REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté Pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Machines et leurs commandes

Par

Bounab Alaeddine

Thème :

Conception d'une Architecture d'Instrumentation en vue de la Modélisation et de la Surveillance d'un Moteur à Courant Continu

Soutenu le ... / ... / ... devant le Jury

M. Mostefai	**Prof**	**Université de Sétif**	**Président**
M. Khemliche	**M.C**	**Université de Sétif**	**Rapporteur**
M. Abdelaziz	**M.C**	**Université de Sétif**	**Examinateur**
H. Radjeai	**M.C**	**Université de Sétif**	**Examinateur**
L. Rahmani	**M.C**	**Université de Sétif**	**Examinateur**

Remerciements

Je vous remercie humblement de m'avoir octroyé votre confiance et m'avoir supporté au dépend de votre précieux temps, pour tous les efforts déployés sans hésitation aucune, les enseignements et conseils élogieux et pour votre aimable personne.

Veuillez trouver ici, Monsieur « M. KHEMLICHE » mon indéfectible attachement et mon profond respect.

Faible témoignage de ma haute gratitude à Monsieur le Président « M. MOSTEFAI » professeur à l'Université de Sétif, et les Membres du jury « M. ABDELAZIZ, H. RADJEAI et L. RAHMANI » tous des Maîtres de Conférences à l'Université de Sétif d'avoir accepté de juger mon travail et de mener à bien le débat.

Dédicaces

A mes chers Parents

Pour l'amour et l'affection

Qu'ils m'ont donné ;

Pour leurs conseils fructueux

Qui m'ont été prodigués ;

Pour tous ce qu'ils m'ont donné.

Faible reconnaissance de mon indéfectible attachement et ma haute considération.

A mon frère

Pour son soutien

Pour son encouragement

Pour son aide

Je vous aime très fort.

A mes amis et camarades de promotion

Pour tous les merveilleux moments passés ensemble.

A tous mes autres

Pour leur estime

A tous ceux qui mon aidés à l'élaboration de ce mémoire.

Grand Merci.

Photo Tarzville

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 1

I. Machine à courant continu

I.1. INTRODUCTION. 4
I.2. CONSTITUTION DU MOTEUR A COURANT CONTINU (MCC). 5
I.2.1. Pôles principaux 6
I.2.2. Pôles auxiliaires. 7
I.2.3. Carcasse. 7
I.2.4. Induit. 8
I.2.5. Enroulement d'induit. 8
I.2.6. Collecteur. 9
I.2.7. Balais. 9
I.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT. 10
I.3.1. Force électromotrice. 10
I.3.2. Couple électromagnétique. 10
I.3.3. Puissance électromagnétique. 11
I.3. 4. Différentes pertes. 11
I.3.5. Rendement. 12
I.4. MODES D'EXCITATION. 12
I.4.1. Excitation série. 13
I.4.2. Excitation séparée. 14
I.4.3. Excitation shunte. 15
I.4.4. Excitation composée. 16
I.5. CONCLUSION. 17

II. Modélisation et Simulation du moteur à courant continu

II.1. INTRODUCTION. 18
II.2. MODELISATION PAR BOND GRAPH. 19
II.2.1. Bond graph a mots. 21

II.2.2. Modèle bond graph. 21
II.3. APPLICATION. 21
II.3.1. Excitation séparée. 21
II.3.2. Excitation série. 27
II.3.3. Excitation shunte. 30
II.3.3. Excitation composée. 33
II.4. MODELISATION PAR MATLAB SIMULINK. 35
II.4.1. Excitation séparée. 36
II.4.2. Excitation série. 39
II.4.3. Excitation shunte. 41
II.4.4. Excitation Composée. 45
II.5. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS. 49
II.5.1. Excitation séparée. 49
II.5.2. Excitation série. 49
II.5.3. Excitation shunte. 50
II.5.4. Excitation Composée. 50
II.6. CONCLUSION. 51

III. Surveillance du moteur à courant continu

III.1. INTRODUCTION. 52
III.2. DEFINITIONS ET CONCEPTS GENERAUX. 52
III.2.1. Composant « *Component* ». 53
III.2.2. Défaut « *Fault* ». 53
III.2.3. Défaillance « *Failure* ». 53
III.2.4. Panne « *Break-down* ». 53
III.2.5. Résidu « *Residual* ». 53
III.2.6. Diagnostic « *Diagnosis* ». 54
III.2.7. Perturbation. 54
III.3. LES DIFFERENTES ETAPES DE SURVEILLANCE. 54
III.3.1. Acquisition de données. 55
III.3.2. Elaboration d'indicateurs de défauts. 55
III.3.3. Détection. 55
III.3.4. Localisation. 55
III.3.5. Prise de décision. 56

