puissance et d'énergie ( formée par le processus et l'ensemble des actionneurs ) , alors que la deuxième partie concerne les signaux ( le système d'information, c'est à dire les capteurs et le système de régulation ) . un modèle Bond graph représente la partie énergétique du système, un processus est généralement représenté par les éléments habituels du Bond graph R, C, I, et les jonctions . Les actionneurs ( source électrique, source thermique, ... ) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux ) et ces sources la pouvant être simples ( Se,Sf) ou modulées ( MSe, MSf) qui veut dire commandé par un signal externe fourni par le contrôleur ou l'opérateur . le système d'information est formé par les capteurs et le système de commande . Il existe deux principales méthodes pour la surveillance du Processus par Bond graph : méthode quantitative et méthode qualitative.

### 2.5.1 L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph

Contrairement aux représentations des connaissances conventionnelles qui permettent à divers outils (schémas fonctionnels, équations différentielles, etc.) de décrire la structure et l'état du système, cette approche ne nécessite pas de modèle très précis , les Bonds graphs qualitatifs ne décrivent explicitement que la localisation des composants du système et leurs interconnexions. Par rapport à la méthode quantitative, la surveillance basée sur Bond graph qualitatif devient plus simple car elle ne nécessite pas de modèle précis. [17]

La construction de ces modèles qualitatifs n'a pas besoin de considérer les paramètres du système, Ils sont basés sur l'ensemble  $[1][+][0][-][-1][?]$  Valeurs qualitatives définies (pas des valeurs numériques) représentent la qualité des écarts dans l'espace de mesure par rapport au fonctionnement normal. Par conséquent, l'opérateur est qualitatif , Ils peuvent être définis à l'aide d'opérateurs des nombres réels :  $(+, -, x, \div, =)$  Alors, nous résolvons le système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études s'appuient sur les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique d'occurrence de la faute. [17, 18]

Pour déterminer les causes possibles d'une défaillance d'autres utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires, L'avantage de cette approche est qu'elle ne nécessite pas de connaissance approfondie de la structure du système ni des valeurs numériques des paramètres. Cependant, cette méthode devient compliquée pour les processus multi-énergies et présente également d'autres inconvénients, tels que l'incapacité à détecter une défaillance du capteur et La difficulté de déterminer les limites supérieure et inférieure de l'écart[19, 18].

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

Depuis 1995, des modèles Bonds graphs quantitatifs ont été utilisés directement dans la conception de systèmes de surveillance. Contrairement à l'approche qualitative, la méthode quantitative est basée sur les lois de la physique, il est donc nécessaire d'avoir une compréhension approfondie de la structure et des paramètres du système. Le principe de cette méthode est de comparer le comportement normal du processus avec Modèle numérique. Les modèles quelque soient leurs formes (fonction de transfert, équations d'état, ...) sont obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) ou sur la base d'une identification statistique des paramètres. [16, 18]

Par rapport aux approches basées sur les observateurs, les avantages que présente cette approche sont : la simplicité de la génération des relations de redondance analytique (RRA) puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph, image du processus physique, ces relations proviennent directement de la Représentation graphique elles peuvent être générées sous forme symbolique, ils conviennent donc à la mise en œuvre directement à une implémentation informatique.

## 2.6 PLACEMENT DE CAPTEURS

### 2.6.1 Algorithme

Nous utilisons les détecteurs d'effort «  $D_e$  » et de flux «  $D_f$  » 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. [20]

Nous avons un modèle bond graph d'un processus physique. Nous supposons que le capteur n'a pas été placé sur le modèle de bond graph. Les variables booléennes «  $y_i, z_i$  » correspondant au placement d'un capteur sur une jonction sont telles que :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{eme}} \text{ capteur est placé à la } i^{\text{eme}} \text{ jonction "0".} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{si le } j^{\text{eme}} \text{ capteur est placé à la } j^{\text{eme}} \text{ jonction "1".} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Soient :

- $N_0$  le nombre de jonctions "0".
- $N_1$  le nombre de jonctions "1".

- $n_i$  le nombre de liens attachés à la  $i^{eme}$  jonction "0" ( $i = 1, \dots, N_0$ ).
- $m_j$  le nombre de liens attachés à la  $j^{eme}$  jonction "1" ( $j = 1, \dots, N_1$ ).
- "e", "f" représentent l'effort et le flux respectivement.

Les équations de la  $i^{eme}$  jonction "0" sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{n_i} a_k f_k = 0 \quad \text{ou} \quad a_k = \begin{cases} 1 \text{ si le demi flèche est vers la jonction} \\ -1 \text{ sinon} \end{cases} \\ e_k = e_{c_i} \quad \quad \quad k = 1, \dots, n_i - 1 \end{array} \right.$$

Les équations de la  $j^{eme}$  jonction "1" sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^{m_j} a_l f_l = 0 \quad \text{ou} \quad a_l = \begin{cases} 1 \text{ si le demi flèche est vers la jonction} \\ -1 \text{ sinon} \end{cases} \\ f_l = e_{R_j} \quad \quad \quad l = 1, \dots, m_j - 1 \end{array} \right.$$

Un ensemble de variables connues K contient des détecteurs et des sources :

$$K = MS_e UMS_f UD_e UD_f US_e US_f$$

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

$$X = \{ e_1, f_1 \} \cup \{ e_2, f_2 \} \cup \dots \cup \{ e_{ne}, f_{ne} \} / X \in R^{2 \times ne}$$

**ne** : nombre de liens de puissance dans les éléments ( C , I et R)

Le flux et l'effort d'un élément " I " lié à une jonction "1" sont les suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{I_j} = I_j \left[ s \left\{ (1 - z_j) f_{I_j} + z_j D_{f_j} \right\} \right]; j = 1, \dots, N_1 \\ f_{I_j} = \frac{1}{s} (1 - z_j) I_j^{-1} (e_{I_j}) + z_j D_{f_j} \end{array} \right.$$

Cependant, si l'élément "I" est placé sur une jonction "0", les variables d'effort et de flux seront calculées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{I_i} = I_i (1 - y_i) f_{I_i} + y_i D_{e_i}; i = 1, \dots, N_0 \\ f_{I_i} = \frac{1}{s} [(1 - y_i) I_i^{-1} (e_{I_i}) + y_i I_i^{-1} D_{f_i}] \end{array} \right.$$

Le flux et l'effort d'un élément " R " lié à une jonction " 1 " sont les suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{R_j} = R_j \left[ (1 - z_j) f_{R_j} + z_j D_{f_j} \right]; j = 1, \dots, N_1 \\ f_{R_j} = (1 - z_j) R_j^{-1} (e_{R_j}) + z_j D_{f_j} \end{array} \right.$$

Cependant, si l'élément "R" est placé sur une jonction "0", les variables d'effort et de flux seront calculées comme suit

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{R_i} = R_i (1 - y_i) f_{R_i} + y_i D_{e_i}; i = 1, \dots, N_0 \\ f_{R_i} = \frac{1}{s} [(1 - y_i) R_i^{-1} (e_{R_i}) + y_i R_i^{-1} D_{f_i}] \end{array} \right.$$

## 2.7 Génération des relations de redondance analytique

Le principe de la génération des RRAs par la méthode bond graph est que la variable inconnue dans la loi de la structure de jonction ( 0, 1, TF et GY ) est éliminée par le chemin causal, nous pouvons établir plusieurs relations entre flux et effort.

Les variables des détecteurs et des sources sont les variables connues notées K et les variables inconnues " X " sont celles des liens de puissances dans les éléments (C, I et R ) . Grâce aux propriétés causales et au parcours des chemins causaux de la méthodologie bond graph l'élimination des variables inconnues est systématique. L'algorithme suivant permet de générer des RRAs de façon systématique à partir d'un modèle bond graph :[20, 18]

- Mettre le modèle bond graph en causalité dérivée préférentielle BGD (en inversant la causalité des détecteurs si possible).
- Ecrire les équations du modèle obtenues : de comportement des jonctions de mesure des sources et de commande.
- Pour toute équation de jonction "0" et "1" contenant au moins un détecteur :
  1. Eliminer les variables inconnues en parcourant les chemins causaux sur le bond graph.
  2. Pour tout détecteur dont la causalité est inversée une RRA est déduite.
  3. Pour tout détecteur dont la causalité ne peut pas être inversée une RRA est déduite en mettant à égalité sa sortie avec la sortie d'un autre détecteur de même nature (redondance matérielle).
- Une RRA est obtenue à partir de chaque régulateur en comparant sa sortie mesurée avec la sortie prédite par son algorithme de commande.
- refaire la troisième et la quatrième étapes.

## 2.8 Matrice de signature des défaillances

La structure des RRA's forment une matrice binaire  $S_{ij}$ , qui nous informe de la sensibilité du résidu aux différentes composantes du processus physique. Ses lignes correspondent à d'éventuelles défaillances des composants et capteurs du système, et ses colonnes représentent des résidus. La valeur "1" dans la matrice indique que le résidu " $r_i$ " est sensible à la défaillance du composant correspondant (représenté par un ou plusieurs paramètres dans l'équation du résidu).

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la } i^{\text{eme}} \text{ RRA contient des variables du } j^{\text{eme}} \text{ composant} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases}$$

La matrice  $S_{ij}$  est appelée 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 colonne de la matrice. Une défaillance d'un composant est détectable si la variable associée au composant est présente dans au moins une RRA (résidu r

correspondant). Cette défaillance est localisable si et seulement si sa signature est unique, i.e. différente des signatures des autres composants.[21, 22]

## 2.9 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons montré 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 Shakti, ce dernier va être présenté dans le prochain chapitre.

# Chapitre 3

## Symbols Shakti

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va se baser sur une présentation générale du logiciel SYMBOLS SHAKTI qu'on a utilisée pour la simulation, ce concepteur comporte comme chaque logiciel ces avantages et ces inconvénients. Symbols nécessite un développement rapide pour s'adapter au progrès technologique dans différents domaines en particulier dans le domaine industriel.

Le logiciel SYMBOLS (pour SYstem Modeling by B0ndgraph Language and Simulation), créé par l'Indian Institute of Technology ; un consultant de haute technologie, est un logiciel de simulation, de modélisation et de contrôle de divers systèmes pour diverses applications scientifiques et d'ingénierie.

Nous présentons d'abord et en détail l'environnement bond pad SYMBOLS. Introduisons de nouvelles entités par symbols, les capsules, nous présenterons leurs avantages et leur champ d'application. Plus tard, nous présenterons en détail et proposerons des améliorations à l'analyse structurelle des propriétés.

### 3.2 Caractéristiques principales du logiciel Symbols

Caractéristiques principales du logiciel Symbols sont les suivantes :

- Deux niveaux d'interconnexion sont considérés : le niveau d'équation et le niveau graphique et structurel.
- Adapte la causalité (en ajoutant ou en supprimant des capteurs, composants, ... etc.).
- Capable de détecter et localiser les défaillances dans un modèle.
- Promouvoir le regroupement de sous modèles pour construire de nouvelles classes de composants.

### 3.3 Environnements Symbols

Lors du chargement du logiciel, nous avons remarqué l'apparition de plusieurs environnements indépendants illustrés dans la (fig 3.1).

### 3.4 Modules du symbols Shakti

Le logiciel de Symbols contient une variété d'algorithmes d'intégration avancés, pour garantir Simulation rapide et donne des résultats satisfaisants . En utilisant les modules "Bond Pad" ou "FDI Pad", tous les modèles peuvent être construits d'une manière très simple, les sous modèles sont fusionnés dans un modèle global. Il contient également des modèles génériques (capsules) qui permettent de construire un modèle complexe.

Nous décrirons ci-dessous les modèles qui composent notre logiciel :

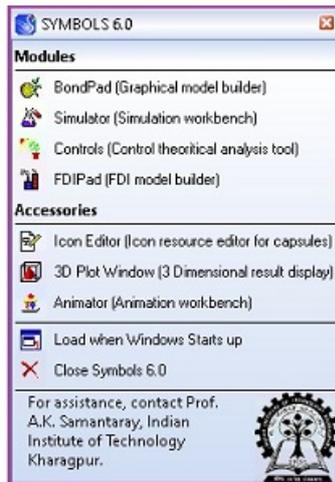


FIGURE 3.1 – Les éléments SYMBOLS.

### 3.4.1 Le Module BOND PAD

Le module bond pad est en haut de la liste des modules du logiciel, en d'autres termes, c'est le premier module auquel l'utilisateur confrontera, la figure ci-dessous (fig 3.2) nous montre l'interface principale de ce module. La zone d'objet contient des outils pour dessiner et modifier des modèles de bond graph, ainsi que des bibliothèques de capsules.

Les capsules et les outils disponibles dans la zone d'objet vous permettent de concevoir un modèle bond graph dans la zone de dessin.

La zone d'expression est utilisée pour afficher les équations correspondant au modèle bond graph.

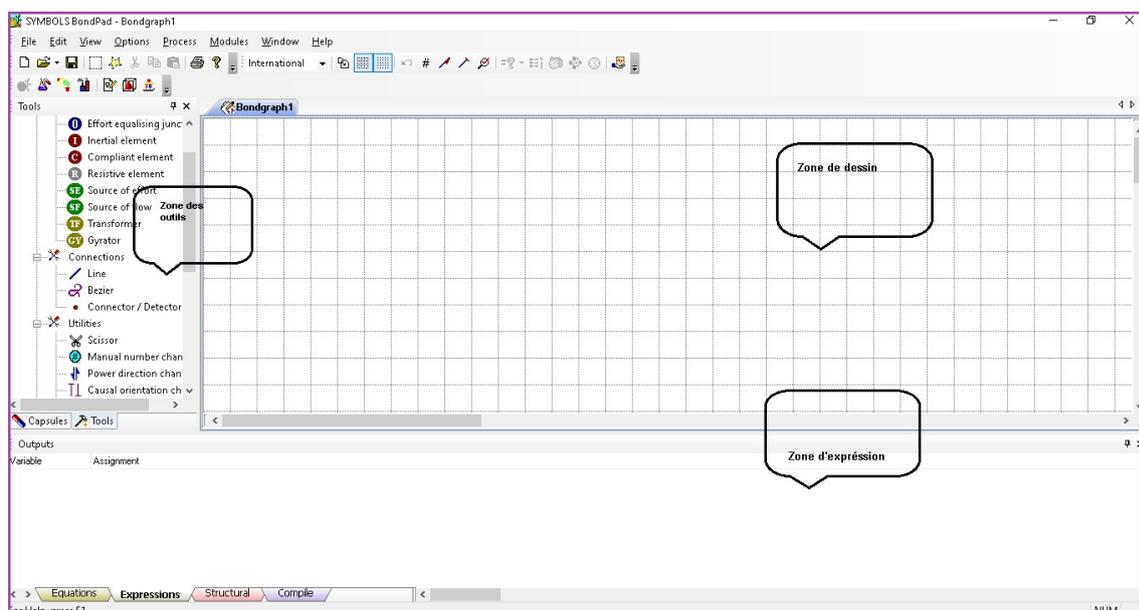


FIGURE 3.2 – Fenêtre du module (bond pad).

La figure ci-dessous (fig 3.3) nous montre les différentes fenêtres que contiennent l'interface graphique du logiciel symbols.

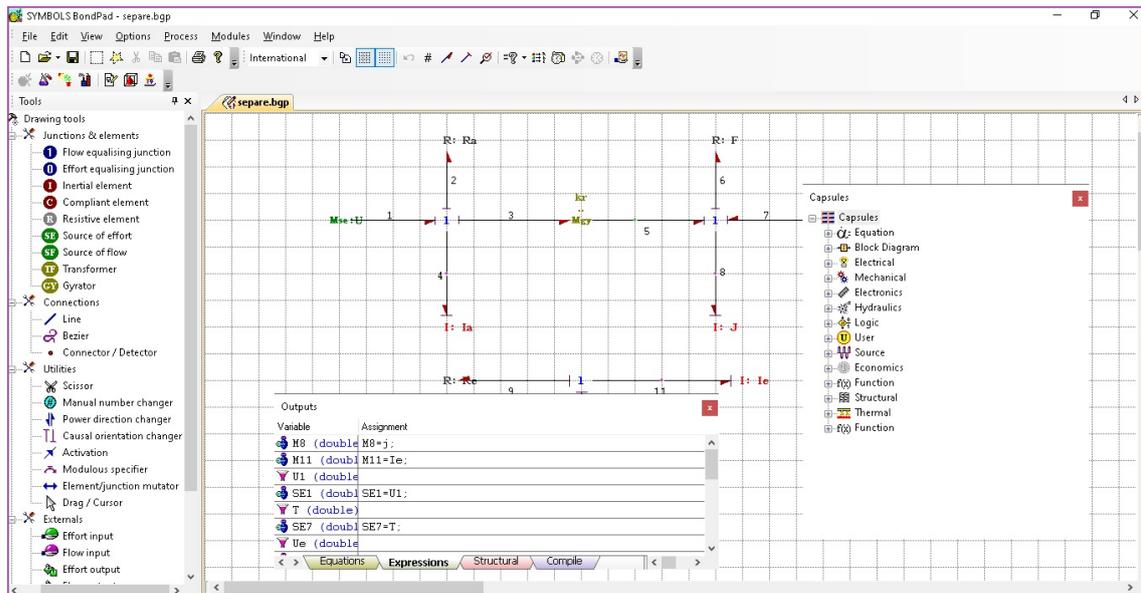


FIGURE 3.3 – Interface graphique de la partie BondPad du logiciel SYMBOLS.

### 3.4.2 Le module de simulation

Ce module est utilisé pour résoudre des équations dynamiques, la description de l'interface comme suit :

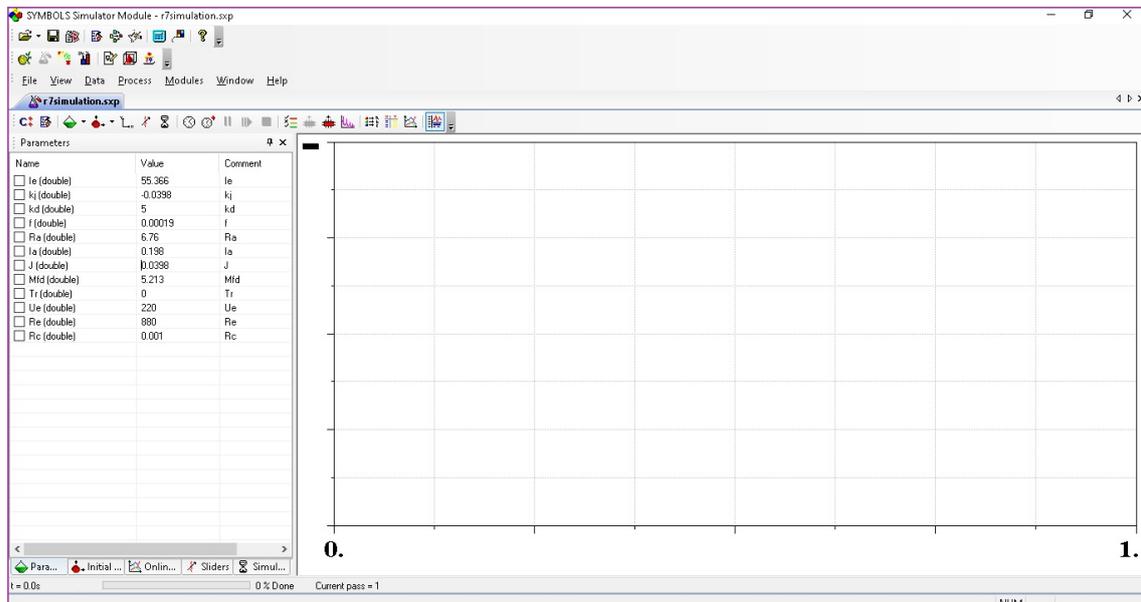


FIGURE 3.4 – Fenêtre du simulateur.

Le point d'entrée du simulateur est le fichier de définition de module (fichier.sym) généré à partir du module (Bond Pad). pour créer un fichier d'expérimentation du simulateur ce fichier doit être compilé.

Après le démarrage de la compilation, la fenêtre de compilation affichera l'état de la compilation, les messages d'erreur et d'avertissement, comme illustré à la figure (fig 3.5) :

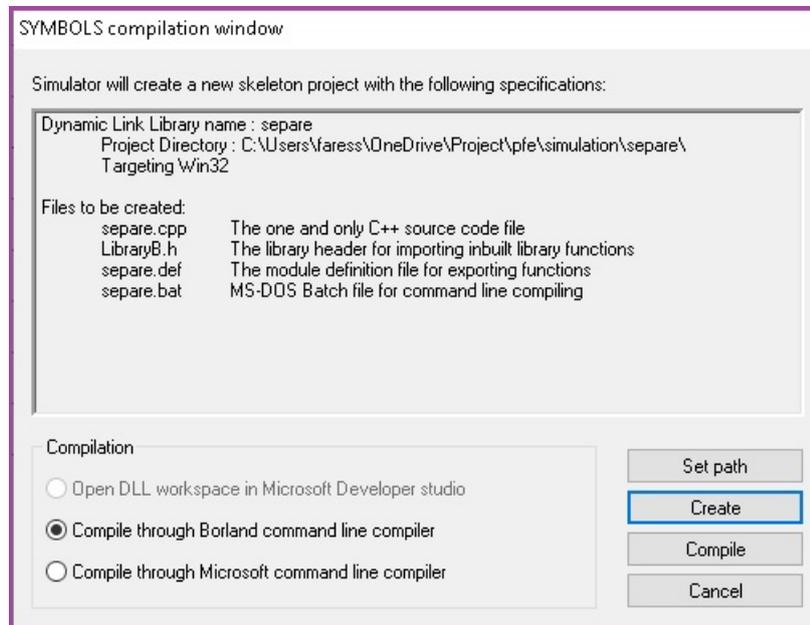


FIGURE 3.5 – Fenêtre de compilation.

Après la compilation, nous devons effectuer les étapes suivantes pour tracer la courbe de simulation :

- Attribuer les valeurs des composants.
- Attribuer les valeurs initiales et finales de la courbe de simulation.
- Appuyer sur la commande "START" pour simuler.

### 3.4.3 Le module de commande "Controls"

Le troisième module est le module de contrôle, qui est un outil d'analyse de commande théorique qui peut analyser des systèmes linéaires continus ou discrets. Dans ce module, le système étudié doit être décrit par sa fonction de transfert ou son modèle d'état.

### 3.4.4 Le Module FDI Pad

Le dernier module qu'on va présenter est le module FDI Pad, c'est le module le plus important entre les modules présentés , car sur ce module on va faire notre simulation.