III.4. CLASSIFICATION DES METHODES DE SURVEILLANCE. 56
III.4.1. Méthodes sans modèle analytique 56
III.4.2. Méthodes basées sur les modèles analytiques 60
III.4.3. Surveillance Par Bond Graph. 61
III.4.3.1. L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph. 63
III.4.3.2. L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph. 63
III.5. PLACEMENT DE CAPTEURS 64
III.5.1. Algorithme. 64
III.5.2. Génération de relations de redondance analytique. 67
III.5.3. Matrice de signature des défaillances. 67
III.6. APPLICATION. 67
III.6.1. Excitation série. 67
III.6.1.1. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Re ». 76
III.6.1.2. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Ie ». 77
III.6.1.3. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Ra ». 78
III.6.1.4. Réponse des résidus a un défaut de l'élément « Ia ». 79
III.6.1.5. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « f ». 80
III.6.1.6. Réponse des résidus a un défaut de l'élément « J ». 81
III.6.2. Excitation shunte et séparée. 82
III.6.2.1. Réponse des résidus a un défaut de l'élément « Re ». 91
III.6.2.2. Réponse des résidus a un défaut de l'élément « Ra ». 92
III.6.2.3. Réponse des résidus a un défaut de l'élément « J ». 93
III.6.3. Excitation composée. 94
III.6.3.1. Réponse des résidus a un défaut de l'élément « Re ». 100
III.7. CONCLUSION 101

CONCLUSION GENERALE 102
Annexe A 103
Annexe B 121

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma synoptique de la machine a courant continue. 5
Figure I.2 : Circuit magnétique d'un MCC. 5
Figure I.3 : Constitution du MCC. 6
Figure I.4 : Pôle principal. 6
Figure I.5 : Pôle auxiliaire. 7
Figure I.6 : Inducteur (a et b). 7
Figure I.7 : Induit. 8
Figure I.8 : Tôle d'acier d'un induit en tambour à ventilation axiale. 8
Figure I.9 : Section d'enroulement. 8
Figure I.10 : Disposition d'une section de l'enroulement d'un induit. 9
Figure I.11 : Collecteur. 9
Figure I.12 : Balais montés sur collecteur. 9
Figure I.13 : Diagramme de puissance. 12
Figure I.14 : Modèle électrique équivalent du stator du MCC. 12
Figure I.15 : Modèle électrique équivalent du rotor du MCC. 13
Figure I.16 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation série. 13
Figure I.17 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation séparée. 14
Figure I.18 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation shunte. 15
Figure I.19 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation composée. 16

Figure II.1 : Schéma physique d'un moteur à courant continu (a, b, c, d : types d'excitations) .. 20
Figure II.2 : Etapes à suivre pour la modélisation par bond graph. 21
Figure II.3 : Bond graph à mots du MCC. 22
Figure II.4 : Modèle bond graph du MCC à excitation séparée. 23
Figure II.5 : Ouverture de la fenêtre de simulation 24
Figure II.6 : Choix du modèle à simuler. 24
Figure II.7 : Compilation des données du modèle. 24
Figure II.8 : Création du fichier pour la simulation. 25

Figure II.9 : Vérification du modèle..... 25
Figure II.10 : Fenêtre de simulation..... 25
Figure II.11 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (à vide)..... 26
Figure II.12 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (en charge)..... 27
Figure II.13 : Modèle bond graph du MCC à excitation série. 28
Figure II.14 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation série (à vide). 29
Figure II.15 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation série (en charge). 29
Figure II.16 : Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (réel). 30
Figure II.17 : Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (sans conflit). 31
Figure II.18 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation shunte (à vide). 32
Figure II.19 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation shunte (en charge) 32
Figure II.20 : Modèle bond graph du MCC à excitation composée (sans conflit). 33
Figure II.21 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation composée (à vide). 34
Figure II.22 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation composée (en charge)... 35
Figure II.23 : Schéma du MCC à excitation séparée sur les axes « *d, q* ». 36
Figure II.24 : Modèle Matlab du MCC à excitation séparée. 37
Figure II.25 : Paramètres utiliser pour la simulation du MCC à excitation séparée. 37
Figure II.26 : Simulation du MCC à excitation séparée (a vide). 38
Figure II.27 : Simulation du MCC à excitation séparée (en charge). 38
Figure II.28 : Schéma du MCC à excitation série sur les axes « *d, q* »..... 39
Figure II.29 : Modèle Matlab du MCC à excitation série. 40
Figure II.30 : Paramètres utilisés pour la simulation du MCC à excitation série. 41
Figure II.31 : Simulation du MCC à excitation série (à vide). 41
Figure II.32 : Simulation du MCC à excitation série (en charge). 42
Figure II.33 : Schéma du MCC à excitation shunte sur les axes « *d, q* »..... 42
Figure II.34 : Modèle Matlab du MCC à excitation shunte. 43
Figure II.35 : Paramètres utilisés pour la simulation du MCC à excitation shunte..... 44
Figure II.36 : Simulation du MCC à excitation shunte (à vide). 44
Figure II.37 : Simulation du MCC à excitation shunte (en charge). 45
Figure II.38 : Schéma du MCC à excitation composée sur les axes « *d, q* ». 45
Figure II.39 : Modèle Matlab du MCC à excitation composée. 47
Figure II.40 : Paramètres utilisés pour la simulation du MCC à excitation composée. 47
Figure II.41 : Simulation du MCC à excitation composée (à vide). 48
Figure II.42 : Simulation du MCC à excitation composée (en charge)..... 48