Le module FDI Pad est un module de création de modèle graphique pour FDI, qui ne fonctionne qu'en présence d'une capsule , nous montrerons les différents côtés de son interface, ainsi que l'exemple que nous avons fait selon le package prédéfini :

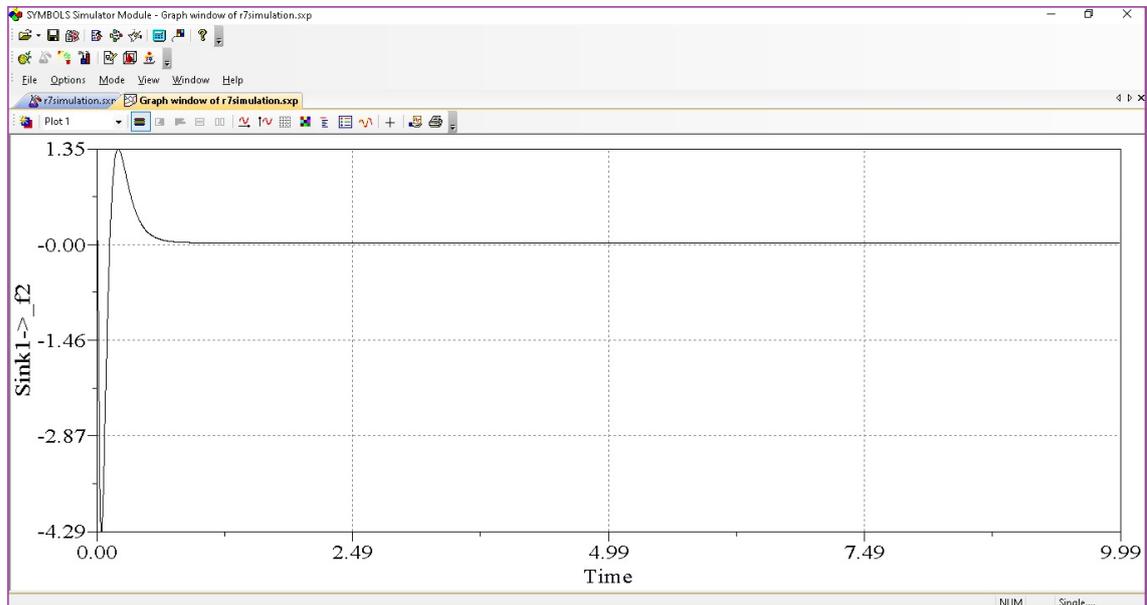


FIGURE 3.6 – Fenêtre des courbes.

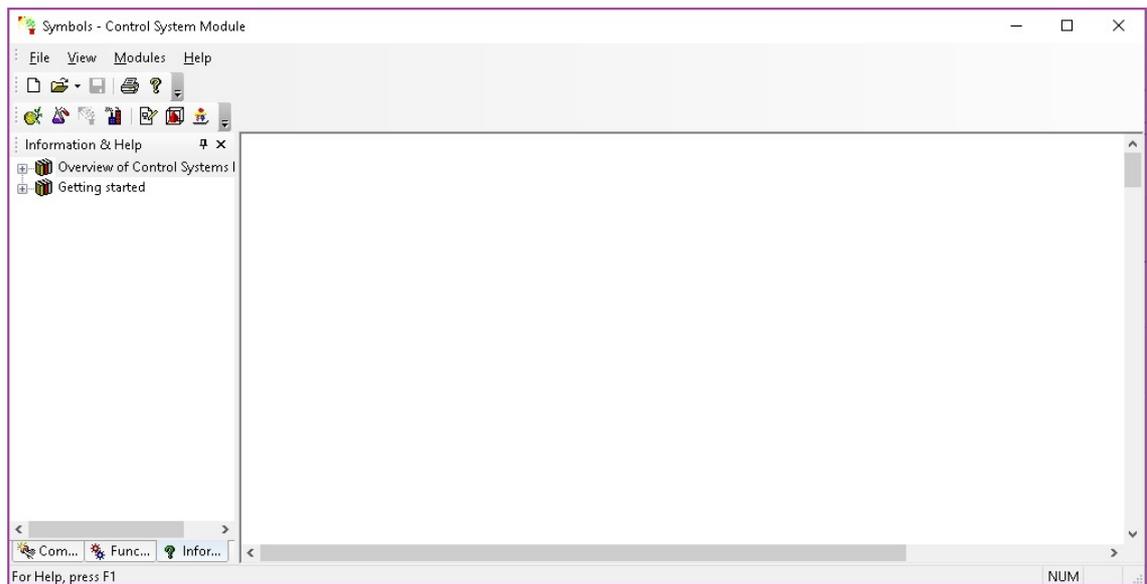


FIGURE 3.7 – Fenêtre de commande "Controls".



## 3.5 Création et Incorporation des Capsules sous Symbols

Les capsules sont des sous-systèmes avec des modèles plus simples, utilisés pour l'interprétation et la lisibilité des modèles. L'outil bond graph nous permet de décomposer un système complexe en système beaucoup plus simple. C'est pourquoi des éléments constitutifs simplifiés sont introduits sous forme de capsules dans le logiciel.

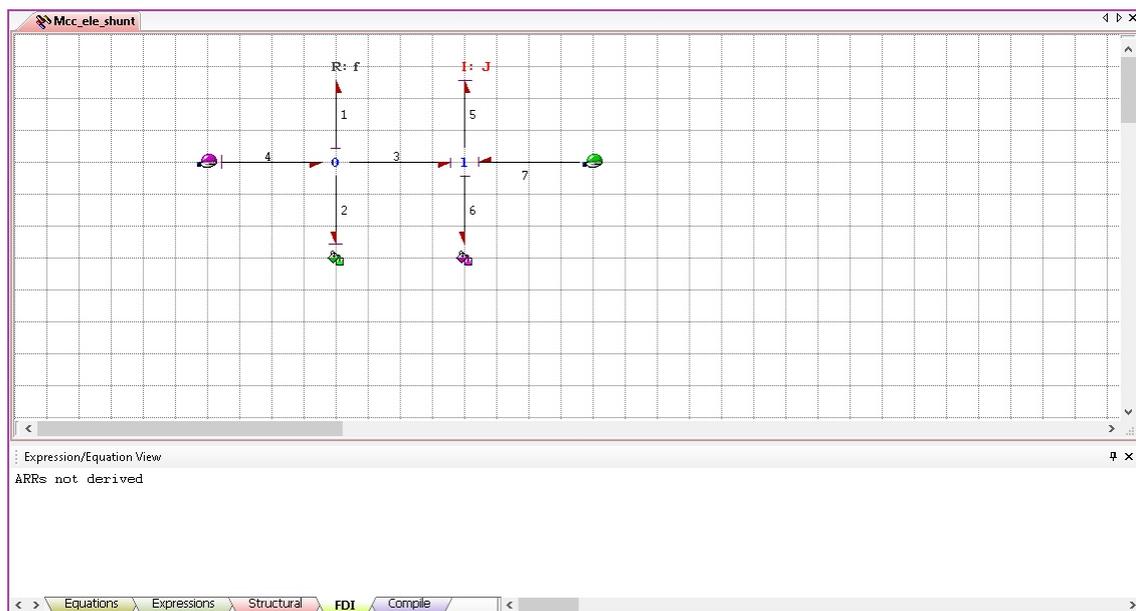
### 3.5.1 Caractéristiques des capsules

Le logiciel SYMBOLS nous permet la création des capsules avec les caractéristiques suivantes :

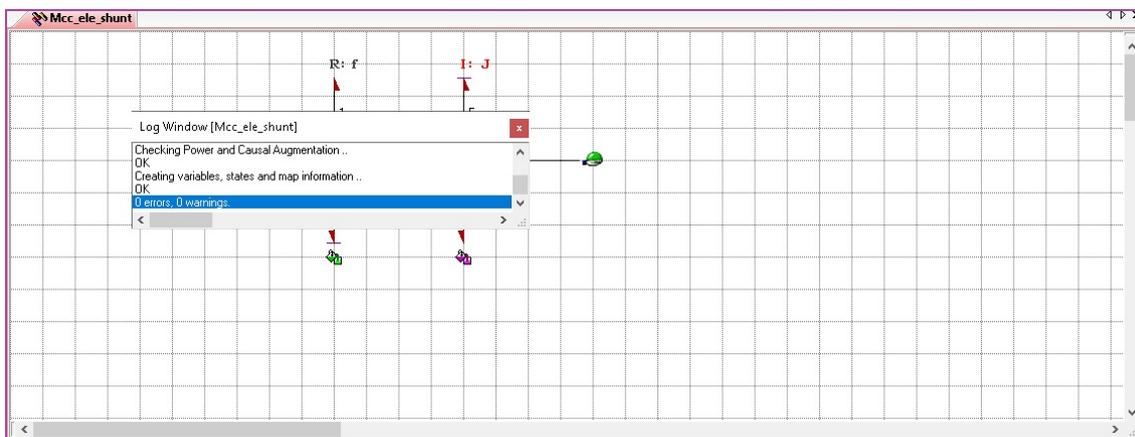
- Les capsules peuvent être incluses dans le modèle et peuvent apparaître un certain nombre de fois.
- Une capsule peut contenir d'autres capsules.
- Capsule doit être complète, c'est-à-dire que les paramètres de son équation constitutive non linéaire doivent être directement décrits par des expressions ou des appels de fonction dans la bibliothèque.
- Les capsules sont numérotées en basant sur la direction du transfert d'énergie.
- La modélisation causale est effectuée par le biais de capsules génériques. Ces capsules représentent différentes options de causalité possible. Une fois implantée dans le modèle, la capsule appropriée sera insérée.

Dans les étapes suivantes, nous présentons les étapes pour créer une capsule sous symbols et prenons un modèle de suspension simple comme exemple :

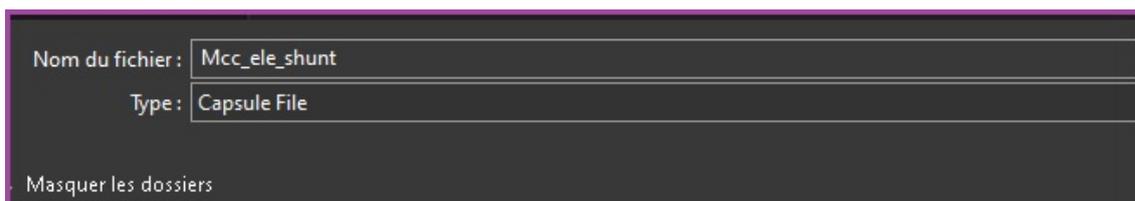
1. Sous le module BondPad nous réalisons le modèle bond graph de notre exemple.



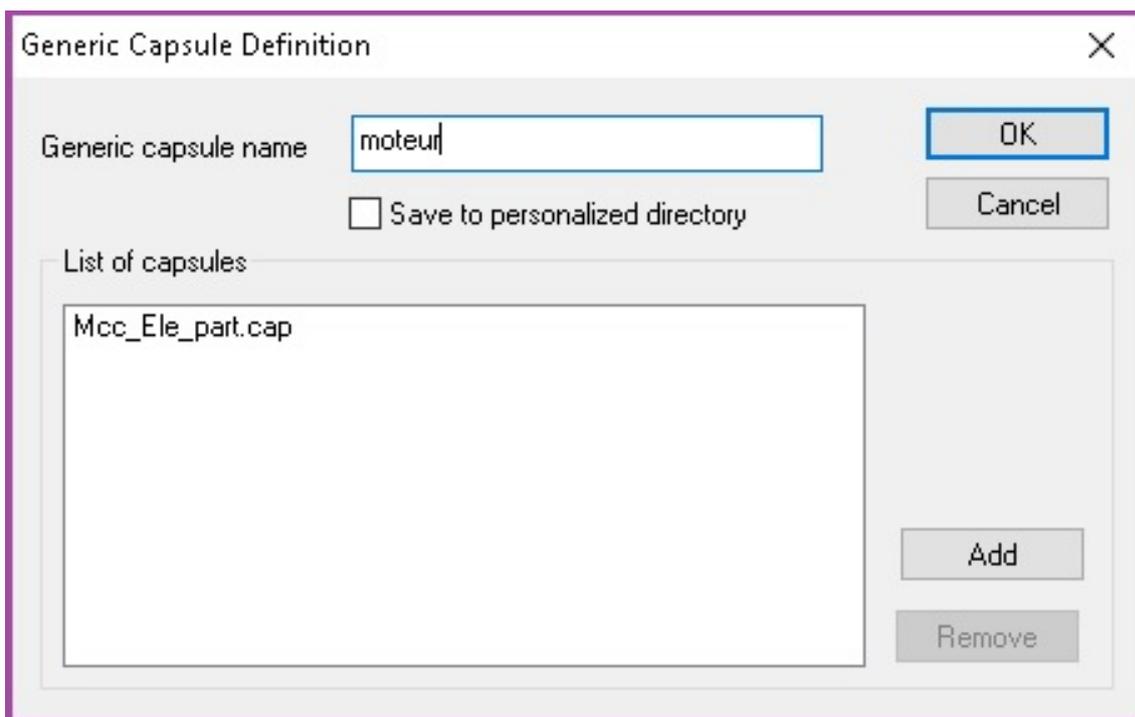
2. Dans cette étape nous devons compiler le modèle et vérifier s'il n'y a pas d'erreurs.



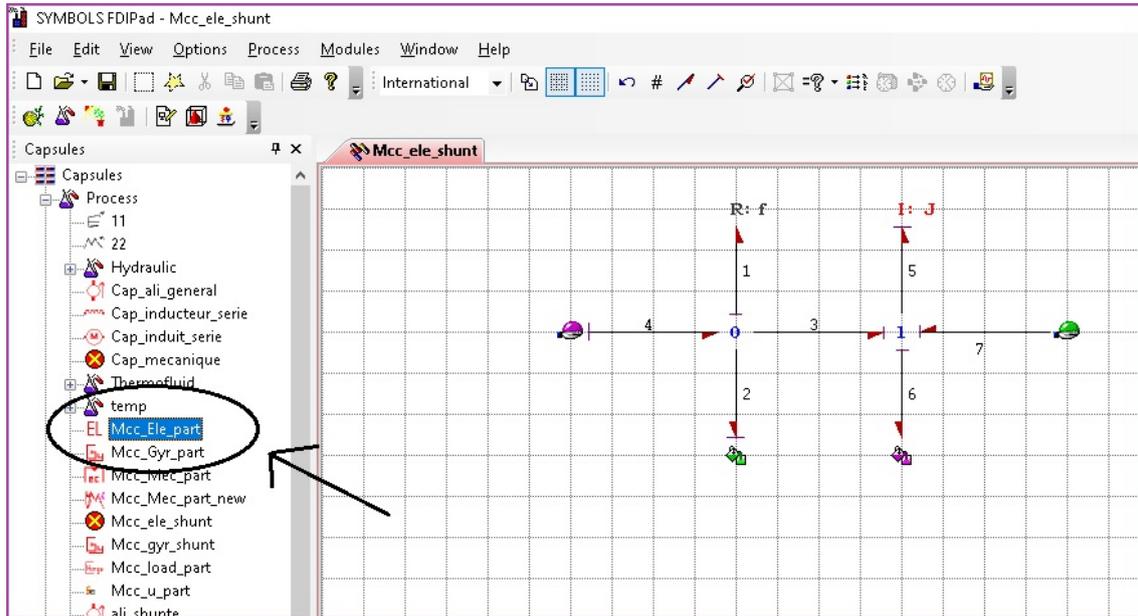
3. Enregistrer le modèle sous type 'Capsule file' dans le dossier relatif aux capsules.



4. Sélectionner le groupe où la capsule doit être enregistrée, puis sauvegarder.



5. La capsule créée sera placée dans le groupe des capsules choisi.



### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel Symbols, et détaillé chaque module de ce logiciel . le logiciel symbols nous a permet de modéliser, d'analyser, de contrôler et de simuler différents systèmes, mais qui répond partiellement aux exigences technologique. Nous avons détaillé l'utilité des capsules car elles sont essentielles pour le diagnostic du système, qui sera présenté dans le chapitre suivant.

# Chapitre 4

## Surveillance du moteur à courant continu

## 4.1 Introduction

La machine de courant continu est un convertisseur d'énergie bidirectionnel totalement réversible, elle peut fonctionner en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, ou en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique.[23]

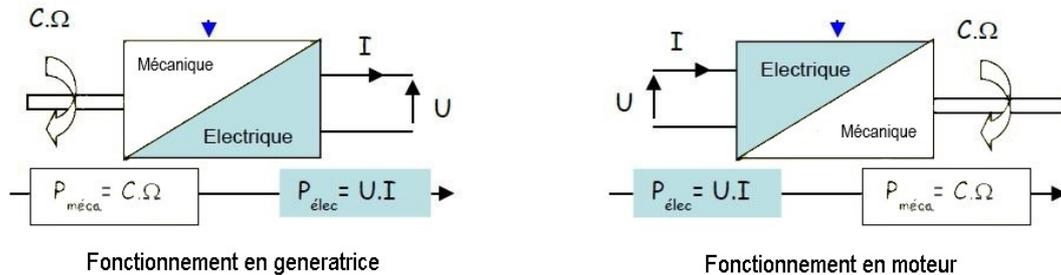


FIGURE 4.1 – La fonctionnement de la machine à courant continu.

## 4.2 Constitution :

La machine à courant continu est constituée de deux parties : Une partie fixe, Un inducteur appelé aussi stator ; qui crée le champ magnétique il peut être constitué d'aimants permanents ou d'une bobine alimentée par un courant continu. Une partie mobile, un induit appelé aussi rotor, constitué d'un conducteur, il se crée aux bornes de l'ensemble des conducteurs une tension induite  $E$  lorsqu'il tourne, dans la machine série, l'inducteur est en série avec l'induit Si l'inducteur est alimenté de façon séparée par rapport à l'induit, on parle de machine à excitation indépendante.

### 4.2.1 Structure de la machine à courant continue :

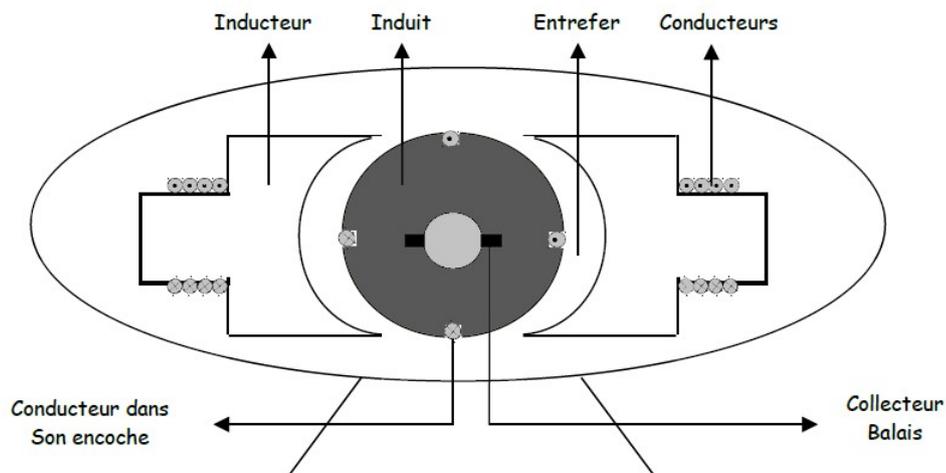


FIGURE 4.2 – Structure générale d'une MCC.

### 4.2.2 Induit(rotor) :

La partie tournant de la machine qui porte les conducteurs soumis au flux magnétique de l'inducteur, Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches de bobinage sur le rotor, deux conducteurs forment une spire. Les extrémités du bobinage de l'induit sont reliées au collecteur.

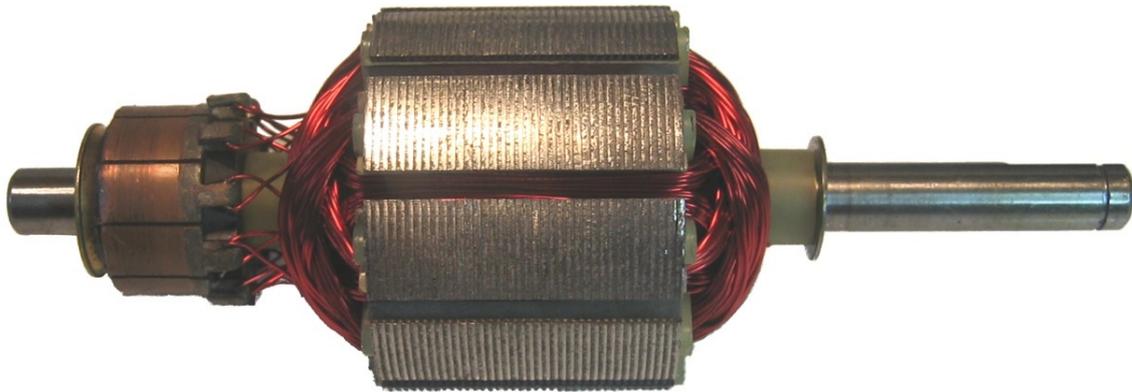


FIGURE 4.3 – L'induit(rotor).

### 4.2.3 Collecteur :

C'est un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres par des feuilles de mica, disposées dans une forme cylindrique sur l'extrémité du rotor. la fonction principale de collecteur est d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit.



FIGURE 4.4 – Collecteur.

### 4.2.4 Balais

Les balais portés par le stator frottent sur le collecteur. Leur rôle principal est l'alimentation de l'induit en contactant les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit.



FIGURE 4.5 – Balais montés sur collecteur.

### 4.3 Principe de fonctionnement :

L'inducteur crée un champ magnétique fixe  $B$ . Il peut être aimant permanent ou constitué d'électro-aimant. L'induit ou le rotor porte des conducteurs parcourus par un courant continu pour l'alimentation du moteur ; ces spires, soumises à des forces (force de Laplace), entraînent la rotation du rotor (fig 4.6). Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.e.m qui est redressée par l'ensemble collecteur-balai. La valeur moyenne  $E$  de cette f.e.m est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor, au flux maximale du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire ( $\Phi = BxS$ ) et une constante  $K$  qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, nombre de paires de pôles...).[24]

$$E = k.\Phi.\Omega \text{ Avec } k = \frac{P.N}{2.\pi.a} \quad (4.1)$$

$E$  : La f.e.m en volts [V].

$\Omega$  : La vitesse angulaire [ $\text{rad.s}^{-1}$ ].

$\Phi$  : Le flux en webers [Wb].

$k$  : Constante.

$P$  : le nombre de paires de pôles.

$a$  : le nombre de paires de voies d'enroulement.

$N$  : le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires).