Figure III.1 : Les différentes étapes de surveillance. 54
Figure III.2 : Estimation paramétrique pour la surveillance..... 61
Figure III.3 : Représentation bond graph d'un système de surveillance..... 62
Figure III.4 : Modèle bond graph du MCC Série avec des détecteurs virtuels. 68
Figure III.5 : Modèle bond graph du résidu « r_1 ». 74
Figure III.6 : Modèle bond graph du résidu « r_3 ». 74
Figure III.7 : Modèle bond graph du résidu « r_5 ». 75
Figure III.8 : Modèle bond graph du résidu « r_6 ». 75
Figure III.9 : Réponses des résidus sans défauts. 76
Figure III.10 : Réponses des résidus au défaut de Re. 77
Figure III.11 : Réponses des résidus au défaut de Ie. 78
Figure III.12 : Réponses des résidus au défaut de Ra. 79
Figure III.13 : Réponses des résidus au défaut de Ia. 80
Figure III.14 : Réponses des résidus au défaut de f. 81
Figure III.15 : Réponses des résidus au défaut de J. 82
Figure III.16 : Modèle bond graph du MCC Shunte avec des détecteurs virtuels. 83
Figure III.17 : Modèle bond graph du résidu « r_2 ». 88
Figure III.18 : Modèle bond graph du résidu « r_3 ». 88
Figure III.19 : Modèle bond graph du résidu « r_4 ». 89
Figure III.20 : Modèle bond graph du résidu « r_6 ». 89
Figure III.21 : Modèle bond graph du résidu « r_7 ». 89
Figure III.22 : Réponses des résidus sans défauts. 90
Figure III.23 : Réponses des résidus au défaut de Re. 91
Figure III.24 : Réponses des résidus au défaut de Ra. 92
Figure III.25 : Réponses des résidus au défaut de J. 93
Figure III.26 : Modèle bond graph du MCC Composée avec des détecteurs virtuels. 94
Figure III.27 : Modèle bond graph du résidu « r_2 ». 98
Figure III.28 : Modèle bond graph du résidu « r_3 ». 99
Figure III.29 : Modèle bond graph du résidu « r_4 ». 99
Figure III.30 : Modèle bond graph du résidu « r_6 ». 99
Figure III.31 : Modèle bond graph du résidu « r_8 ». 100
Figure III.32 : Modèle bond graph du résidu « r_9 ». 100
Figure III.33 : Réponses des résidus au défaut de Re. 101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Pertes du MCC. 11

Tableau II.1 : Paramètres du MCC à excitation séparée. 26
Tableau II.2 : Paramètres du MCC à excitation série. 28
Tableau II.3 : Paramètres du MCC à excitation shunte. 31
Tableau II.4 : Paramètres du MCC à excitation composée. 34

Tableau III.1 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [111111] 70
Tableau III.2 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [101111] 71
Tableau III.3 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [101011] 72
Tableau III.4 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [101010]. 72
Tableau III.5 : Signature des différentes combinaisons. 73
Tableau III.6 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [1111111] 86
Tableau III.7 : Signature des différentes combinaisons. 87
Tableau III.8 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [0111011] 88
Tableau III.9 : Signature des différentes combinaisons. 98
Tableau III.10 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison [011101011]. 99

TABLE DES ABREVIATIONS

BG	Bond Graph
Ce	Couple Eléctromagnétique
Cr	Couple Résistant
De	Détecteur d'effort
Df	Détecteur de flux
FDI	Fault Detection and Isolation
f	Frottement
GY	Gyrateur
J	L'Inertie
MAS	Machine Asynchrone
MCC	Moteur a Courant Continu
M_{ij}	Inductance Mutuelle entre (i et j)
Ω	Vitesse de Rotation
PID	Plan d'Instrumentations Détaillé
r	Résidu
RNA	Réseau de Neurone Artificiel
RRA	Relation de redondance analytique
Se	Source d'effort
Sf	Source de flux
SIF	Système d'Inférence Flou
TF	Transformateur

Introduction Générale

La complexité croissante des systèmes industriels automatisés et les contraintes de compétitivité en terme de coût de production, disponibilité et sécurité des installations, ont mobilisé durant ces dernières années une large communauté de chercheurs pour améliorer la surveillance de ce type de procédés. Il est en effet inutile de concevoir des installations industrielles plus complexes, si celles-ci doivent régulièrement présenter un danger pour les personnes, l'environnement et les biens.

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts, connus sous l'expression anglaise FDI « *Fault Détection 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.

Plusieurs travaux ont été réalisés dans la littérature pour développer des méthodes de surveillance, se basant sur les différentes informations disponibles pour décrire le comportement des systèmes. Deux types de méthodes sont utilisées, les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. L'approche qualitative consiste à répartir l'espace paramétrique en plusieurs classes correspondant à des modes de fonctionnement connus, puis de déterminer par apprentissage les relations mathématiques entre les effets (observations des experts, mesures de capteurs et données statistiques), et les causes (les défauts). Mais il n'est généralement pas possible d'identifier tous les modes de fonctionnement possibles du système, à cause de la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques et de leurs variations aléatoires. Cette approche a fait l'objet de plusieurs publications ces dernières années, telles que: [11] qui utilisent les réseaux neuro-flous pour la surveillance d'un moteur à courant continu. Les travaux [17] et [28], utilisent ces réseaux pour décrire les relations de causes à effets, ainsi que les algorithmes génétiques pour optimiser le choix des paramètres

des réseaux de neurones. La difficulté dans la décision est située aux frontières des classes de fonctionnement, due aux incertitudes paramétriques qui représentent pour ce type d'approche, l'ambiguïté sur les observations des experts, les bruits de mesure, et les marges de confiance sur les probabilités calculées à partir des données statistiques.

Pour les approches quantitatives, appelées aussi méthodes à base de modèles, la première étape consiste à générer des relations de redondance analytique, qui expriment la différence entre les informations issues du système réel et celles générées par son modèle de fonctionnement normal. Ces relations appelées également résidus, caractérisent le mode de fonctionnement du système et sont nulles en fonctionnement normal. Cependant, la robustesse de ces approches dépend principalement de la précision du modèle. Parmi les travaux de recherche sur le diagnostic robuste aux incertitudes paramétriques utilisant les méthodes quantitatives. Dans ce papier, on utilise le bond graph pour la génération des résidus.

En ce qui concerne l'intérêt des BG pour la surveillance des systèmes, les systèmes industriels sont régis par plusieurs phénomènes physiques et divers composants technologiques, c'est pourquoi l'usage de l'outil bond graph qui est basé sur une analyse énergétique et multi physique est bien adapté. Par sa structure graphique, l'outil BG permet une analyse causale et structurelle directement sur le modèle. Ces propriétés ont été exploitées initialement pour déterminer les conditions d'observabilité et de commandabilité des systèmes [9]. Dans les approches classiques de surveillance, on se contente principalement des descriptions toutes faites (équations d'état, fonctions de transfert,. . .), alors que dans les systèmes réels le processus est décrit par des schéma PID (Plan d'Instrumentations Détaillé) fournissant l'ensemble de l'architecture d'instrumentation et des boucles de régulation. Le modèle bond graph est une image de ces PID.

Dans le domaine de la surveillance à base de modèle, la conception intégrée des systèmes de surveillance à partir des PID du processus, jusqu'à l'implémentation des algorithmes de surveillance en utilisant un seul outil (les bond graph) sont développées dans ce papier. Par sa structure causale, le parcours des chemins causaux sur le bond graph (qui est un graphe) permet de filtrer les alarmes (détermination de l'origine des défauts), de générer des RRAs (par élimination des variables inconnues). Ainsi le modèle bond graph explicite aussi bien la structure que le comportement du système. Les propriétés fonctionnelles et causales permettent alors de générer les RRAs de façon modulaire sur la base des équations de conservation énergétique issues des jonctions « *0 et 1* ». Enfin, les défauts processus (de type fuite, blocage, jeu mécanique,...) peuvent être systématiquement affectés aux RRAs qui leur sont sensibles, car ces indicateurs sont déduits des équations énergétiques. Cette propriété

permet alors d'automatiser la construction des tableaux de signature des pannes et des matrices d'incidence [29].