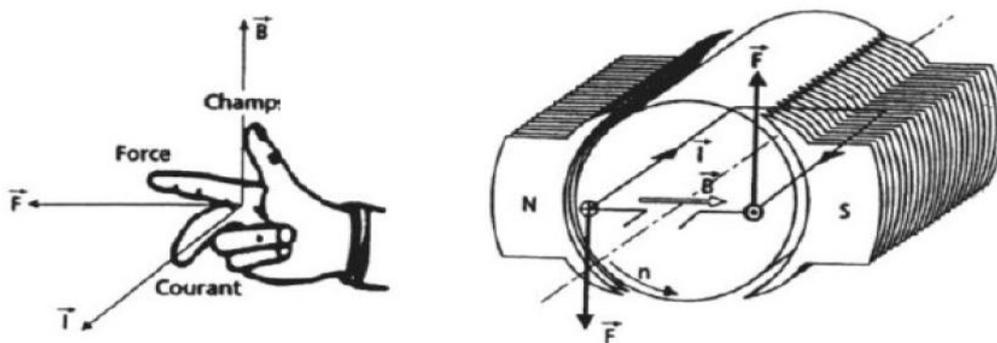


FIGURE 4.6 – l'action d'un champ magnétique  $B$  sur un courant  $I$  dans un conducteur (Loi de Laplace).

L'induit reçoit une puissance électromagnétique :

$$P_{em} = E.I \quad (4.2)$$

Parce qu'il tourne à la vitesse angulaire  $\Omega$  alors :

$$P_{em} = T_{em}.\Omega \quad (4.3)$$

Alors l'expression du couple électromagnétique est :

$$T_{em} = k.\Phi.I \quad (4.4)$$

## 4.4 MODES D'EXCITATION :

### 4.4.1 Excitation indépendante(séparée) :

L'inducteur et l'induit sont alimentés séparément, l'inducteur est alimenté par une tension  $u$  et parcouru le courant continu  $i$ , l'induit est alimenté par une tension continue  $U$  et parcouru par le courant  $I$ .

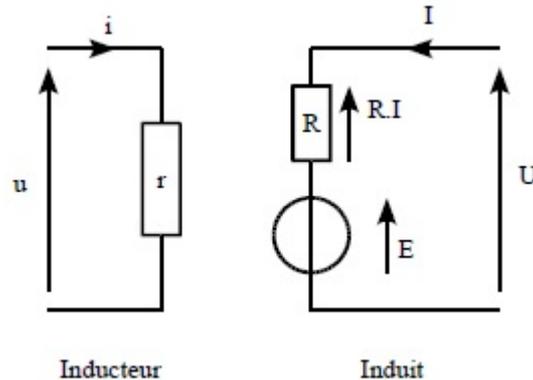


FIGURE 4.7 – Modèle électrique du MCC à excitation indépendante.

Le courant d'induit est imposé par la charge couplée au moteur et la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit. Pour des conditions d'excitation fixées, le flux est constant, on peut déduire les équations caractérisant du MCC à excitation séparée :

$$U = E + RI$$

$$E = K.\Phi.\Omega$$

$$C_e = k.\Phi.I$$

Les caractéristiques de moteur à excitation séparée sont : L'inducteur et l'induit sont alimentés séparément, grande souplesse de commande, large échelle de vitesse, utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse, il est employé dans les machines-outils comme moteur de broche, d'axes...

#### 4.4.2 Excitation série :

L'inducteur est placé en série avec l'induit donc ils sont traversés par la même intensité  $I$ .

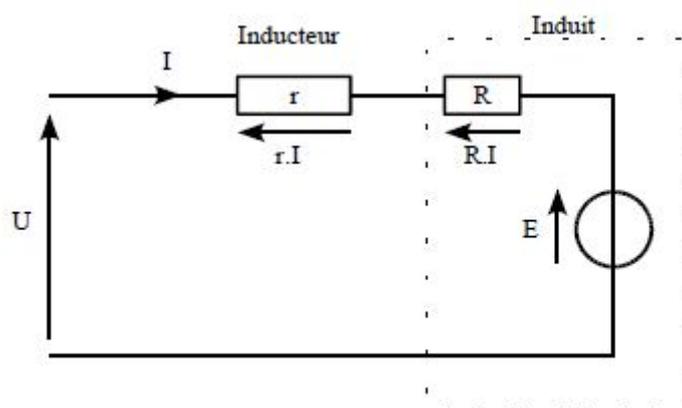


FIGURE 4.8 – Modèle électrique du MCC à excitation série.

Alors le courant d'induit est également e courant d'excitation, on suppose que le flux est proportionnel au courant d'excitation, on peut déduire les équations caractérisant du MCC à excitation série :

$$U = E + (r + R)I$$

$$E = K.\Phi.\Omega$$

$$C_e = k.\Phi.I$$

Les caractéristiques de moteur à excitation série sont : un fort couple de démarrage mais le risque de faire fonctionner le moteur à vide la vitesse tend vers l'infini. Pour ce type des moteurs est employés dans les ventilateurs, pompes...

### 4.4.3 Excitation shunt :

Pour ce moteur l'inducteur et l'induit sont en parallèle alimentés par la même source de tension.

Alors les déduire les équations caractérisant du MCC à excitation

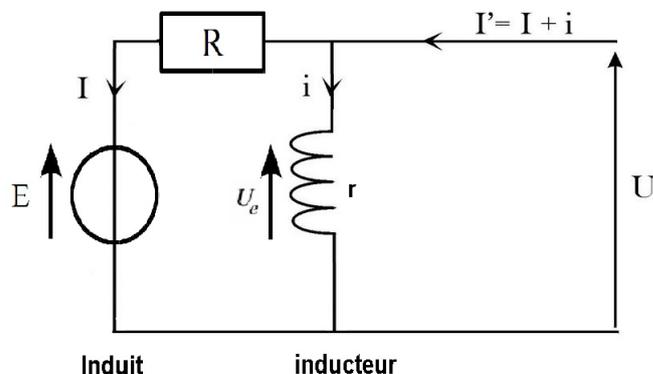


FIGURE 4.9 – Modèle électrique du MCC à excitation shunte.

shunte :

$$E = K.\Phi.\Omega$$

$$C_e = k.\Phi.(I + I_e)$$

$$U = U_e = R.I_e I = E + R.$$

Les caractéristiques de moteur à excitation shunte sont :quelque soit la charge le couple est constant, ce type de moteur est employé dans les machines-outils, appareil de levage(ascenseur).

### 4.4.4 Excitation composée :

L'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.

Les caractéristiques de moteur à excitation composée sont : Entraînements de grande inertie, couple très variable avec la vitesse. Ce type du moteur est employé dans les engins de levage, ventilateur, pompes. . .

## 4.5 Bilan des puissances :

Le bilan de puissance correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique, il comprend toutes les puissances, depuis la

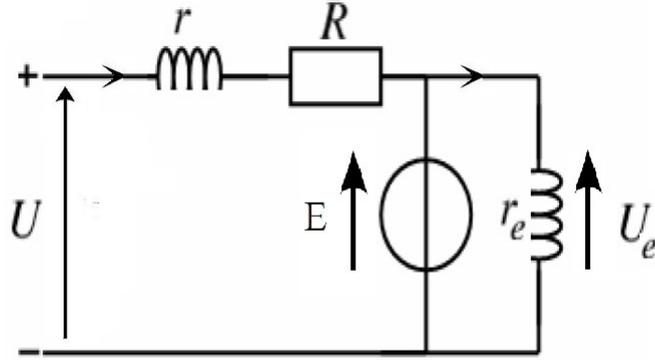


FIGURE 4.10 – Modèle électrique du MCC à excitation composé.

puissance absorbée électrique jusqu'à la puissance utile mécanique.

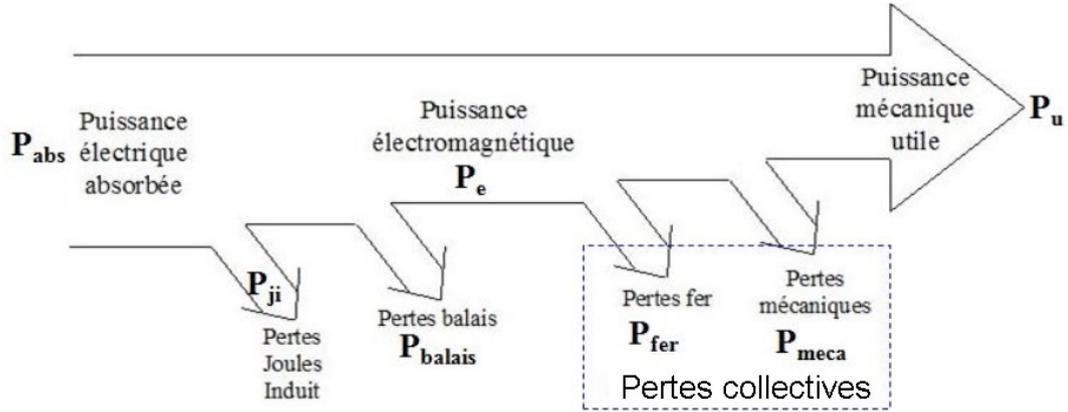


FIGURE 4.11 – Bilan des puissances.

$$P_{abs} = U.I \quad (4.5)$$

$P_{abs}$  : La puissance absorbée en watts [W].

$U$  : La tension aux bornes de l'induit en volts [V].

$I$  : L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A].

$$P_{ij} = R.I^2 \quad (4.6)$$

$P_{ji}$  : Les pertes par effet Joule dans l'induit en watts [W].

$R$  : La résistance de l'induit en ohms [ $\Omega$ ].

$I$  : L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A].

$$P_e = E.I = C_e.\Omega \quad (4.7)$$

$P_e$  : La puissance électromagnétique en watts [W].

$E$  : La f.e.m du moteur en volts [V].

$I$  : L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A].

$C_e$  : Le moment du couple électromagnétique en newton-mètre [N.m].

$\Omega$  : La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s].

$$P_c = P_{fer} + P_{mecca} = C_p \cdot \Omega \quad (4.8)$$

$P_c$  : Les pertes collectives en watts [W].

$P_{fer}$  : Les pertes fer.

$P_{mecca}$  : Les pertes mécaniques.

$C_p$  : Le moment du couple de pertes en newton-mètre [N.m].

$\Omega$  : La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s].

$$P_u = C \cdot \Omega \quad (4.9)$$

$P_u$  : La puissance utile en watts [W].

$C$  : Le moment du couple mécanique en newton-mètre [N.m].

$\Omega$  : La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s].

Alors

$$P_e = P_{abs} - P_{Ji} \quad (4.10)$$

avec

$$P_u = P_e - P_c \quad (4.11)$$

Donc :

$$P_u = P_{abs} - P_{ij} - P_c \quad (4.12)$$

Le rendement  $\eta$  est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée d'où

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \quad (4.13)$$

## 4.6 Simulation

### 4.6.1 Excitation séparée :

Le modèle bond graph représentant le moteur à excitation séparée dans l'outil Symbols Shakti avec le module « BondPad », est présenté sur la (fig 4.12) il est construit de deux parties :

#### La partie électrique :

Pour l'induit : source d'efforts « U », la résistance « Ra » et l'inductance « Ia » sont portées sur une jonction « 1 ».

Pour l'inducteur : source d'efforts « Ue », la résistance « Re » et l'inductance « Ie » sont portées sur une jonction « 1 ».

#### La partie mécanique :

« Ie » le frottement « f », l'inertie « j » et la charge « Tr » sont portées sur une jonction « 1 »

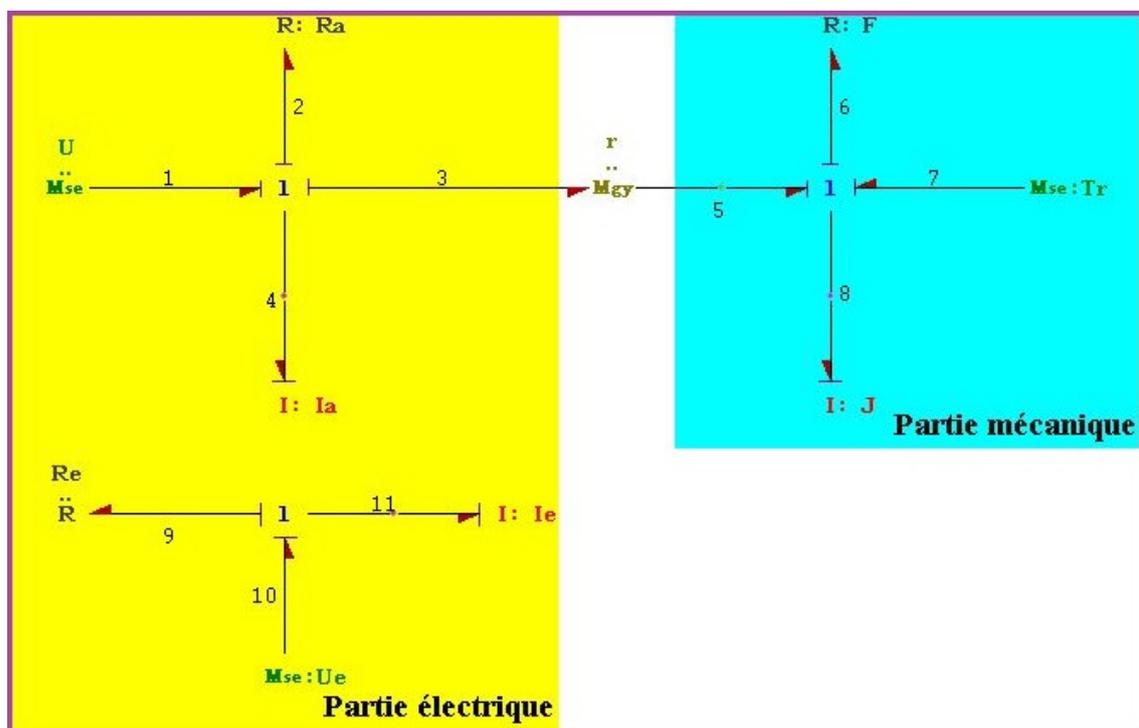


FIGURE 4.12 – modèle bond graph du moteur à courant continu à excitation séparée.

Le « Gy » représente le point de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique

Pour la simulation de ce modèle de la (fig 4.12) dans l'outil Symbols Shakti dans le module de simulation (Simulator) pour voir son fonctionnement avec les paramètres présentés dans la (Tab 4.1)

PARAMETES	VALEURS [UNITES]
$S_e : U$	220[V]
$S_e : U_e$	220 [V]
$R : R_a$	6.76[Ω]
$I : I_a$	0.198[H]
$R : R_e$	880 [Ω]
$I : I_e$	55.366[H]
$R : f$	0.00019[N.m.s.rd <sup>-1</sup> ]
$I : j$	0.0398[Kg.m <sup>2</sup> ]

Tableau 4.1 – Paramètres du Moteur à excitation Séparée.

Alors pour la simulation de moteur à courant continu a excitation séparée avec un couple résistant nul.(**fig 4.13**) , et sur la (**fig 4.14**) avec un couple résistant non nul égale 5n.m

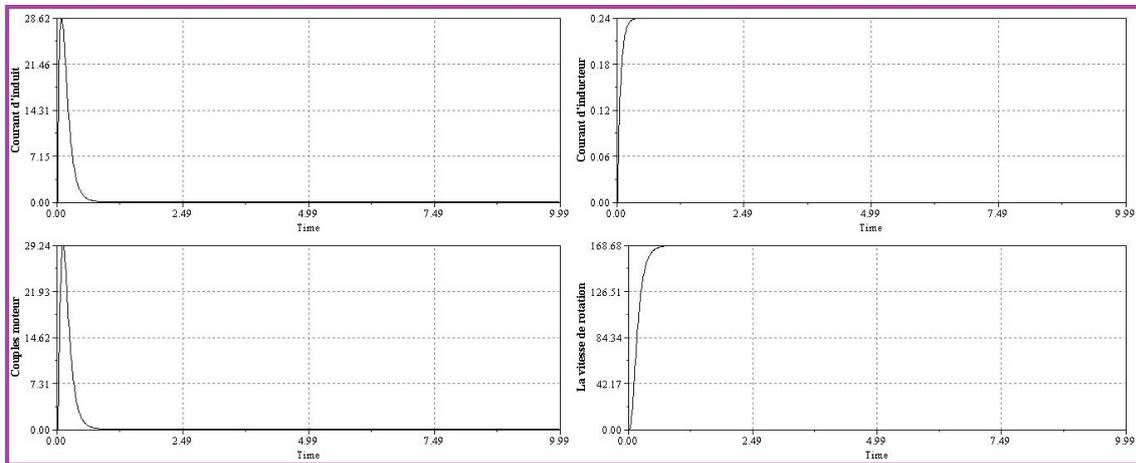


FIGURE 4.13 – Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation séparée (à vide).

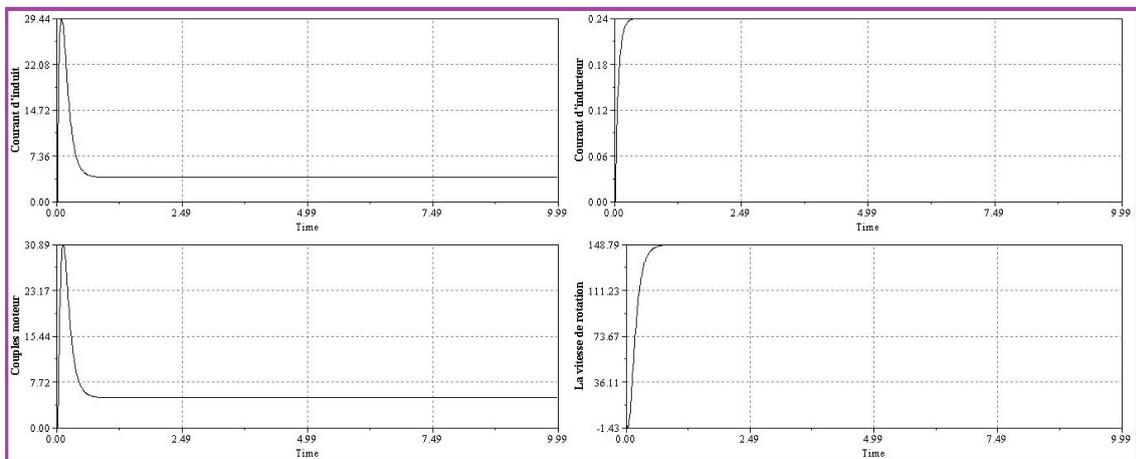


FIGURE 4.14 – Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation séparée (en charge).

### 4.6.2 Excitation série :

Pour le moteur à excitation série l'induit et l'inducteur sont alimenté par la même source de tension alors le modèle bond graph représentant le moteur à excitation série (**fig 4.15**) dans l'outils Symbols Shakti avec le module « BondPad » est construit de deux partie :

**La partie électrique :** Une source d'effort « U » pour l'alimentation de l'induit et l'inducteur.

Pour l'induit : la résistance « Ra » et l'inductance « Ia » sont portées sur une jonction « 1 ».

Pour l'inducteur : la résistance « Re » et l'inductance « Ie » sont portées sur une jonction « 1 ».

**La Partie mécanique :** le frottement « f » ,l'inertie « j » et la charge « Tr » sont portées sur une jonction « 1 »

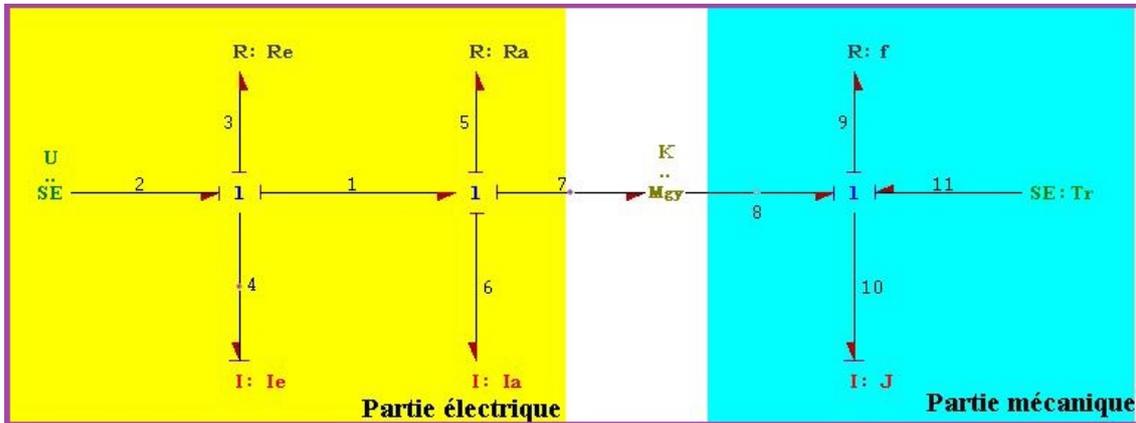


FIGURE 4.15 – modèle bond graph du moteur à courant continu à excitation série.

« Gy » représente le point de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique,

pour la simulation de ce modèle de la (**fig 4.15**) dans l'outil Symbols Shakti avec le module de simulation « Simulator » pour voir sons fonctionnalité avec les paramètres présentés dans la (**Tab 4.2**).

PARAMETES	VALEURS [UNITES]
$S_e : U$	220[V]
$R : Ra$	6.76[Ω]
$I : Ia$	0.198[H]
$R : Re$	1.158 [Ω]
$I : Ie$	0.0868[H]
$R : f$	0.00019[N.m.s.rd <sup>-1</sup> ]
$I : j$	0.0398[Kg.m <sup>2</sup> ]

Tableau 4.2 – Paramètres du Moteur à excitation Série.

Alors pour la simulation du moteur à courant continu a excitation série avec un couple résistant nul.(**fig 4.16**) , et sur la (**fig 4.17**) avec un couple résistant non nul égale 5n.m.

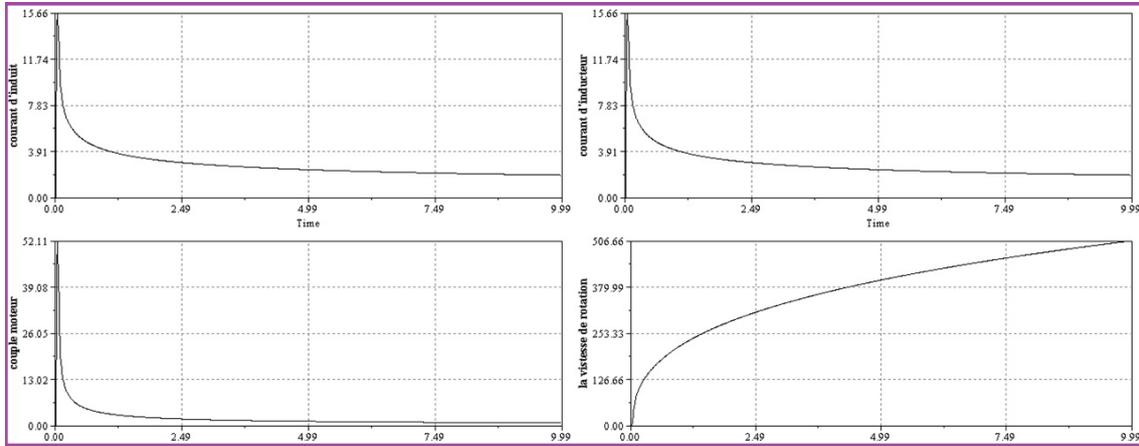


FIGURE 4.16 – Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation série (à vide).

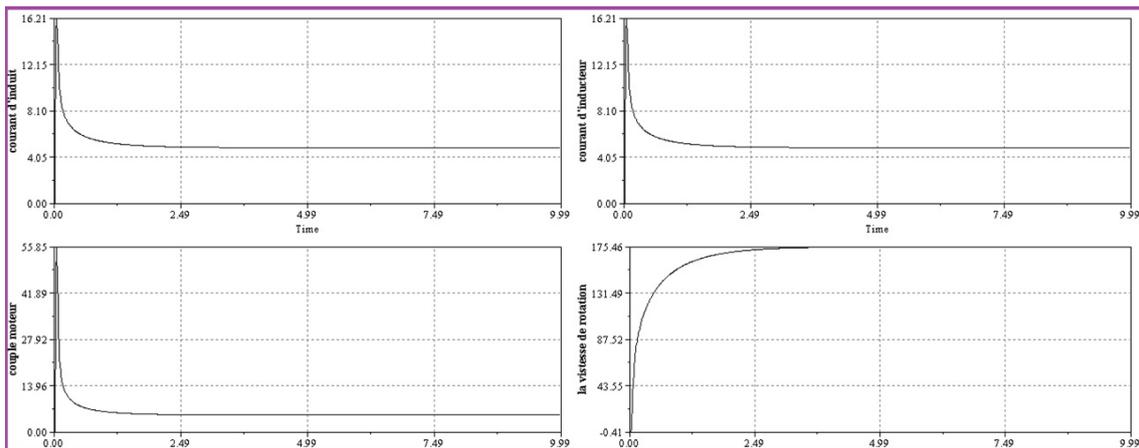


FIGURE 4.17 – Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation série (en charge).

### 4.6.3 Excitation shunte : :

Le modèle bond graph représentant le moteur à excitation shunte ou parallèle (l'induit et l'inducteur sont en parallèle) dans l'outils Symbols Shakti avec le module « BondPad », est présenté sur la (**fig 4.16**) il est construit de deux partie :

**La partie électrique :** Une source d'effort « U » pour l'alimentation de l'induit et l'inducteur qui sont en parallèle portés sur une jonction

« 0 »

Pour l'induit : la résistance «  $R_a$  » et l'inductance «  $I_a$  » sont portées sur une jonction « 1 ».

Pour l'inducteur : la résistance «  $R_e$  » et l'inductance «  $I_e$  » sont portées sur une jonction « 1 ».

**La partie mécanique :** le frottement «  $f$  », l'inertie «  $J$  » et la charge «  $Tr$  » sont portées sur une jonction « 1 »

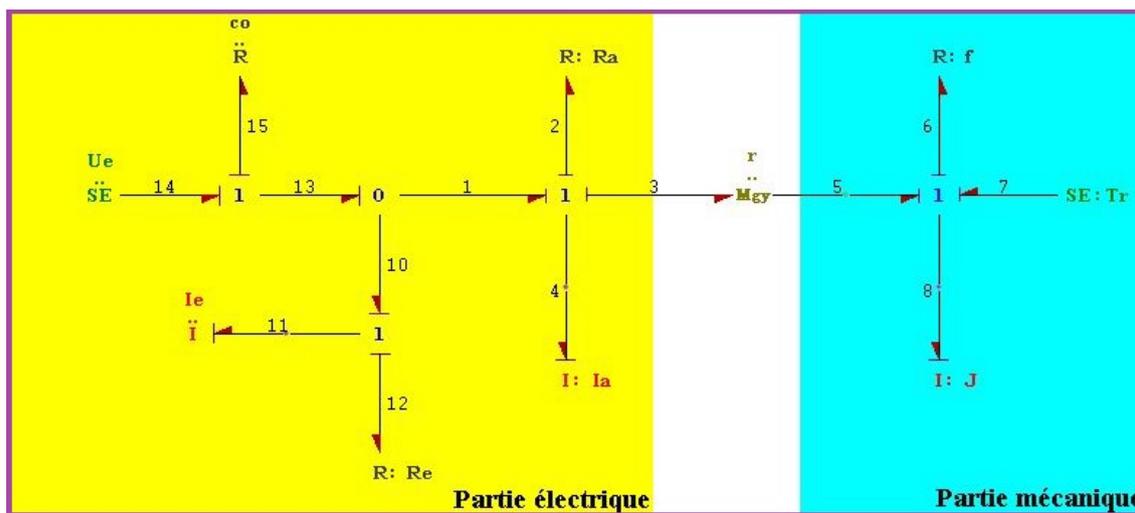


FIGURE 4.18 – Modèle bond graph du moteur à courant continu à excitation shunte

Le «  $Gy$  » représente le point de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique, pour la simulation de ce modèle de la (fig 4.18) dans l'outil Symbols Shakti avec le module de simulation « Simulator » pour voir sons fonctionnalité avec les paramètres présentés dans la (Tab 4.3).

PARAMETES	VALEURS [UNITES]
$S_e : U$	220[V]
$R : R_a$	6.76[Ω]
$I : I_a$	0.198[H]
$R : R_e$	880 [Ω]
$I : I_e$	55.366[H]
$R : f$	0.00019[N.m.s.rd <sup>-1</sup> ]
$I : j$	0.0398[Kg.m <sup>2</sup> ]
$R : R$	0.001[Ω]

Tableau 4.3 – Paramètres du Moteur à excitation shunte.

Alors pour la simulation de moteur à courant continu a excitation shunte avec un couple résistant nul.(Fig 4.19), et sur la(Fig 4.20) avec un couple résistant non nul égale 5n.m

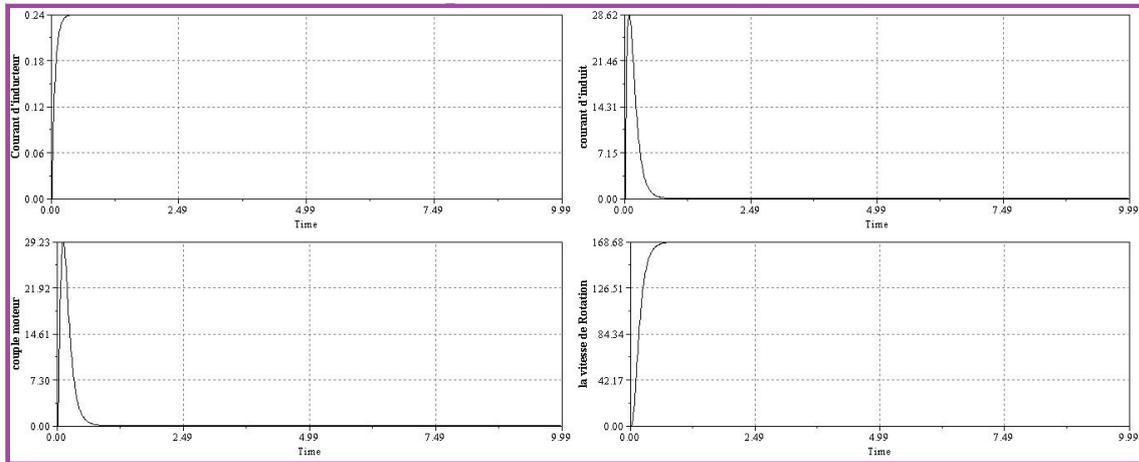


FIGURE 4.19 – Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation shunte (à vide).

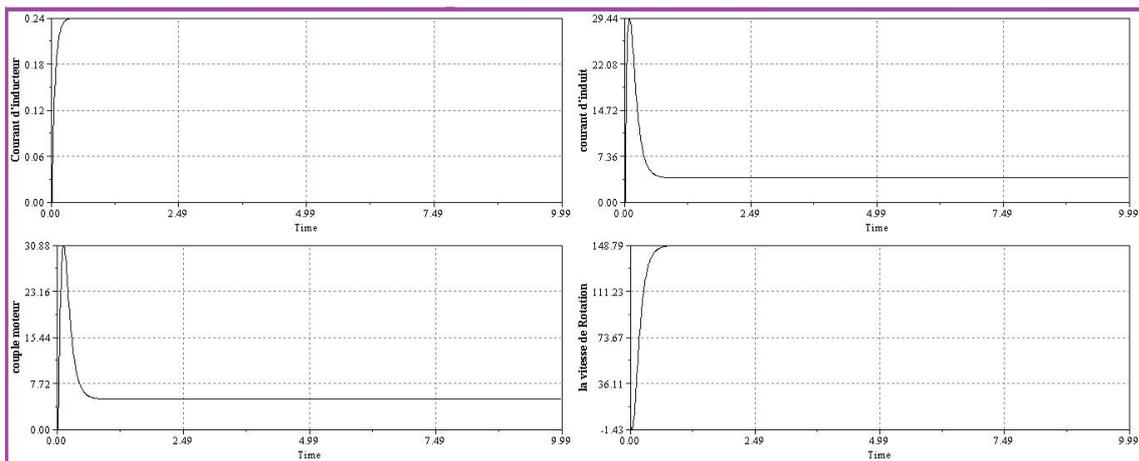


FIGURE 4.20 – Simulation du modèle bond graph du moteur à excitation shunte (en charge).

## 4.7 Surveillance d'un Moteur à Courant Continu :

Dans cette partie notre but consiste à surveiller le moteur à courant continu avec l'outil bond graph qui est adapté parfaitement à l'information des procédures de génération sous forme formelle des modèles dynamiques et des relations de redondance analytique et les matrices de signature des défauts, pour améliorer la surveillance du moteur il faut avoir une meilleure position des capteurs Ça veut dire un placement optimal des capteurs.

### 4.7.1 Excitation série :

Le modèle bond graph du moteur série avec des détecteurs virtuels placés sur toutes les jonctions (**fig 4.21**) dans le but d'assurer un placement optimal de capteurs.

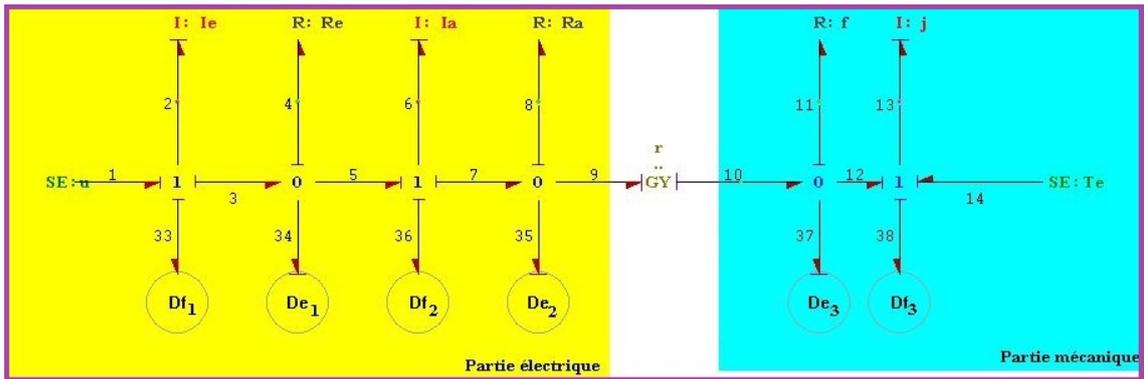


FIGURE 4.21 – Modèle bond graph du Moteur à excitation série avec des détecteurs virtuels.

On suppose que les capteurs et les sources sont connues(mesurées) et ne sont pas défaillants. Donc l'ensembles des variables connues K et inconnues X sont : On suppose que les capteurs et les sources sont connues(mesurées) et ne sont pas défaillants. Donc l'ensembles des variables connues K et inconnues X sont :

$$k = \{U, Tr, Df_1, De_1, Df_2, De_2, Df_3, De_3\}$$

$$X = \{e_2, f_2, e_4, f_4, e_8, f_8, e_{14}, f_{14}, e_{10}, f_{10}, e_{12}, f_{12}\}$$

Du modèle bond graph de la (**fig 4.21**) et En utilisant les lois de structure et les lois constitutives, on peut écrire les équations suivantes :

Jonction	Loi de structure
1 : Ie	$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 - e_2 - e_3 = 0$ $e_1 = S e_1$
0 : Re	$e_3 = e_4 = e_5$ $f_3 - f_4 - f_5 = 0$
1 : Ia	$f_5 = f_6 = f_7$ $e_5 - e_6 - e_7 = 0$
0 : Ra	$e_7 = e_8 = e_9$ $f_7 - f_8 - f_9 = 0$
0 : f	$e_{10} = e_{11} = e_{12}$ $f_{10} - f_{11} - f_{12} = 0$
1 : j	$f_{12} = f_{13} = f_{14}$ $e_{12} - e_{13} + e_{14} = 0$
Gy : r	$f_{10} = r^{-1} e_9$ $f_9 = r^{-1} e_{10}$

Élément	Lois constitutives des éléments
$I_2 : Ie$	$e_2 = \Phi_{I_2} [s \{(1 - z_1) * f_2 + z_1 * Df_1\}]$ $f_2 = \frac{1}{s} * (1 - z_1) * \Phi_{I_2}^{-1} * (e_2) + z_1 * Df_1$
$R_4 : Re$	$e_4 = \Phi_{R_4} * (1 - y_1) * f_4 + y_1 * De_1$ $f_4 = (1 - y_1) * \Phi_{R_4}^{-1} * (e_4) + \Phi_{R_4}^{-1} * y_1 * De_1$
$I_6 : Ia$	$e_6 = \Phi_{I_6} [s \{(1 - z_2) * f_6 + z_2 * Df_2\}]$ $f_6 = \frac{1}{s} * (1 - z_2) * \Phi_{I_6}^{-1} * (e_6) + z_2 * Df_2$
$R_8 : Ra$	$e_8 = \Phi_{R_8} * (1 - y_2) * f_8 + y_2 * De_2$ $f_8 = (1 - y_2) * \Phi_{R_8}^{-1} * (e_8) + \Phi_{R_8}^{-1} * y_2 * De_2$
$R_{11} : f$	$e_{11} = \Phi_{R_{11}} * (1 - y_3) * f_{11} + y_3 * De_3$ $f_{11} = (1 - y_3) * \Phi_{R_{11}}^{-1} * (e_{11}) + \Phi_{R_{11}}^{-1} * y_3 * De_3$
$I_{13} : j$	$e_{13} = \Phi_{I_{13}} [s \{(1 - z_3) * f_{13} + z_3 * Df_3\}]$ $f_{13} = \frac{1}{s} * (1 - z_3) * \Phi_{I_{13}}^{-1} * (e_{13}) + z_3 * Df_3$

En remplaçant les différentes variables dans les équations des jonctions on trouve le système d'équation suivant :

$$r_1 : Se_1 - \Phi_{I_2} [s \{(1 - z_1) * f_2 + z_1 * Df_1\}] - \Phi_{R_4} * (1 - y_1) * f_4 - y_1 * De_1 = 0 \quad (4.14)$$

$$r_2 : \frac{1}{s} * (1 - z_1) * \Phi_{I_2}^{-1} * (e_2) + z_1 * Df_1 - (1 - y_1) * \Phi_{R_4}^{-1} * (e_4) - \Phi_{R_4}^{-1} * y_1 * De_1 - \frac{1}{s} * (1 - z_2) * \Phi_{I_6}^{-1} * (e_6) - z_2 * Df_2 = 0 \quad (4.15)$$

$$r_3 : \Phi_{R_4} * (1 - y_1) * f_4 + y_1 * De_1 - \Phi_{I_6} [s \{(1 - z_2) * f_6 + z_2 * Df_2\}] - \Phi_{R_8} * (1 - y_2) * f_8 - y_2 * De_2 = 0 \quad (4.16)$$

$$r_4 : \frac{1}{s} * (1 - z_2) * \Phi_{I_6}^{-1} * (e_6) + z_2 * Df_2 - (1 - y_2) * \Phi_{R_8}^{-1} * (e_8) - \Phi_{R_8}^{-1} * y_2 * De_2 - r^{-1} * \Phi_{R_{11}} * (1 - y_3) * f_{11} - r^{-1} * y_3 * De_3 = 0 \quad (4.17)$$

$$r_5 : r^{-1} * \Phi_{R_8} * (1 - y_2) * f_8 + r^{-1} * y_2 * De_2 - (1 - y_3) * \Phi_{R_{11}}^{-1} * (e_{11}) - \Phi_{R_{11}}^{-1} * y_3 * De_3 - \frac{1}{s} * (1 - z_3) * \Phi_{I_{13}}^{-1} * (e_{13}) - z_3 * Df_3 = 0 \quad (4.18)$$

$$r_6 : Se_2 + \Phi_{R_{11}} * (1 - y_3) * f_{11} + y_3 * De_3 - \Phi_{I_{13}} [s \{(1 - z_3) * f_{13} + z_3 * Df_3\}] = 0 \quad (4.19)$$

Afin d'aboutir la structure du système de surveillance on utilise les variables binaires

$$z_j (j = 1, 2, 3)$$

Pour faire une simple vérification on prend

$$[z_1 y_1 z_2 y_2 z_3 y_3] = [111111]$$

ça veut dire que tous les capteurs sont placés :

$$r_1 : Se_1 - \Phi_{I_e} * s * Df_1 - De_1 = 0$$

$$r_2 : Df_1 - \Phi_{R_e}^{-1} * De_1 - Df_2 = 0$$

$$r_3 : De_1 - \Phi_{I_a} * s * Df_1 - De_1 = 0$$

$$r_4 : Df_2 - \Phi_{R_a}^{-1} * s * De_2 - r^{-1} * De_3 = 0$$

$$r_5 : r^{-1} * De_2 - \Phi_f^{-1} * De_3 - Df_3 = 0$$

$$r_6 : Se_2 + De_3 - \Phi_j * s * Df_3 = 0$$

La matrice de signatures des défaillances est représentée par le tableau suivant (**Tab 4.4**) : On voit clairement la signature de chaque

	$\Phi_{R_e}$	$\Phi_{I_e}$	$\Phi_{I_a}$	$\Phi_{R_a}$	$\Phi_f$	$\Phi_j$
$r_1$	0	1	0	0	0	0
$r_2$	1	0	0	0	0	0
$r_3$	0	0	1	0	0	0
$r_4$	0	0	0	1	0	0
$r_5$	0	0	0	0	1	0
$r_6$	0	0	0	0	0	1

Tableau 4.4 – Matrices de signatures des défaillances de la combinaison [111111]

composant est unique et non nulle donc théoriquement chaque composant est détectable et est localisable, donc par ce placement de capteur le système est surveillable. Si on élimine les capteurs placés sur la jonction « 0 :Re » et la jonction « 0 :Ra » la combinaison binaire des capteurs devient

$$[z_1 y_1 z_2 y_2 z_3 y_3] = [101011]$$

Alors les résultats de ce placement sont représentés par le système d'équation suivant :

$$r_1 : Se_1 - \Phi_{I_e} * s * Df_1 - \Phi_{R_e} * (Df_1 - Df_2) = 0$$

$$r_3 : \Phi_{R_e} * (Df_1 - Df_2) - \Phi_{I_a} * s * Df_2 - \Phi_{R_a} * (Df_2 - r^{-1} * De_3) = 0$$

$$r_5 : r^{-1} * \Phi_{R_a} * (Df_2 - r^{-1} * De_3) - \Phi_f^{-1} * De_3 - Df_3 = 0$$

$$r_6 : Se_2 + De_3 - \Phi_j * s * Df_3 = 0$$

La matrice de signatures des défaillances est représentée sur le tableau suivant (**Tab 4.5**)

	$\Phi_{R_e}$	$\Phi_{I_e}$	$\Phi_{I_a}$	$\Phi_{R_a}$	$\Phi_f$	$\Phi_j$
$r_1$	1	1	0	0	0	0
$r_3$	1	0	1	1	0	0
$r_5$	0	0	0	1	1	0
$r_6$	0	0	0	0	0	1

Tableau 4.5 – matrices de signatures des défaillances de la combinaison [101011]

La signature de chaque composant est unique et non nulle donc théoriquement chaque composant est détectable et est localisable, donc par ce placement de capteur le système est surveillable. Afin de résumer, le tableau suivant présente tous les résultats de placement de capteurs pour les toutes les combinaisons possibles :

Nombre de capteurs	Combinaisons possibles	Composants surveillables	Composants non détectables	Composants non localisables
6	[111111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[011111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[101111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[110111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[111011]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[111101]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[111110]	Ra, Ie, Ra, Ia	$\emptyset$	f, j
4	[010111]	Ra, Ia, f, j	$\emptyset$	Re, Ie
4	[011011]	Ra, Ia, f, j	$\emptyset$	Re, Ie
4	[011101]	Ra, Ia, f, j	$\emptyset$	Re, Ie
4	[011110]	Ra, Ia, f, j	$\emptyset$	Re, Ie, f, j
4	[101011]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
4	[101101]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
4	[101110]	Ra, Ie, Ra, Ia	$\emptyset$	f, j
4	[110101]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
4	[110110]	Ra, Ie, Ra, Ia	$\emptyset$	f, j
3	[010101]	Ra, Ie, f, j	$\emptyset$	Re, Ie
3	[010110]	Ra, Ia	$\emptyset$	Re, Ie, f, j
3	[101010]	Ra, Ie, Ra, Ia	$\emptyset$	F, j

FIGURE 4.22 – Signature pour toutes les combinaisons possibles.