Le bond graph étant un modèle physique où les paramètres sont explicitement représentés par des éléments de type résistif R, capacitif C, inductif et inertiel I, . . . etc.

Pour l'organisation du manuscrit, le premier chapitre présente une théorie sur la machine à courant continu qui est l'application de notre travail, le chapitre 2 concerne la modélisation bond graph du moteur à courant continu avec ces différents types d'excitations. Ainsi, une modélisation analytique du même moteur est présentée pour confirmer la fiabilité du bond graph. Le chapitre 3 présente les méthodes qualitatives et quantitatives les plus utilisées dans la littérature pour la surveillance des systèmes qui seront suivies par l'exposition de l'algorithme de génération des RRAs par l'approche bond graph, et l'application de cet algorithme aux différents types d'excitation du moteur à courant continu. Ce manuscrit se termine par une conclusion des résultats obtenus et des perspectives.

CHAPITRE I

Machine à courant continu

I.1. INTRODUCTION

Plus de précision, grand plage de variation de vitesse, facilité de commande avec le moindre coût possible, c'est ce qui est exigé par le marché de l'industrie de ce temps.

Les machines à courant alternatif, synchrone ou asynchrone, utilisées de façon conventionnelle, se prêtent bien à des applications où la vitesse est à peu près constante. La machine à courant continu est plus facile à régler lorsque la vitesse doit varier sur une grande plage. En effet, la machine à courant alternatif requiert une commande beaucoup plus complexe pour réaliser un entraînement à vitesse variable et le convertisseur doit fournir une tension alternative d'amplitude et de fréquence variable. Ces inconvénients réduisent donc son attrait dans les applications à vitesse variable, malgré les avantages qu'elle possède sur la machine à courant continu : robustesse et coût moindre, grâce à l'absence de collecteur, poids réduit…

Les moteurs à courant continu sont des appareils qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. La construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir indifféremment comme moteur ou comme génératrice [20].

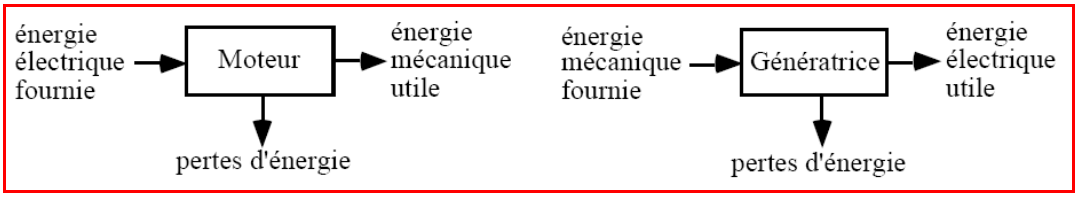


Figure I.1 : Schéma synoptique de la machine a courant continue.

Beaucoup d'applications nécessitent un couple de démarrage élevé. Or, le moteur à courant continu, par nature, possède une caractéristique couple/vitesse de pente importante, ce qui permet de vaincre un couple résistant élevé, et d'absorber facilement les coups de charge ; la vitesse du moteur s'adapte à sa charge [17] [20]. D'autre part, la miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu une solution idéale, puisque présentant un rendement élevé, en comparaison aux autres technologies.

Le choix d'un moteur à courant continu s'est donc imposé comme la meilleure solution pour le réglage de la vitesse et du couple mécanique, les domaines d'application du moteur à courant alternatif étant encore restreints (environnements viciés, endroits difficilement accessibles…) [6].

I.2. CONSTITUTION DU MOTEUR A COURANT CONTINU (MCC)

Le moteur comprend :

- un circuit magnétique [1] comporte une partie fixe, le stator, une partie tournante, le rotor et l'espace entre les deux parties, l'entrefer.

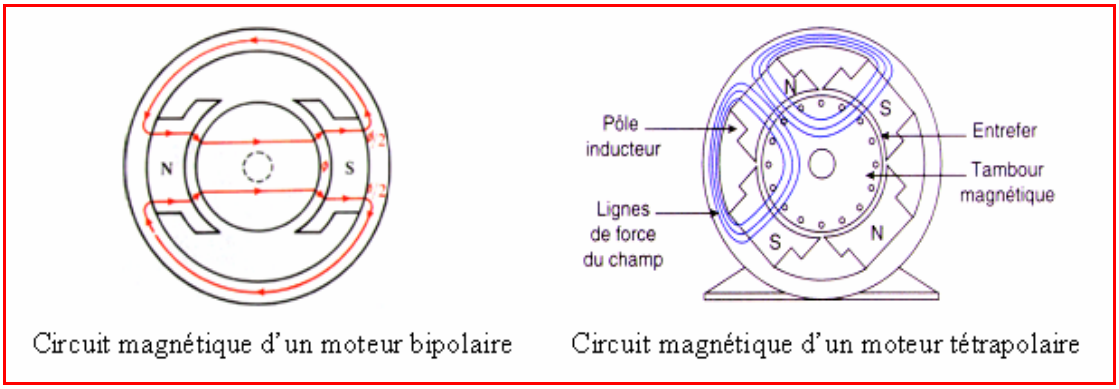


Figure I.2 : Circuit magnétique d'un MCC.

- Une source de champ magnétique nommée l'inducteur (le stator) créé par un bobinage ou des aimants permanents.
- Un circuit électrique induit (le rotor) subit les effets de ce champ magnétique.
- Le collecteur et les balais permettent d'accéder au circuit électrique rotorique.

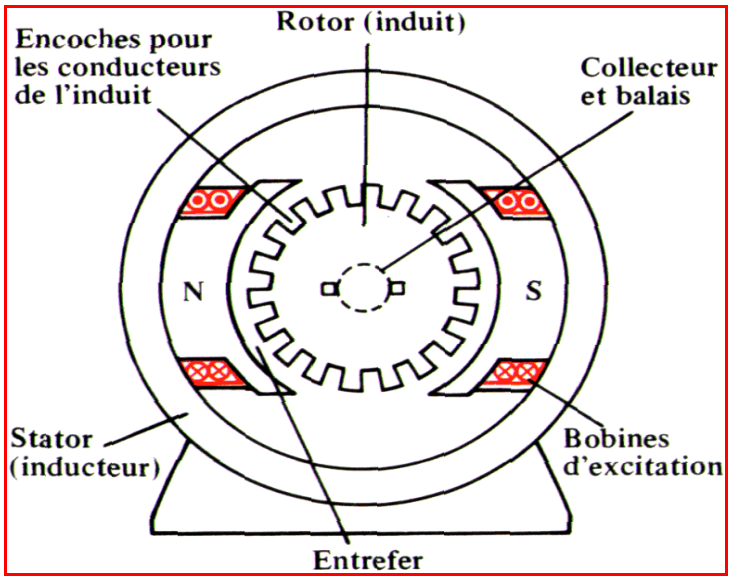


Figure I.3 : Constitution du MCC.

I.2.1. Pôles principaux : Le pole principal (**fig.1.4**) comprend un noyau ***1*** en tôles d'acier électromagnétique de 1mm d'épaisseur. Du coté dirigé vers l'induit le noyau a un épanouissement polaire ***2*** servant à faciliter le passage du flux magnétique par l'entrefer. On place sur le noyau du pôle une bobine de l'enroulement d'excitation ***3*** par laquelle passe un courant continu. La bobine enroulée sur un fourreau ***4*** fabriqué soit en tôle d'acier de 1 ou 2mm d'épaisseur sur laquelle est collé une couche de 2 ou 3mm épaisseur, soit en matière plastique ou en papier bakélisé [6].

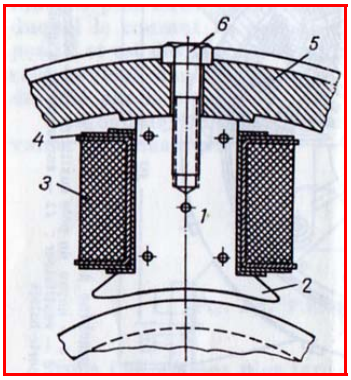


Figure I.4 : Pôle principal.

Afin de réduire l'hygroscopicité et d'augmenter la conduction de la chaleur, les bobines sont imprégnées à plusieurs reprises de vernis chauds et sont ensuite séchées au four. Pour un meilleur refroidissement on divise souvent la bobine en deux ou plusieurs parties en hauteur entre lesquelles on laisse des canaux de ventilation de largeur suffisante. Les pôles sont fixés à la cardasse ***5*** à l'aide de boulons spéciaux ***6***.

I.2.2. Pôles auxiliaires : Le pôle auxiliaire comme le pôle principal comprend un noyau ***1*** qui s'achève par un épanouissement polaire de telle ou autre forme et une bobine ***2*** enroulée sur le noyau.