Alors le placement de capteur optimal est avec 4 capteurs, trois combinaisons possibles

$$[z_1 y_1 z_2 y_2 z_3 y_3] = [101011], [101101], [110101]$$

Où tous les composants sont détectables ou localisables donc le système est surveillable. On prend le placement donné par la combinaison

$$[101011]$$

, donc la représentation des RRAs correspondantes

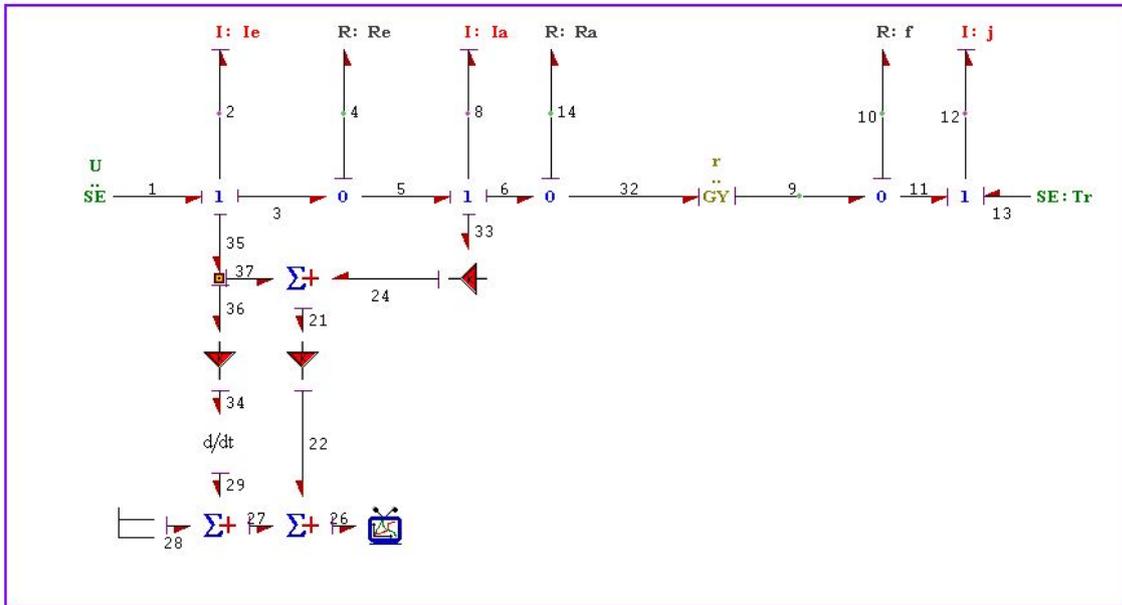


FIGURE 4.23 – Modèles bond graph du résidu «  $r_1$  ».

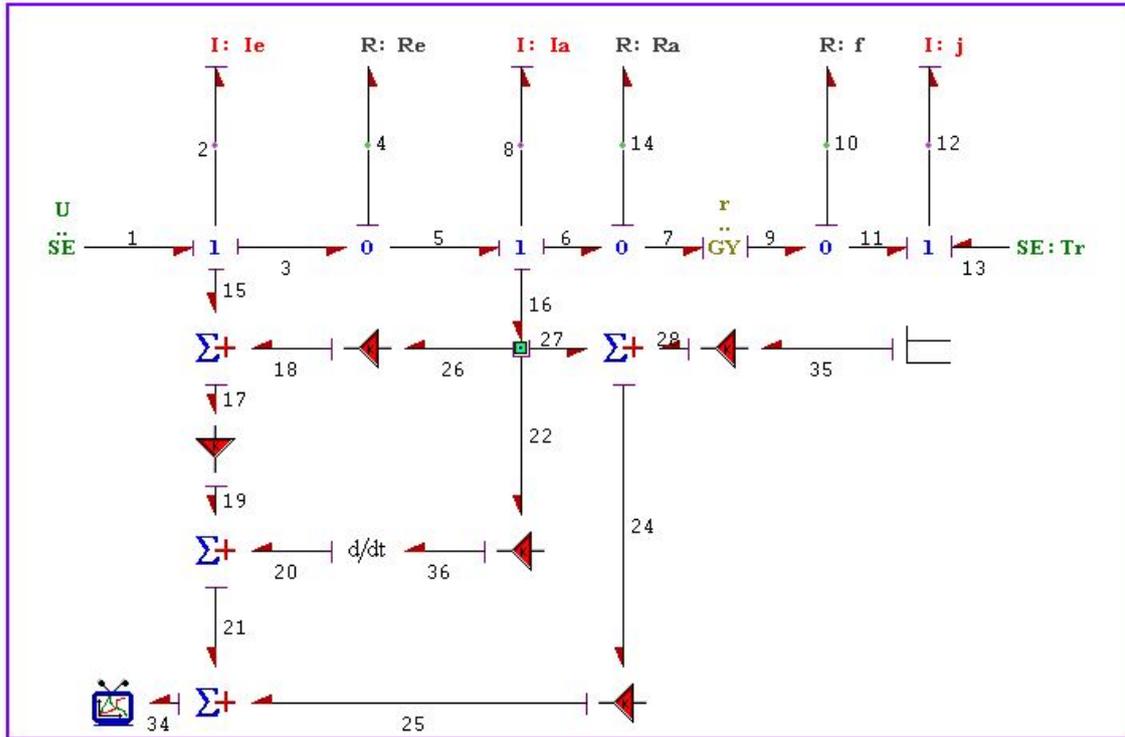


FIGURE 4.24 – Modèles bond graph du résidu «  $r_3$  ».

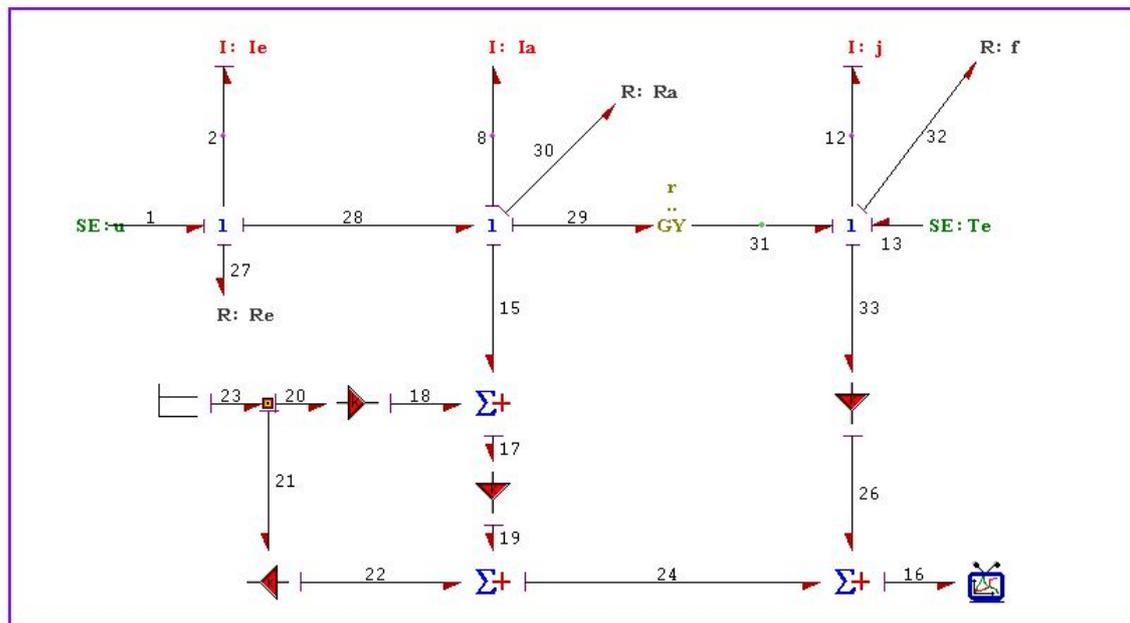


FIGURE 4.25 – Modèles bond graph du résidu «  $r_5$  ».

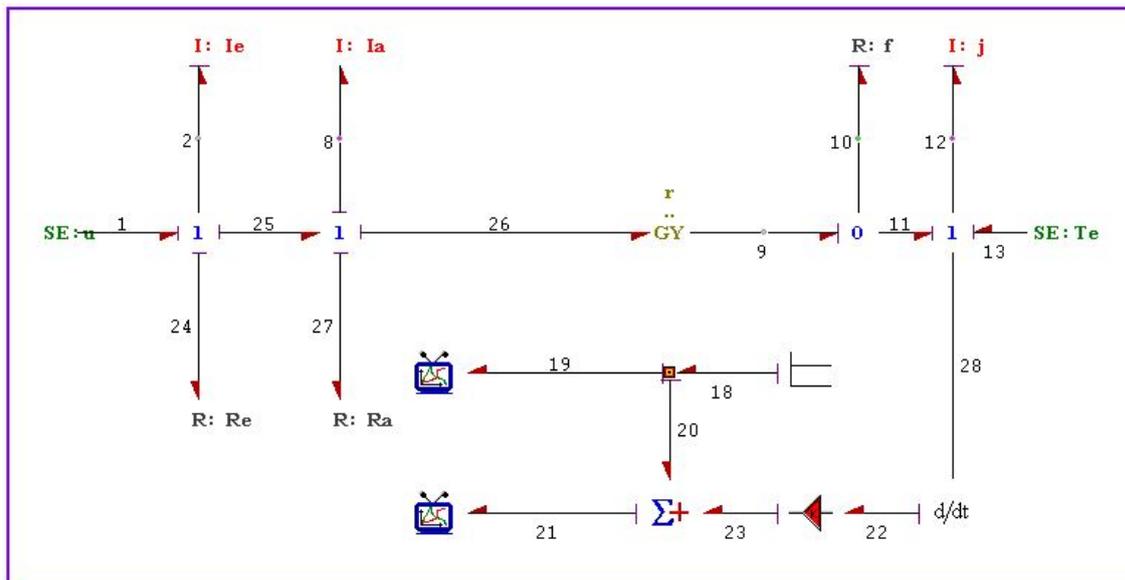


FIGURE 4.26 – Modèles bond graph du résidu «  $r_6$  ».

On fait les simulations des résidus avec le module « Simulator » de l'outil Symbols Shakti Avec les paramètres utilisés dans les simulations précédentes

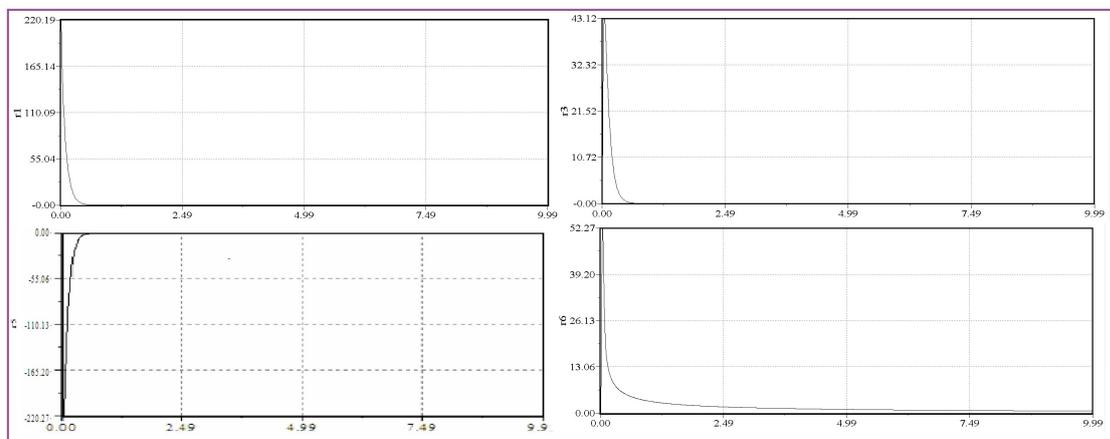


FIGURE 4.27 – Réponses des résidus sans défauts.

On voit clairement que les résidus sans défaut tendent vers zéro maintenant on va voir les réponses des résidus en introduisant des défauts sur les différents éléments.

Des curseurs sont utilisés pour introduire des défaillances dans le moteur (fig 4.28). Par exemple une défaillance a été introduite dans  $R_e$ , en ramenant le curseur de l'élément de sa position maximum 100% à une autre position afin d'introduire une défaillance.

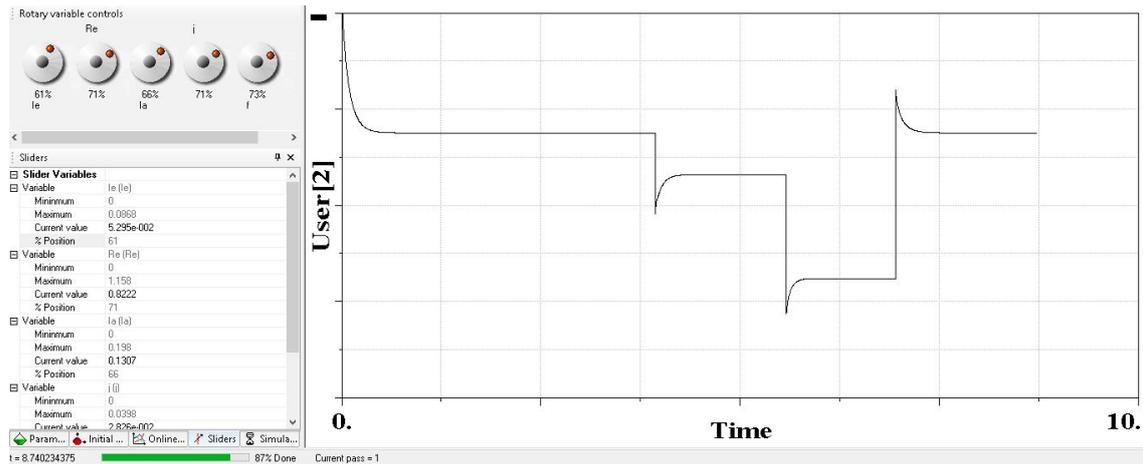


FIGURE 4.28 – Réponses des résidus sans défauts.

#### 4.7.1.1 Réponse des résidus à un défauts de l'élément « $I_e$ »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.5**) seulement le résidu  $r_1$  est sensible à la défaillance du composant  $I_e$ , ceci se voit clairement sur la (**fig 4.29**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément  $I_e$ , on voit que le résidu  $r_1$  présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 6s$  par rapport à l'état initial, on remarque que le résidu  $r_3$  répond faiblement à ce défaut à cause de la présence  $Df_1$  dans son équation, les résidus  $r_5$  et  $r_6$  ne répondent pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

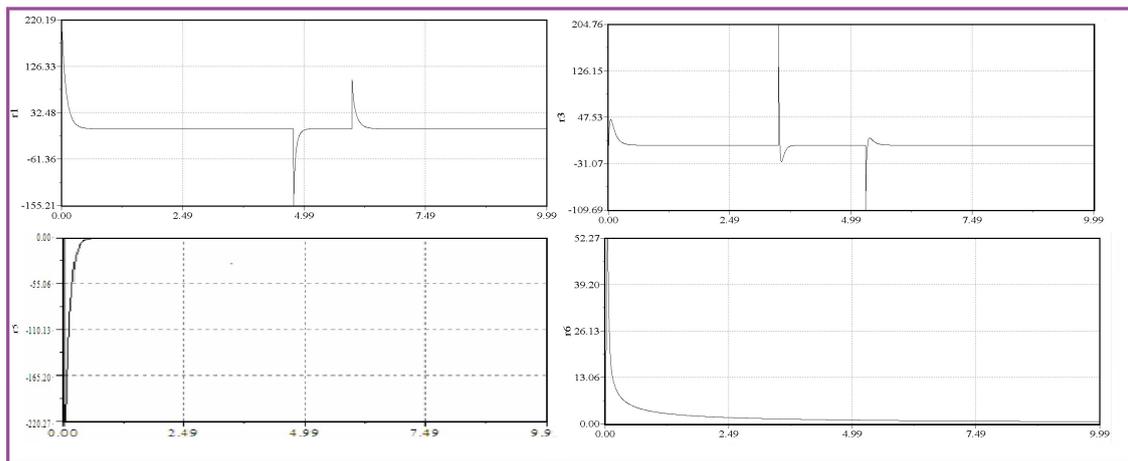


FIGURE 4.29 – Réponses des résidus au défaut de «  $I_e$  ».

#### 4.7.1.2 Réponse des résidus à un défauts de l'élément « Re »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.5**) seulement les résidus  $r_1, r_3$  sont sensibles à la défaillance du composant  $R_e$ , ceci se voit clairement sur la (**fig 4.31**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément  $R_e$ , on voit que le résidu  $r_1, r_2$  présentent une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, on remarque que le résidu  $r_5$  répond faiblement avec un faible pic à ce défaut à cause de la présence  $Df_1$  dans son équation, le résidus  $r_6$  ne répond par contre pas à ce défaut, ce qui correspond bien avec la matrice de signature des défaillances.

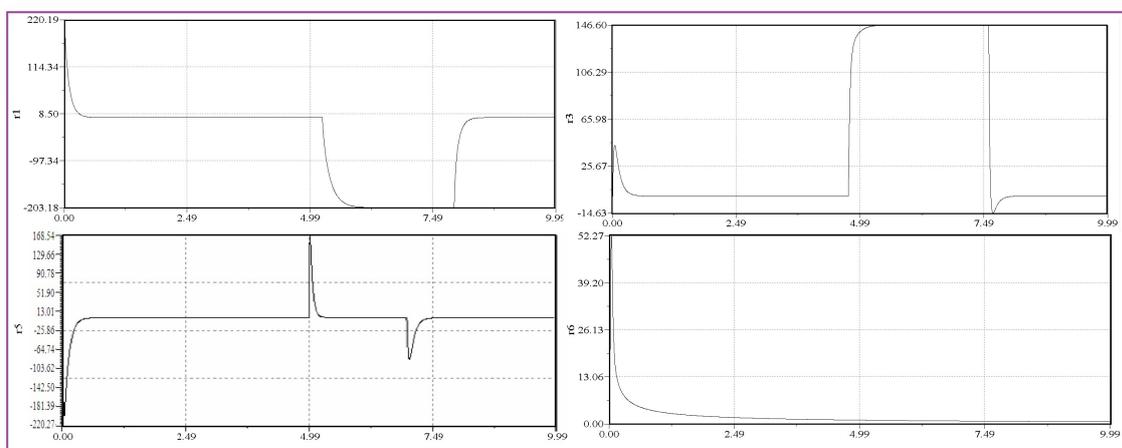


FIGURE 4.30 – Réponses des résidus au défaut de « Re ».

#### 4.7.1.3 Réponse des résidus à un défauts de l'élément « Ia »

La réponse des résidus à ce défaut est montrée par la (**fig 4.31**). On constate que le résidu  $r_3$  répond clairement au défaut produit par l'élément  $I_a$  et présente une déviation par rapport à l'état initial entre les instants  $t = 5s$  et  $t = 7s$  et retourne à son état après un court changement, le résidu  $r_2, r_5$  répond faiblement avec un pic à ce défaut à cause de la perturbation de flux  $Df_2$ , par contre le résidus  $r_6$  ne répond pas à ce défaut ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.5**).

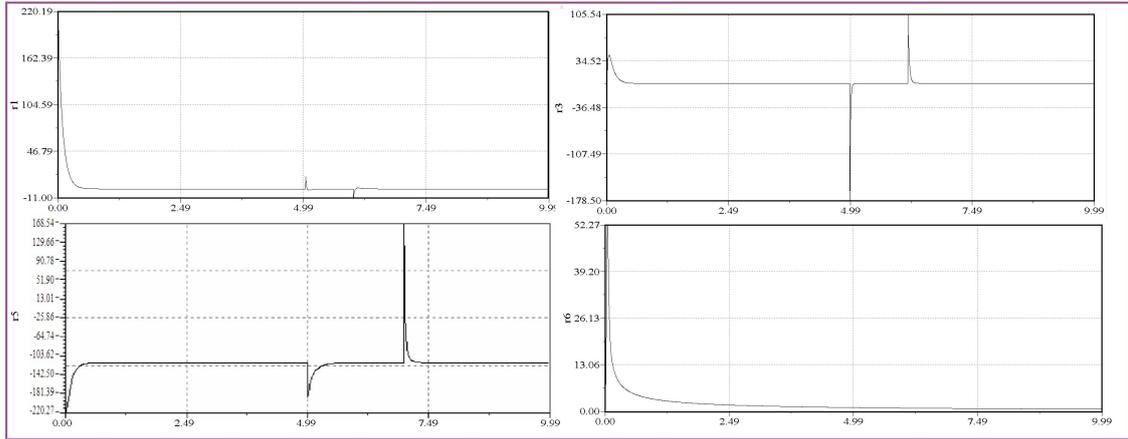


FIGURE 4.31 – Réponses des résidus au défaut de « Ia ».

#### 4.7.1.4 Réponse des résidus à un défauts de l'élément « Ra »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.5**) seulement les résidus  $r_3$ ,  $r_5$  sont sensibles à la défaillance du composant  $R_a$ , ceci se voit clairement sur la (**fig 4.32**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément  $R_a$ , on voit que le résidu  $r_3, r_5$  présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, on remarque que le résidu  $r_1$  répond faiblement avec un faible pic à ce défaut à cause de la perturbation de flux  $Df_2$  le résidu  $r_6$  ne répond pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

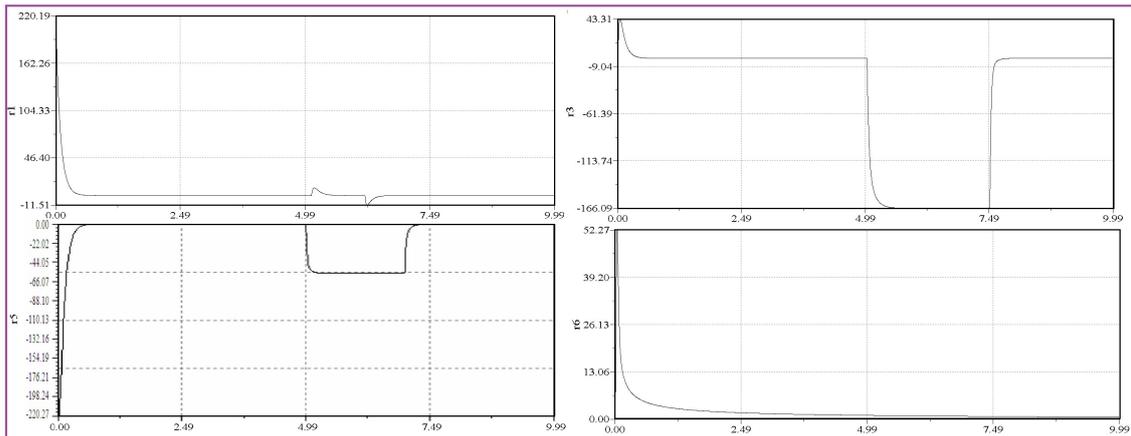


FIGURE 4.32 – Réponses des résidus au défaut de « Ra ».

#### 4.7.1.5 Réponse des résidus à un défauts de l'élément « j »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.5**) et les équations des résidus seulement le résidu  $r_6$  est sensible à la défaillance du

composant  $J$ , ceci se voit clairement sur la (**fig 4.33**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément  $J$ , on voit que le résidu  $r_6$  présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, on remarque que les résidus  $r_1, r_3, r_5$  ne répondent pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

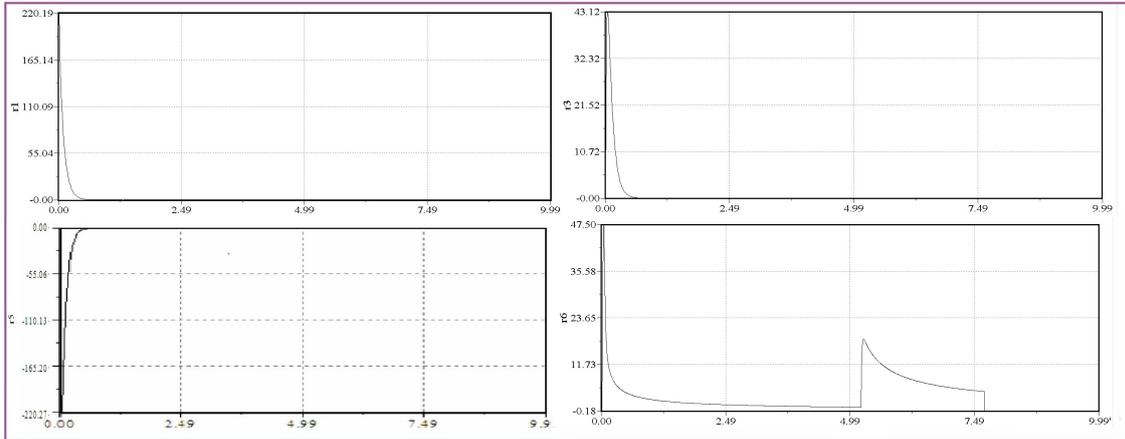


FIGURE 4.33 – Réponses des résidus au défaut de « j ».

#### 4.7.1.6 Réponse des résidus à un défauts de l'élément « f »

D'après la matrice de signature des défaillances(**Tab 4.5**) et les équations des résidus seulement le résidu  $r_5$  est sensible à la défaillance du composant  $f$ , ceci se voit clairement sur la (**fig 4.34**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément  $J$ , on voit que le résidu  $r_5$  présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, on remarque que les résidus  $r_1, r_3, r_6$  ne répondent pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

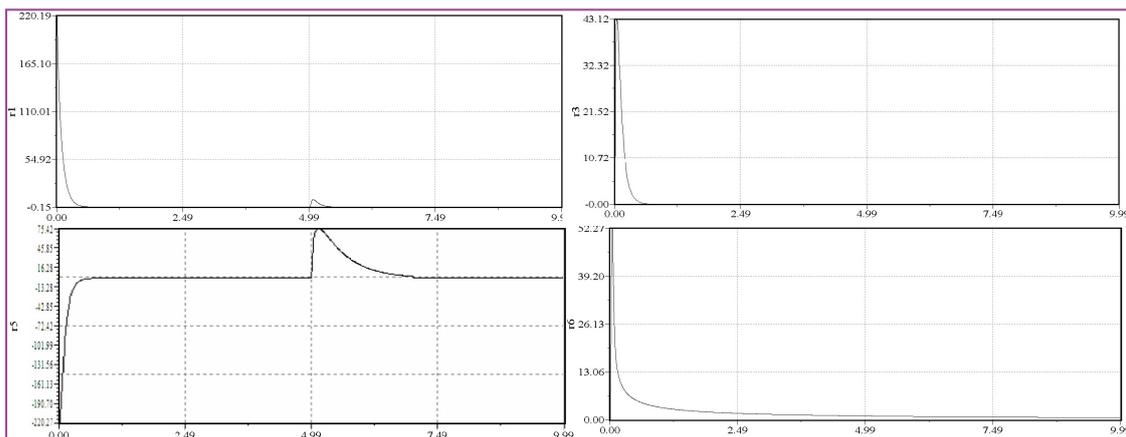


FIGURE 4.34 – Réponses des résidus au défaut de « f ».

#### 4.7.1.7 Génération automatique des RRAs

L'interface FDIPad de SYMBOLS Shakti est consacrée à la réalisation de modèles pour la génération des RRAs. Le modèle global doit être une interconnexion de capsules, où aucun élément bond graph ou source ne doit apparaître, car chaque capsule du modèle est analysée indépendamment des autres. La première étape dans la génération des RRAs sur FDIPad consiste à créer une boîte à outil pour le moteur, en réalisant des nouvelles capsules.

#### 4.7.1.8 Réalisation des capsules :

##### La partie électrique :

Capsule d'alimentation de l'induit et l'inducteur. (**fig 4.35(d)**)

Capsule de l'induit : la résistance  $R_e$  et l'inductance  $I_e$  sont portées sur une jonction « 1 ». Avec une entrée de l'alimentation ( effort input ) et deux sorties de flux ( flow output ) la première sortie vers l'inducteur et l'autre vers le capteur de flux.(**fig 4.35(a)**)

Pour l'inducteur : la résistance  $R_a$  et l'inductance  $I_a$  sont portées sur une jonction 1 avec une entrée de l'alimentation ( effort input ) et deux sorties de flux ( flow output ) la première sortie vers le gyrateur et l'autre vers le capteur de flux. (**fig 4.35(b)**)

##### La partie mécanique :

Le frottement  $f$  est portée sur une jonction « 0 », et l'inertie  $J$  et la charge  $T_r$  sont portées sur une jonction « 1 » avec une sortie de flux ( flow output ) vers le capteur.(**fig 4.35(c)**)

**remarque** : les entrés(input) et les sorties(output) sont considérés comme des ports de connexion.

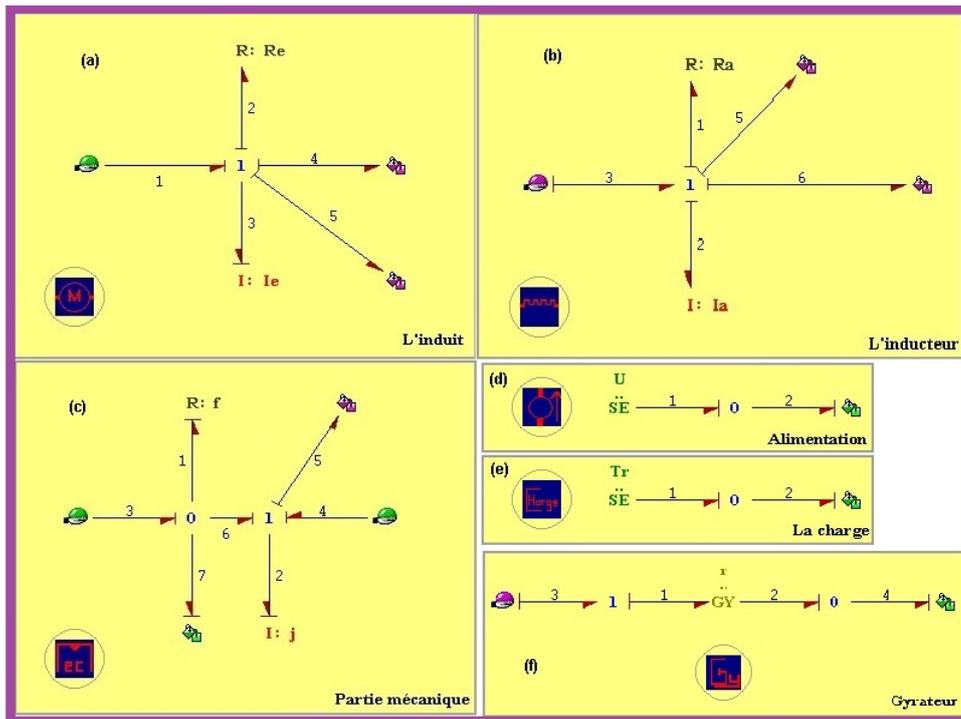


FIGURE 4.35 – Toutes les capsules de MCC à excitation série.

En utilisant ModelBuilder, le modèle architectural du moteur est construit par une simple interconnexion des capsules qui le composent. Ensuite, les liens du modèle sont numérotés comme le montre la (fig 4.36) Ces numéros sont utilisés pour définir les connexions entre les ports des composants.

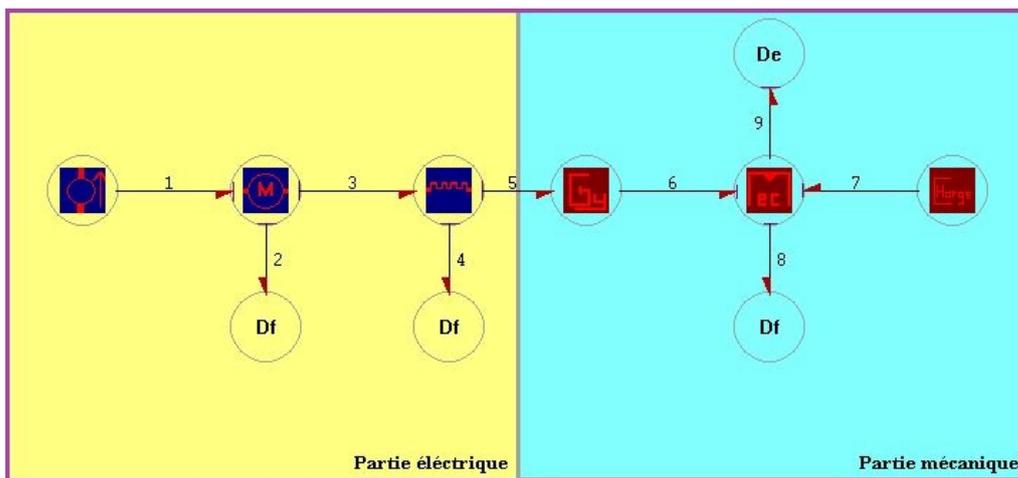


FIGURE 4.36 – Modèle architectural du MCC a excitation série.

Chaque composant du modèle architectural peut être identifié et sa connectivité peut être spécifiée à travers une boîte de dialogue (fig 4.37).

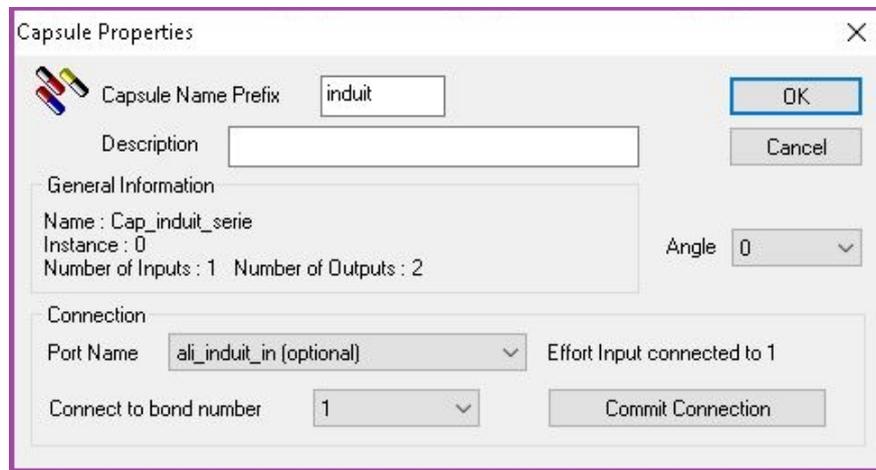


FIGURE 4.37 – Boîte de dialogue pour l'identification d'une capsule

Sur cette boîte de dialogue l'identification et les connexions du l'induit ont été spécifiées. La même chose est produite pour l'inducteur. La connexion entre deux composants est prise en compte après avoir indiqué le nom du port et le numéro du lien à connecter et une fois validé par le bouton ( Commit Connection (. La même procédure est appliquée sur tous les ports et les liens numérotés pour établir la connexion du modèle global. Cette étape est utilisée pour la génération des relations symboliques et des outils pour la surveillance. Sur « ModelBuilder », toutes les commandes relatives à la surveillance sont regroupées dans le sous-menu « FDI » du menu « process » (fig 4.38).

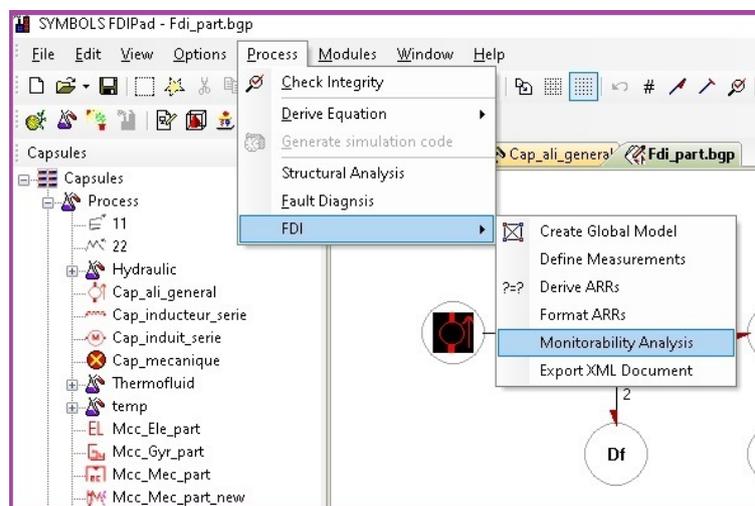


FIGURE 4.38 – Le menu « FDI » de ModelBuilder.

Ensuite en utilisant la commande ( Create global model ) afin de créer en mémoire le modèle bond graph et interconnecter les différents capsules de moteur, il génère les noms des variables automatiquement, la commande ( define measurements ) est utilisé pour changer les noms de ces variables (**fig** 4.39) qui seront ensuite utilisés dans les équations des RRAs. (**Tab** 4.6)



FIGURE 4.39 – Le menu « FDI » de ModelBuilder.

Nom automatique	Variable utilisée
Ali_tension	U
Load_tension	$T_r$
$Df_3\_measurement$	Ia
$Df_2\_measurement$	Ie
$Df_1\_measurement$	$W_r$
$De_{1m}easurement$	Ce

Tableau 4.6 – La nomenclature des variables utilisées dans le moteur.

Alors en utilisant la commande « derive RAAs » afin d’avoir des RAAs qui vont être générées automatiquement par le logiciel (**Fig** 4.40)

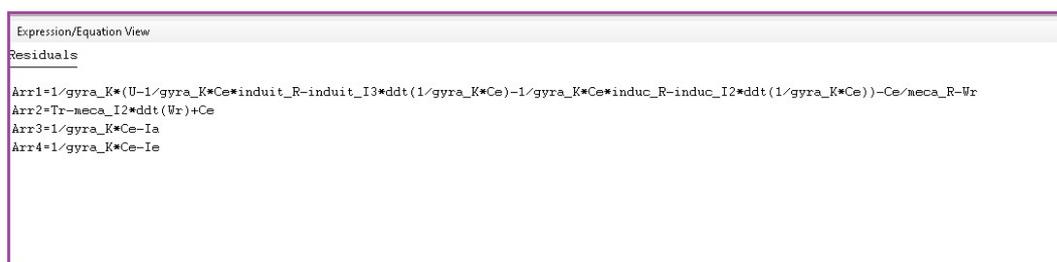


FIGURE 4.40 – Les RRAs générées.

La surveillabilité (détectabilité et isolabilité) des composants du moteur peut être testée en utilisant les RRAs générées. Donc, il faut d'abord exclure sur la boîte de dialogue les éléments qui ne sont pas concernés par la surveillance, ou ne figurant pas dans le cahier des charges (**Fig4.41**)

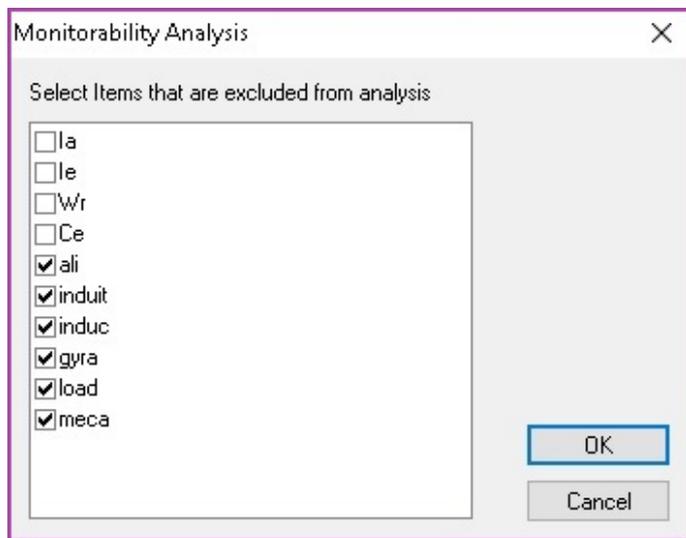


FIGURE 4.41 – Sélection des variables à exclure.

Les variables de mesures, des sources, et chaque capsule créée sont affichées, on a spécifié les variables à exclure comme l'alimentation et la charge en supposant que ils ne sont pas défaillante ainsi que les capsules de l'induit, inducteur et le gyrateur, ce que nous concerne c'est le courant d'induit, et celui de l'inducteur, la vitesse de rotation et couple moteur. Dans la (**Fig4.42**) la matrice des signatures, R1,R2,R3,R4 représentent les résidus,  $M_b$  est  $I_b$  détectabilité et  $I_b$  est l'isolabilité des défaillance. On voit clairement que les variables sont détectables et isolables.

Expression/Equation View

Monitorability Analysis

	$M_b$	$I_b$	R1	R2	R3	R4
Ia	1	1	0	0	1	0
Ie	1	1	0	0	0	1
Wr	1	1	1	1	0	0
Ce	1	1	1	1	1	1

FIGURE 4.42 – Surveillabilité de Moteur.

### 4.7.2 Excitation shunte et séparée

D'après les simulations de ces deux types d'excitation on a obtenu les mêmes résultats, et afin d'éviter la répétition on a travaillé sur le modèle du moteur à excitation shunte.

Alors le modèle bond graph du moteur shunte avec des détecteurs virtuels placés sur toutes les jonctions (**Fig4.43**) dans le but d'assurer un placement optimal de capteurs.

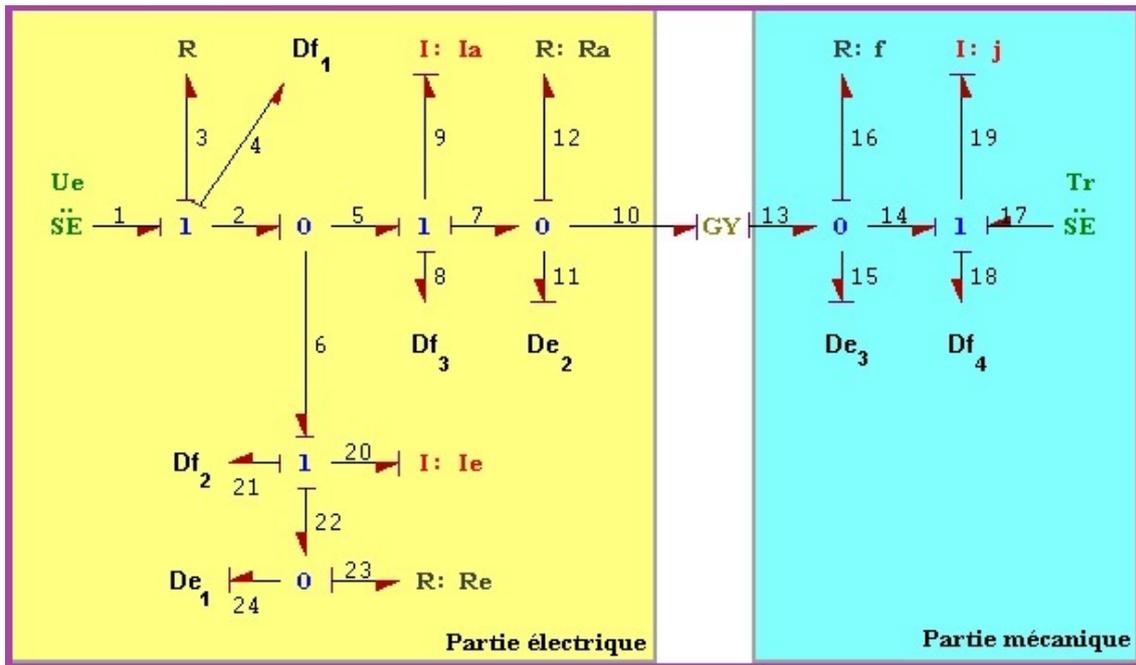


FIGURE 4.43 – Modèle bond graph du Moteur à excitation shunte avec des détecteurs virtuels.

On suppose que les capteurs et les sources sont connus (mesurés) et ne sont pas défaillants.