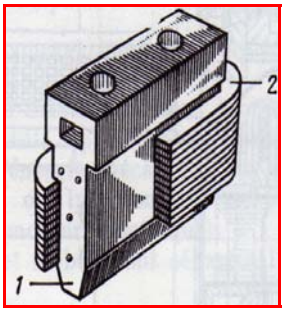


Figure I.5 : Pôle auxiliaire.

Les pôles auxiliaires sont installés exactement au milieu de la distance qui sépare les pôles principaux et sont fixés à la carcasse par des boulons [6].

I.2.3. Carcasse : On appelle carcasse la partie de la machine à laquelle sont fixés les pôles principaux et auxiliaires et à l'aide de laquelle la machine est réunie à la fondation, une partie de la carcasse qui sert au passage du flux produit par les pôles principaux et auxiliaires est appelée culasse. La carcasse et les pôles (principal et auxiliaire) forment ce qu'on appelle inducteur (stator), comme on peut trouver des inducteurs à aiment permanent [20].

a) bobiné.

b) à aiment permanent.

Figure I.6 : Inducteur. (a et b).[1]

I.2.4. Induit : La partie tournante qui porte l'enroulement actif complète le circuit magnétique, car c'est par elle que se ferment les lignes d'inductions issues des pièces polaires.

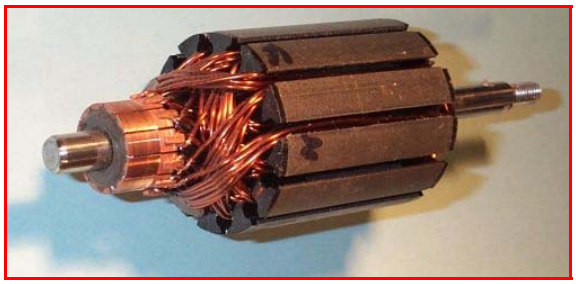


Figure I.7 : Induit. [1]

C'est un cylindre centré sur l'axe de la machine, de même longueur axiale que les pièces polaires, mais d'un diamètre légèrement inférieur à celui de leur alésage.

Il est fait de tôles d'acier magnétique de 0.5mm d'épaisseur. Pour réduire les pertes par courants de Foucault et par hystérésis on les isole au vernis ou au papier de 0.03mm à 0.05mm d'épaisseur [18].

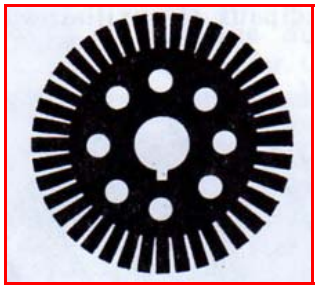


Figure I.8 : Tôle d'acier d'un induit en tambour à ventilation axiale. [20]

I.2.5. Enroulement d'induit : L'enroulement d'induit d'une machine à courant continu a également évolué. Les enroulements d'un induit en tambour utilisés actuellement, se composent de sections **(fig.I.9)** fabriquées le plus souvent sur des gabarits spéciaux et placés dans les rainures de l'armature d'induit **(fig.I.10)**.

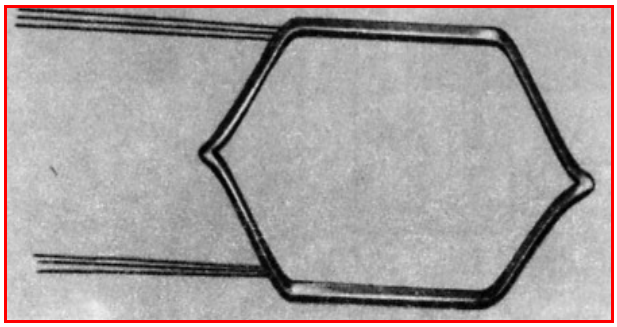


Figure I.9 : Section d'enroulement. [20]

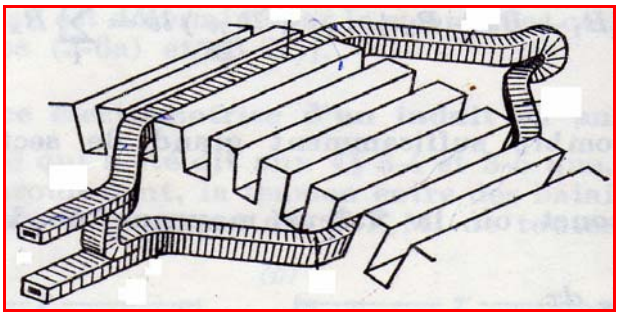


Figure I.10 : Disposition d'une section de l'enroulement d'un induit. [20]

I.2.6. Collecteur : C'est un cylindre centré sur l'axe de la machine et placé devant l'une des faces de l'armature.