Donc l'ensemble des variables connues  $K$  et inconnues  $X$  sont :

$$k = \{U, Tr, Df_1, De_1, Df_2, De_2, Df_3, De_3, Df_4\}$$

$$X = \{e_4, f_4, e_{20}, f_{20}, e_{23}, f_{23}, e_9, f_9, 12, f_{12}, e_{16}, f_{16}, e_{19}, f_{19}\}$$

Du modèle bond graph de la (**Fig4.43**) et En utilisant les lois de structure et les lois constitutives, on peut écrire les équations suivantes :

Jonction	Loi de structure
1 : R	$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 - e_2 - e_3 = 0$ $e_1 = S e_1$
1 : Ie	$f_6 = f_{20} = f_{22}$ $e_6 - e_{20} - e_{22} = 0$
0 : Re	$e_{22} = e_{23}$ $f_{22} - f_{23} = 0$
1 : Ia	$f_5 = f_6 = f_7$ $e_5 - e_6 - e_7 = 0$
0 : Ra	$e_7 = e_{12} = e_{10}$ $f_7 - f_{12} - f_{10} = 0$
0 : f	$e_{13} = e_{16} = e_{14}$ $f_{13} - f_{16} - f_{14} = 0$
1 : j	$f_{14} = f_{19} = f_{17}$ $e_{14} - e_{19} + e_{17} = 0$
Gy : r	$f_{10} = r^{-1} e_{13}$ $f_{13} = r^{-1} e_{10}$

Elément	Lois constitutives des éléments
$I_{20} : I_e$	$e_{20} = \Phi_{I_{20}} [s \{(1 - z_2) * f_{20} + z_2 * Df_2\}]$ $f_{20} = \frac{1}{s} * (1 - z_2) * \Phi_{I_{20}}^{-1} * (e_{20}) + z_2 * Df_2$
$R_{23} : R_e$	$e_{23} = \Phi_{R_{23}} * (1 - y_1) * f_{23} + y_1 * De_1$ $f_{23} = (1 - y_1) * \Phi_{R_{23}}^{-1} * (e_{23}) + \Phi_{R_{23}}^{-1} * y_1 * De_1$
$I_9 : I_a$	$e_9 = \Phi_{I_9} [s \{(1 - z_3) * f_9 + z_3 * Df_3\}]$ $f_9 = \frac{1}{s} * (1 - z_3) * \Phi_{I_9}^{-1} * (e_9) + z_3 * Df_3$
$R_{12} : R_a$	$e_{12} = \Phi_{R_{12}} * (1 - y_2) * f_{12} + y_2 * De_2$ $f_{12} = (1 - y_2) * \Phi_{R_{12}}^{-1} * (e_{12}) + \Phi_{R_{12}}^{-1} * y_2 * De_2$
$R_{16} : f$	$e_{16} = \Phi_{R_{16}} * (1 - y_3) * f_{16} + y_3 * De_3$ $f_{16} = (1 - y_3) * \Phi_{R_{16}}^{-1} * (e_{16}) + \Phi_{R_{16}}^{-1} * y_3 * De_3$
$I_{19} : j$	$e_{19} = \Phi_{I_{19}} [s \{(1 - z_4) * f_{19} + z_4 * Df_4\}]$ $f_{19} = \frac{1}{s} * (1 - z_4) * \Phi_{I_{19}}^{-1} * (e_{19}) + z_4 * Df_4$
$R_3 : R$	$e_3 = \Phi_{R_3} [\{(1 - z_1) * f_3 + z_1 * Df_1\}]$ $f_3 = (1 - z_1) * \Phi_{R_3}^{-1} * (e_3) + z_1 * Df_1$

En remplaçant les différentes variables dans les équations de jonction on trouve le système d'équations suivant :

$$r1 : Se_1 - \Phi_{R_3} [\{(1 - z_1) * f_3 + z_1 * Df_1\}] - \Phi_{I_{20}} [s \{(1 - z_2) * f_{20} + z_2 * Df_2\}] - \Phi_{R_{23}} * (1 - y_1) * f_{23} - y_1 * De_1 = 0$$

$$r2 : Se_1 - \Phi_{R_3} [\{(1 - z_1) * f_3 + z_1 * Df_1\}] - \Phi_{I_{20}} [s \{(1 - z_2) * f_{20} + z_2 * Df_2\}] - \Phi_{R_{23}} * (1 - y_1) * f_{23} - y_1 * De_1 = 0$$

$$r3 : \frac{1}{s} * (1 - z_2) * \Phi_{I_{20}}^{-1} * (e_{20}) + z_2 * Df_2 - (1 - y_1) * \Phi_{R_{23}}^{-1} * (e_{23}) - \Phi_{R_{23}}^{-1} * y_1 * De_1 = 0$$

$$r4 : Se_1 - \Phi_{R_3} [\{(1 - z_1) * f_3 + z_1 * Df_1\}] - \Phi_{I_9} [s \{(1 - z_3) * f_9 + z_3 * Df_3\}] - \Phi_{R_{12}} * (1 - y_2) * f_{12} - y_2 * De_2 = 0$$

$$r5 : \frac{1}{s} * (1 - z_3) * \Phi_{I_9}^{-1} * (e_9) + z_3 * Df_3 - (1 - y_2) * \Phi_{R_{12}}^{-1} * (e_{12}) - \Phi_{R_{12}}^{-1} * y_2 * De_2 - r^{-1} * (\Phi_{R_{16}} * (1 - y_3) * f_{16} + y_3 * De_3) = 0$$

$$r6 : r^{-1} * (\Phi_{R_{12}} * (1 - y_2) * f_{12} + y_2 * De_2) - (1 - y_3) * \Phi_{R_{16}}^{-1} * (e_{16}) - \Phi_{R_{16}}^{-1} * y_3 * De_3 - \frac{1}{s} * (1 - z_4) * \Phi_{I_{19}}^{-1} * (e_{19}) - z_4 * Df_4 = 0$$

$$r7 : Se_2 - \Phi_{R_{16}} * (1 - y_3) * f_{16} - y_3 * De_3 - \Phi_{I_{19}} [s \{(1 - z_4) * f_{19} + z_4 * Df_4\}] = 0$$

Afin d'obtenir la structure du système de surveillance on utilise les variables binaires  $y_i (i = 1, 2, 3)$  et  $z_i (j = 1, 2, 3, 4)$  si on veut faire une simple vérification on prend  $[z_1 z_2 y_1 z_3 y_2 y_3 z_4] = [1111111]$  cela signifie que tous les capteurs sont placés

$$r1, r2 : Se_1 - \Phi_R * Df_1 - \Phi_{I_e} * s * Df_2 - De_1 = 0$$

$$r3 : Df_2 - \Phi_{R_e}^{-1} * De_1 = 0$$

$$r4 : Se_1 - \Phi_R * Df_1 - \Phi_{I_a} * s * Df_3 - De_2 = 0$$

$$r5 : Df_3 - \Phi_{R_a}^{-1} * De_2 - r^{-1} * De_3 = 0$$

$$r6 : r^{-1} * De_2 - \Phi_f^{-1} * De_3 - Df_4 = 0$$

$$r7 : Se_2 + De_3 - \Phi_j * s * Df_4 = 0$$

La matrice de signatures des défaillances est représenté sur le tableau suivant (**Tab 4.7**) :

	$\Phi_R$	$\Phi_{R_e}$	$\Phi_{I_e}$	$\Phi_{I_a}$	$\Phi_{R_a}$	$\Phi_f$	$\Phi_j$
$r_2$	1	1	0	0	0	0	0
$r_3$	0	0	1	0	0	0	0
$r_4$	1	0	0	1	0	0	0
$r_5$	0	0	0	0	1	0	0
$r_6$	0	0	0	0	0	1	0
$r_7$	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 4.7 – Matrices de signatures des défaillances de la combinaison [1111111]

On voit clairement que la signature de chaque composant est unique et non nulle donc théoriquement chaque composant est détectable et est localisable, donc par ce placement de capteur le système est surveillables. Si on élimine les capteurs placés sur la jonction « 0 : R » et la jonction « 0 : R<sub>a</sub> » la combinaison binaire des capteurs devient  $[z_1 z_2 y_1 z_3 y_2 y_3 z_4] = [0111011]$ , alors les résultats de ce placement sont représentés par le système d'équations suivant :

$$r2 : Se_1 - \Phi_R * (Df_1 + Df_3) - \Phi_{I_e} * s * Df_2 - De_1 = 0$$

$$r3 : Df_2 - \Phi_{R_e}^{-1} * De_1 = 0$$

$$r4 : Se_1 - \Phi_R * (Df_1 + Df_3) - \Phi_{I_a} * s * Df_3 - \Phi_{R_a} * (Df_3 - r^{-1} * De_3) = 0$$

$$r6 : r^{-1} * \Phi_{R_a} * (Df_3 - r^{-1} * De_3) * \Phi_{R_f}^{-1} * De_3 - Df_4 = 0$$

$$r7 : Se_2 - De_3 - \Phi_j * s * Df_4 = 0$$

La matrice de signatures des défaillances correspondante est donnée dans le tableau suivant (**Tab 4.8**) :

	$\Phi_R$	$\Phi_{R_e}$	$\Phi_{I_e}$	$\Phi_{I_a}$	$\Phi_{R_a}$	$\Phi_f$	$\Phi_j$
$r_2$	1	1	0	0	0	0	0
$r_3$	0	0	1	0	0	0	0
$r_4$	1	0	0	1	1	0	0
$r_6$	0	0	0	0	1	1	0
$r_7$	0	0	0	0	0	0	1

Tableau 4.8 – Matrices de signatures des défaillances de la combinaison [0111011].

On voit clairement la signature de chaque composant est unique et non nulle donc théoriquement chaque composant est détectable et localisable, donc par ce placement de capteur le système est surveillable. Afin de résumer, le tableau suivant présente tous les résultats de placement de capteurs pour les toutes les combinaisons possibles (**Fig 4.44**).

Alors le placement de capteur optimal est avec 5 capteurs, deux combinaisons possibles  $[z_1 z_2 y_1 z_3 y_2 y_3 z_4] = [0111011], [0111101]$  Où tous les composants sont détectables ou localisables donc le système est surveillables.

On prend le placement donné par la combinaison [0111011], donc la représentation des RRAs correspondantes.

On fait les simulations des résidus avec le module « Simulator » de l'outil Symbols Shakti avec les paramètres utilisés dans les simulations précédentes.

Nombre de capteurs	Combinaisons possibles	Composants surveillables	Composants non détectables	Composants non localisables
7	[1111111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
6	[0111111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
6	[1011111]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[0101111]	R, Ra, Ia, f, J	$\emptyset$	Re, Ie
5	[0110111]	Re, Ra, Ia	$\emptyset$	Re, Ie, f, j
5	[0111011]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[0111101]	Tous	$\emptyset$	$\emptyset$
5	[0111110]	R, Re, Ie, Ra, Ia	Re, Ra	Re, Ra
4	[0101011]	R, Ie, Ia, f, j	Re, Ie	Re, Ie
4	[0101101]	R, Ie, Ra, Ia, j	Re, f	Re, f
4	[0101110]	R, Ie, Ra, Ia, f	Re, j	Re, j
4	[0110101]	Re, Ra, j	Ia, f	Re, Ie
4	[0110110]	Re	R, Ie, Ra, f, Ia, j	R, Ie, Ra, f, Ia, j
4	[0111010]	R, Re, Ie, Ia, f	Ra, j	Ra, j

FIGURE 4.44 – Signature pour toutes les combinaisons possibles.

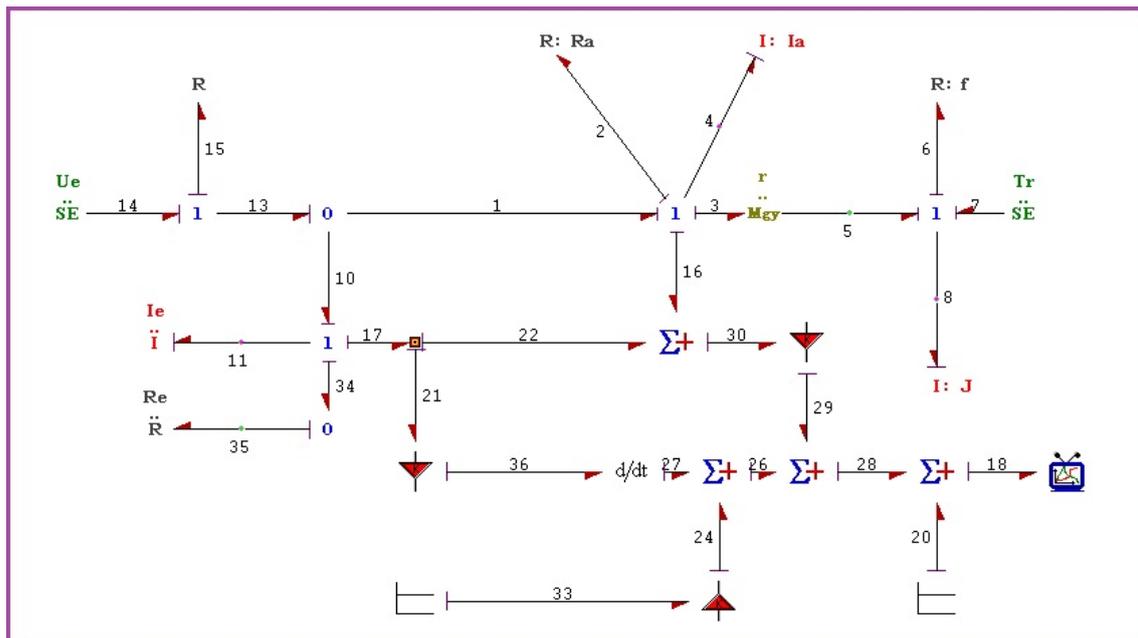


FIGURE 4.45 – Modèle bond graph du résidu  $r_2$ .



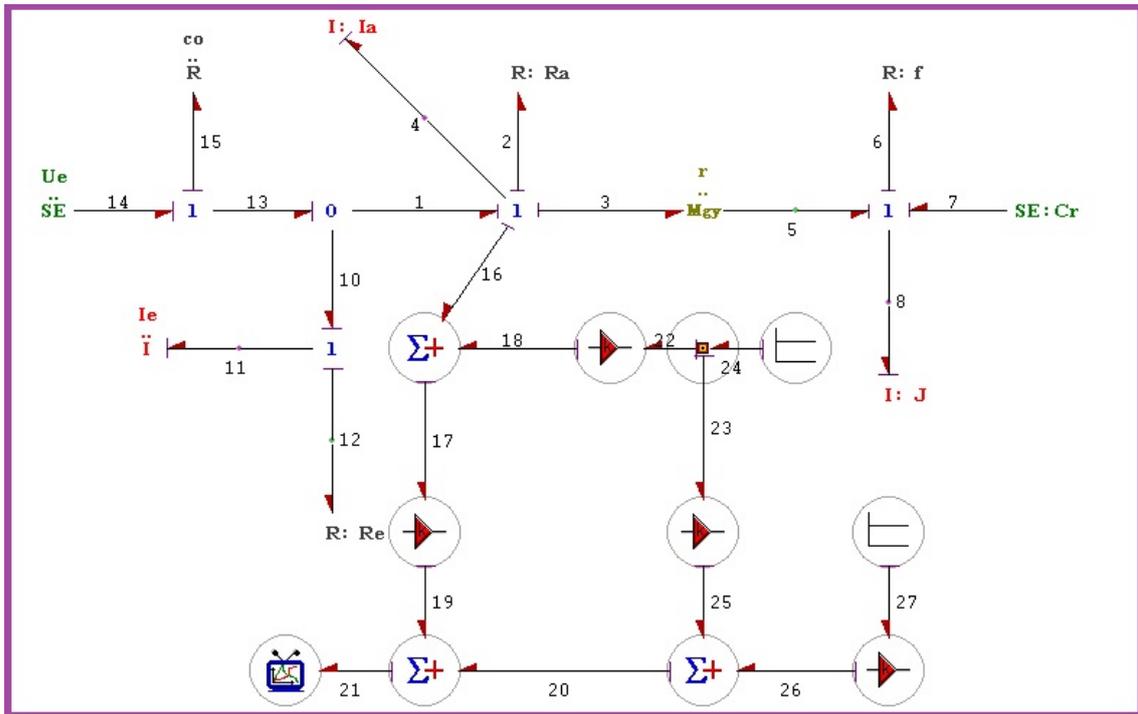


FIGURE 4.48 – Modèles bond graph du résidu «  $r_6$  ».

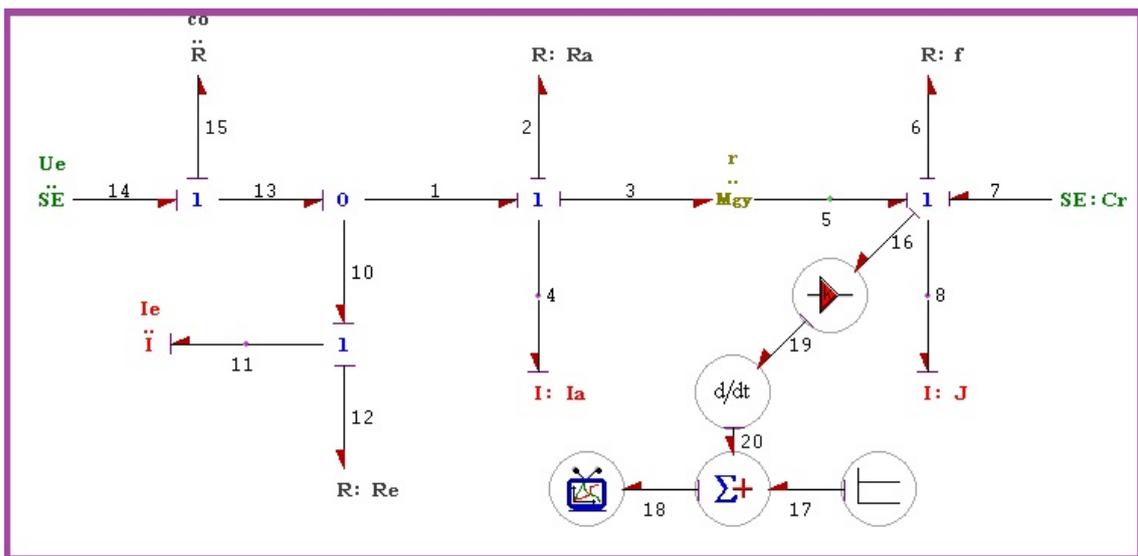


FIGURE 4.49 – Modèles bond graph du résidu «  $r_7$  ».

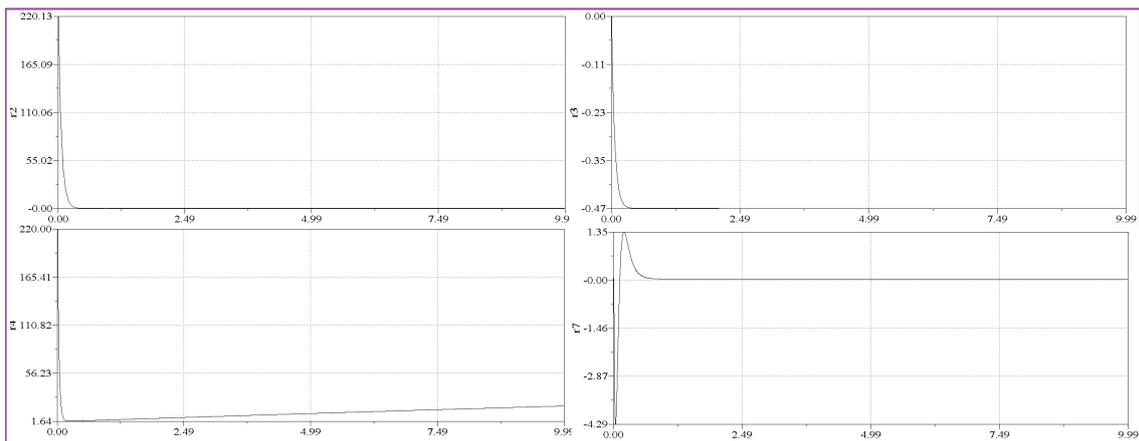


FIGURE 4.50 – Réponses des résidus sans défauts.

On voit clairement que les résidus sans défaut tendent vers zéro, maintenant on va voir les réponses des résidus en introduisant des défauts sur les différents éléments.

#### 4.7.2.1 Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $I_e$ »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.7**) seulement le résidu «  $r_2$  » est sensible à la défaillance du composant «  $I_e$  », ceci se voit clairement sur la (**Fig 4.51**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément «  $I_e$  », on voit que le résidu «  $r_2$  » présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, par contre les résidus «  $r_3, r_4, r_6, r_7$  » ne répondent pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

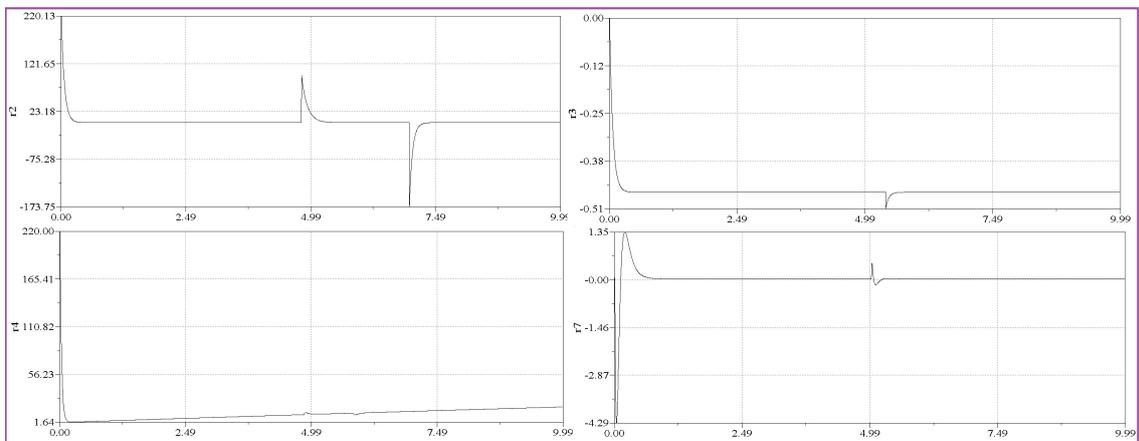


FIGURE 4.51 – Réponses des résidus au défaut de «  $I_e$  ».

#### 4.7.2.2 Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $R_e$ »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.7**) seulement le résidu «  $r_3$  » est sensible à la défaillance du composant «  $R_e$  », ceci se voit clairement sur la (**Fig 4.52**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément «  $R_e$  », on voit que le résidu «  $r_3$  » présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, on remarque que le résidu «  $r_2$  » répond faiblement avec un faible pic à ce défaut à cause de la présence «  $Df_2$  » dans son équation, les résidus «  $r_6, r_4, r_7$  » ne répond pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

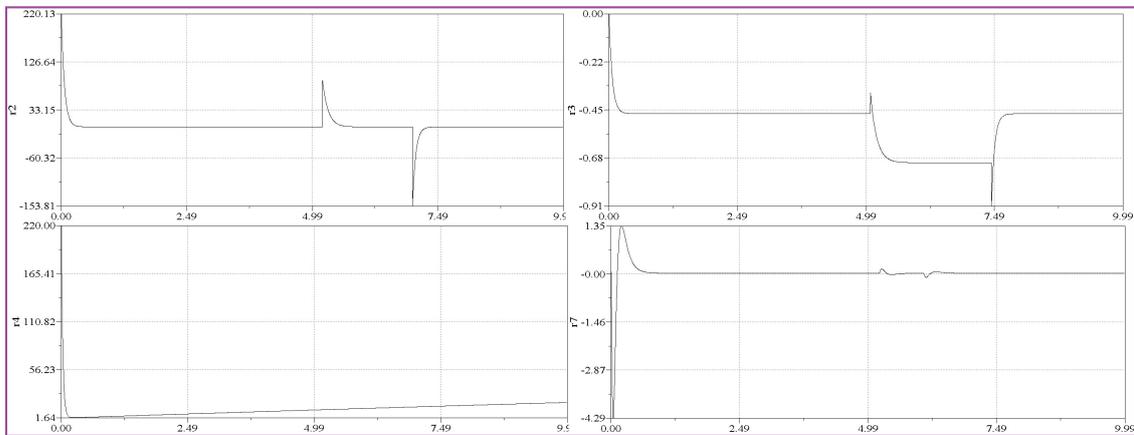


FIGURE 4.52 – Réponses des résidus au défaut de «  $R_e$  ».

#### 4.7.2.3 Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $R_a$ »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.7**) seulement les résidus «  $r_4, r_6$  » sont sensibles à la défaillance du composant «  $R_a$  », ceci se voit clairement sur la (**Fig 4.53**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément «  $R_a$  », on voit que le résidu «  $r_4$  » présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, Par contre les résidus «  $r_2, r_4, r_7$  » ne répond pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

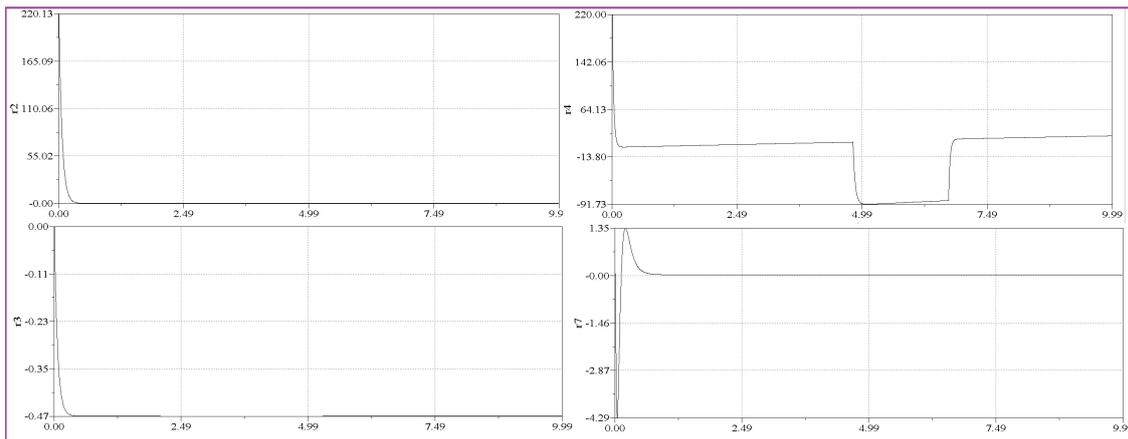


FIGURE 4.53 – Réponses des résidus au défaut de «  $R_a$  ».

#### 4.7.2.4 Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $I_a$ »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.7**) seulement le résidu «  $r_4$  » est sensible à la défaillance du composant «  $I_a$  », ceci se voit clairement sur la (**Fig 4.54**) qui montre les réponses des résidus à ce défaut de l'élément «  $I_a$  », on voit que le résidu «  $r_4$  » présente une déviation entre les instants  $t = 4s$  et  $t = 7s$  par rapport à l'état initial, Par contre les résidus «  $r_2, r_5, r_6, r_7$  » ne réponde pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

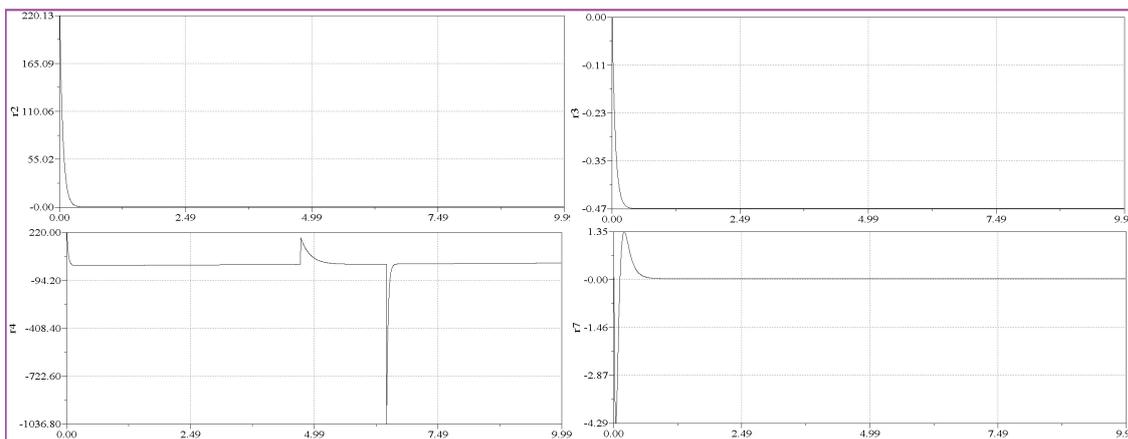


FIGURE 4.54 – Réponses des résidus au défaut de «  $I_a$  ».

#### 4.7.2.5 Réponse des résidus à un défaut de l'élément « $j$ »

D'après la matrice de signature des défaillances (**Tab 4.7**) seulement le résidu «  $r_7$  » est sensible à la défaillance du composant «  $j$  », ceci se voit clairement sur la (**Fig 4.55**) qui montre les réponses des résidus à

ce défaut de l'élément «  $j$  », Par contre les résidus «  $r_2, r_4, r_5, r_6$  » ne réponde pas à ce défaut, ce qui correspond avec la matrice de signature des défaillances.

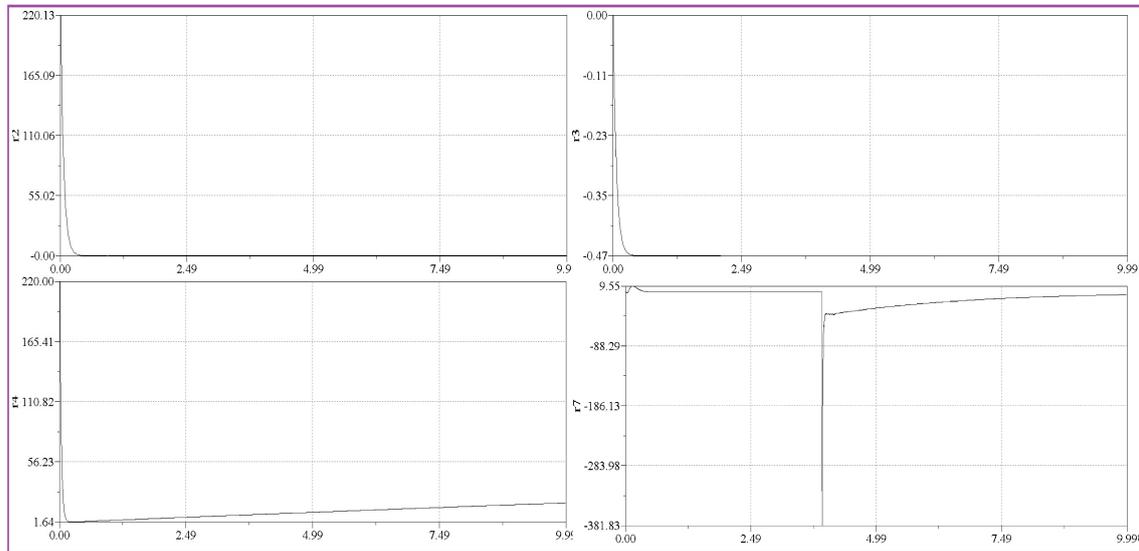


FIGURE 4.55 – Réponses des résidus au défaut de «  $j$  ».

#### 4.7.2.6 Génération automatique des RRAs :

#### 4.7.2.7 Réalisation des capsules :

##### Partie électrique :

Une capsule d'alimentation avec une résistance «  $R$  » afin d'éviter le confit, une source d'effort doit être portée sur une jonction « 1 ».

Capsule de l'induit : la résistance «  $R_e$  » et l'inductance «  $I_e$  » sont portées sur une jonction « 1 ». Avec une entrée de l'alimentation ( effort input ) et deux sorties de flux ( effort output ) la première sortie vers capteur d'effort et l'autre vers le capteur de flux. (**fig 4.56(a)**)

Pour l'inducteur : la résistance «  $R_a$  » et l'inductance «  $I_a$  » sont portées sur une jonction « 1 » avec une entrée de l'alimentation( flow input ) et deux sorties de flux( flow output) la première sortie vers le gyrateur et l'autre vers le capteur de flux. (**fig 4.56(b)**)

##### Partie mécanique :

Le frottement «  $f$  » est portée sur une jonction « 0 », et l'inertie «  $j$  » et la charge «  $T_r$  » sont portées sur une jonction « 1 » avec une sortie de flux (flow output) vers le capteur. (**fig 4.56(c)**)

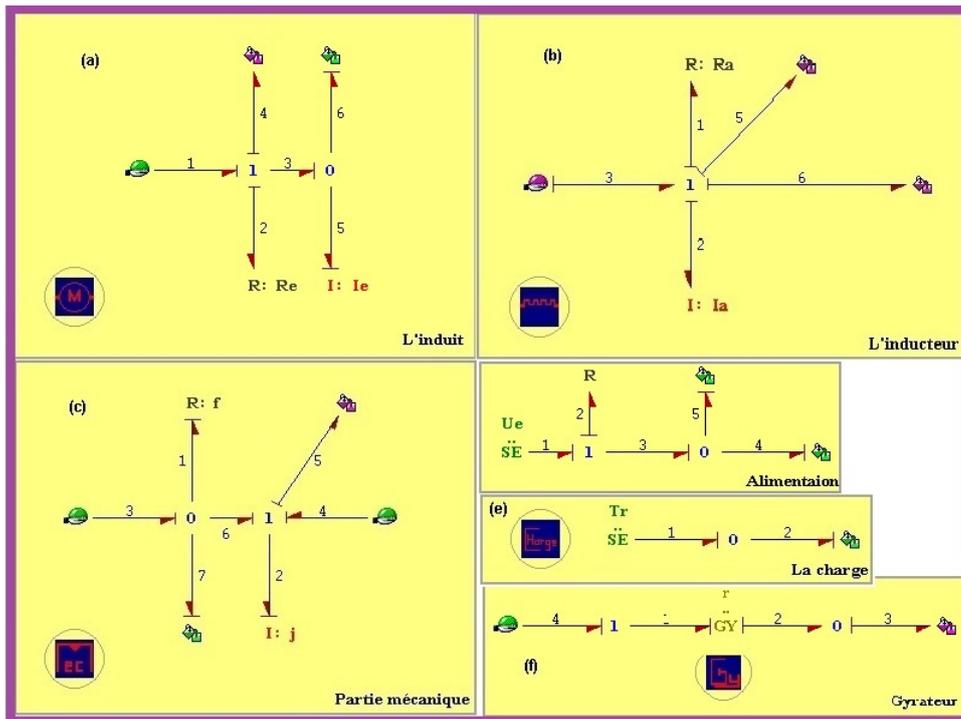


FIGURE 4.56 – Tous les capsules de MCC à excitation shunte.

En utilisant ModelBuilder, le modèle architectural du moteur est construit par une simple interconnexion des capsules qui le composent. Ensuite, les liens du modèle sont numérotés comme le montre la (Fig 4.57) Ces numéros sont utilisés pour définir les connexions entre les ports des composants.

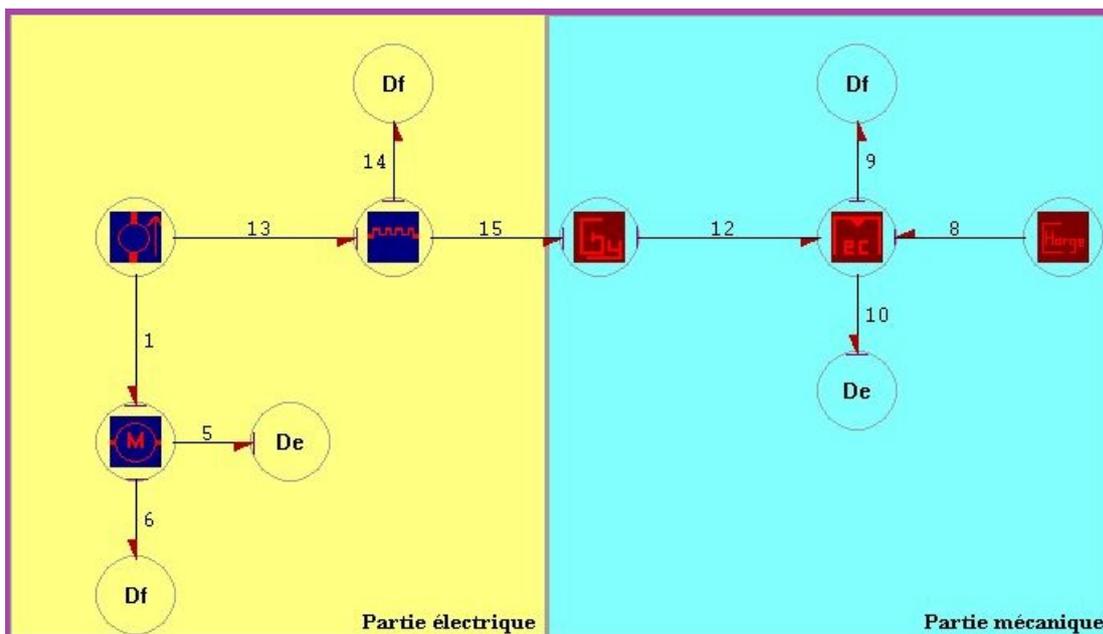


FIGURE 4.57 – Modèle bond graph du Moteur à excitation shunte avec des détecteurs virtuels.

En suivant les mêmes étapes utilisées dans l'excitation précédente les RRA's et la matrice de défaillance comme suivant (**Fig 4.58**) On voit clairement que les variables sont détectables et isolable, En plus dans ce type d'excitation les capsule de chaque partie sont détectables et isolable.

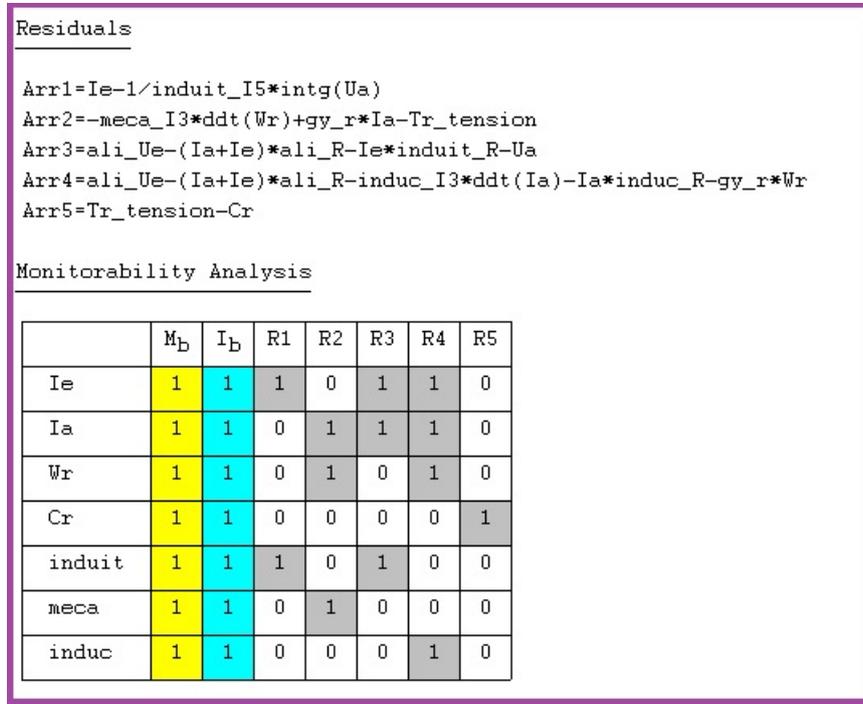


FIGURE 4.58 – Modèle bond graph du Moteur à excitation shunte avec des détecteurs virtuels.

## 4.8 Conclusion

Dans cette approche une application , le générateur à courant continu ,a été considérée pour tester les fonctionnalités de la boîte à outils ModelBuilder. Les modèles bond graphs des composants des processus ont été créés et implémentés sous forme d'objets dans la boîte à outils. Le P&ID de l'installation a été construit en utilisant Model-Builder et les RRAs ainsi que les matrices de signatures des défaillances correspondantes ont été générées. L'analyse de la matrice de signature des défaillances nous a permis de vérifier la surveillabilité du moteur avec le placement de capteurs choisi en suivant algorithme de placement de capteur. Enfin, les résultats trouvés par simulation sont intéressants car les courbes réagissent exactement aux défauts infectés à l'instant précis, ce confirme l'efficacité de cette méthodologie avec l'outil Bond-Graph et le logiciel SYMBOLS .

# Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire nous avons présenté une nouvelle approche intégrée pour la supervision des système électriques. Nous avons utilisé un seul outil pour la modélisation, la générations 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 d'un moteur à courant continu.

En a présenté l'outil bond graph et les critères principal de classification des méthodes de surveillance qui sont basé 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 de différents systèmes physiques. Nous avons appliqué ModelBuilder(BondPad) sur le moteur à courant continu. Cette application nous a permis de tester la boîte à outils et les résultats obtenus ont été conformes aux cahiers des charges fixés permettant ainsi de la valider.

Notre application concerne les méthodes à base de modèle. En utilisant l'outil pour la modélisation graphique, la génération des relations de redondance analytiques (résidus), matrice de défaillance, l'analyse de la surveillabilité et le placement de capteurs en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance. La génération des relations de redondance analytique (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.

Comme perspectives et durant ce travail nous avons relevé quelques points que nous souhaitons développer plus tard : Les RRAs générées ne tenant pas compte les incertitudes des paramètres. afin de générer des RRAs robustes, il est possible de rajouter ces incertitudes graphiquement avec l'outils Bond Graph, Le logicielle SYMBOLS 2000 qu'on a utilisé dans se travail est en version limité (version étudiant) qui est limité à un certain nombre de variable bien définit, nous aimerons bien

de continuer notre travail en modélisent des système plus complexe avec une licence commercial.

# Bibliographie

- [1] Rochdi MERZOUKI et al. *Intelligent mechatronic systems : modeling, control and diagnosis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] HM PAYNTER. *Analysis and Design of Engineering Systems Cambridge*. 1961.
- [3] Karnopp DC Margolis DL Rosenberg RC. *System Dynamics–Modeling and Simulation of Mechatronic Systems 3rd edn New York*. 2000.
- [4] Dean KARNOPP. « State variables and pseudo bond graphs for compressible thermofluid systems ». In : (1979).
- [5] PJ GAWTHROP. « Thermal modelling using mixed energy and pseudo bond graphs ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering* 213.3 (1999), p. 201-216.
- [6] Michele BASSEVILLE et al. « Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behavior ». In : *IEEE Transactions on Automatic control* 32.12 (1987), p. 1067-1075.
- [7] Gilles ZWINGELSTEIN. « Diagnostic des défaillances ». In : *Hermes, Paris* 103 (1995).
- [8] Rosario TOSCANO. *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques : modélisation, analyse, commande par PID et par retour d'état, diagnostic*. ellipses, 2005.
- [9] Samir TOUAF. « Diagnostic logique des systèmes complexes et dynamiques dans un contexte multi-agent ». Thèse de doct. 2005.
- [10] Benjamin DECOTTE. « Identifiabilité structurelle de modèles bond graphs ». Thèse de doct. Lille 1, 2002.
- [11] Claudia VICTORIA et Isaza NARVAEZ. *Diagnostic par techniques d'apprentissage floues : Conception d'une méthode de validation et d'optimisation des partitions*. 2007.
- [12] Antonio Orantes MOLINA. « Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic ». Thèse de doct. 2005.
- [13] Walter NUNINGER. « stratégie de diagnostic robuste a l'aide de la redondance analytique ». Thèse de doct. éditeur inconnu, 1997.
- [14] Lotfi Asker ZADEH. « A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts ». In : *International Journal of Man-machine studies* 8.3 (1976), p. 249-291.

- [15] Mohand Arab DJEZIRI. « Diagnostic des systemes incertains par l'approche bond graph ». Thèse de doct. 2007.
- [16] Wassim EL OSTA. « Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés ». Thèse de doct. 2005.
- [17] I DIF et al. « Détection et localisation des défauts par l'approche bond graph ». In : *Proceedings du premier congrès international sur le génie électrique, CIGE 4* (), p. 206-210.
- [18] Arun K SAMANTARAY et al. « Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* 14.3 (2006), p. 237-262.
- [19] Cristian GHIAUS. « Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph ». In : *Energy and buildings* 30.3 (1999), p. 221-232.
- [20] M KHEMLICHE, B Ould BOUAMAMA et H HAFFAF. « Sensor placement for component diagnosability using bond-graph ». In : *Sensors and Actuators A : Physical* 132.2 (2006), p. 547-556.
- [21] Kamal MEDJACHER. « Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. 2005 ». Thèse de doct. Thèse de doctorat. Lille 1.
- [22] B Ould BOUAMAMA et al. « Model builder using functional and bond graph tools for FDI design ». In : *Control Engineering Practice* 13.7 (2005), p. 875-891.
- [23] M KOSTENKO et L PIOTROVSKI. *Machines électriques, Tome II*. 1979.
- [24] Francois BERNOT. « Machines à courant continu : Constitution et fonctionnement ». In : *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique* 6.D3555 (1999), p. D3555-1.



**ملخص :** تشمل أنظمة المراقبة مجموعة من الأدوات والأساليب للتحكم في العمليات الصناعية في ظروف العمل العادية وكذلك في حالة وجود أعطال والأنشطة الرئيسية التي تتناولها أنظمة المراقبة هي كشف الأعطال وعزلها (FDI) والتشخيص واتخاذ القرار. تقدم هذه الأطروحة نهجًا جديدًا لمفهوم أنظمة الإشراف المطبقة على العمليات الصناعية. يستخدم هذا النهج لنمذجة الظواهر الكهربائية والميكانيكية للمحرك ، من مخطط تفصيلي للأنابيب والأجهزة باستخدام الخصائص الهيكلية والسببية لأداة الرسم البياني للسندات للتوليد التلقائي ، والنماذج الديناميكية وعلاقات التكرار التحليلي (مؤشرات الأعطال) مع الحد الأدنى عدد المستشعرات التي تستخدم خوارزمية وضع المستشعر.

**الكلمات المفتاحية:** كشف الأعطال ، التشخيص ، المراقب ، محرك التيار المستمر



**Résumé :** Les systèmes de supervision reposent sur un ensemble d'outils et méthodes afin de contrôler le processus dans des conditions de fonctionnement normales ainsi que dans la présence de défaillances. Leurs rôles principaux sont la surveillance et la détection, l'isolation des fautes (FDI), le diagnostic et la prise de décision en cas de défaillance. Ce mémoire présente une nouvelle approche pour la conception de systèmes de supervision appliqués aux processus industriels. Cette approche est utilisée pour modéliser les phénomènes électriques et mécaniques du moteur, à partir des plans des instruments détaillés en utilisant les propriétés structurelles et causales de l'outil bond graph pour la génération automatique, de modèles dynamiques et les relations de redondance analytique (les indicateurs de défaillances) avec le minimum de capteurs à l'aide de l'algorithme de placement de capteurs.

**Mots clés :** Placement de capteurs, Modélisation, FDI, Surveillance, Bond Graph.



**Abstract :** Supervision systems include a set of tools and methods for the control of industrial processes in normal working conditions as well as in the presence of failures. The main activities addressed by supervision systems are faults detection and isolation (FDI), diagnosis and decision making. This thesis presents a new approach for the conception of supervision systems applied to industrial processes. This approach is used to model the electrical and mechanical phenomena of the engine, from detailed piping and instrumentation diagram using the structural and causal properties of the bond graph tool for automatic generation, dynamic models and analytical redundancy relationships (the fault indicators) with the minimum number of sensors using the sensor placement algorithm.

**Keywords:** Sensor placement, Modelling, FDI, supervision, Bond graph.