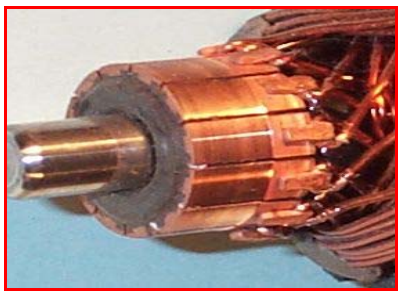
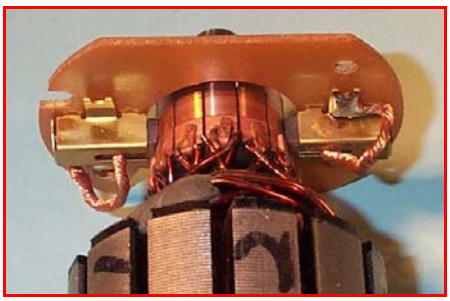


Figure I.11 : Collecteur. [1]

Il est fait de lames de cuivre en forme de coin, isolées les une des autres par des feuilles de mica. Chacune des lames porte une ailette sur laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie de la suivante.

Dans le moteur à courant continu c'est le collecteur qui remplit la fonction capitale (Alimenté par les balais, il distribue successivement le courant aux différentes bobines de l'induit).

I.2.7. Balais : Sur la surface cylindrique du collecteur frottent les balais, qui sont connectés aux bornes de l'induit placées sur la plaque à bornes.



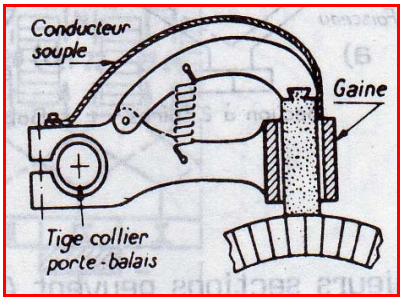


Figure I.12 : Balais montés sur collecteur. [1] ; [20].

Les balais sont faits de graphite, leur pression doit être soigneusement réglée par un ressort pour obtenir un bon fonctionnement en charge.

I.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

I.3.1. Force électromotrice

L'inducteur (ou stator) crée un champ magnétique fixe B. Ce stator peut être à aimants permanents ou constitué (**fig.I.6**).

L'induit (ou rotor) porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumises à des forces (forces dites « de Laplace »), entraînent la rotation du rotor. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.é.m qui est redressée par l'ensemble {collecteur + balais}. [6]

La valeur moyenne E de cette f.é.m est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor, au flux maximal du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire **($\phi = B \cdot S$)** et à une constante **K** qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, surface de chaque spire, nombre de paires de pôles,..)

($K = p \,.\, N / 2.\pi.a$)

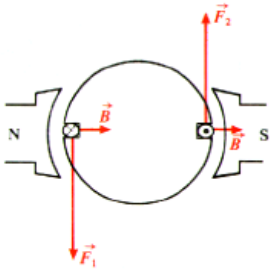
Avec:

- ✓ **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)
- ✓ ϕ : flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)
- ✓ Ω : vitesse de rotation (en $rad.s^{-1}$)

$$E = K \,.\, \Omega \,.\, \phi \quad [V] \qquad \text{(I.1)}$$

I.3.2. Couple électromagnétique

Pour une spire : les deux brins d'une spire placées dans le champ magnétique B, subissent des forces de Laplace F_1 et F_2 formant un couple de force ($F1 = -F_2 = \underline{I.l \wedge B}$?). Pour une spire : $\Gamma = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I$



Donc le couple électromagnétique total développé est :

$$T_{em} = K.\Phi . I \quad [N.m] \quad \text{.....(I.2)}$$

I.3.3. Puissance électromagnétique

Si l'induit présente une f.é.m E et s'il est parcouru par le courant I, il reçoit une puissance électromagnétique **($P_{em} = E. I$)**

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique. [6].

$$P_{em} = T_{em}. \Omega = E. I \quad [Watts] \quad \text{.....(I.3)}$$

I.3. 4. Différentes pertes

Les différentes pertes sont groupées dans le tableau ci-dessous :

Pertes	**Pertes magnétiques** P_{fer}	**Pertes joules** P_J	**Pertes mécaniques** $P_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω.	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux Frottements des diverses pièces en mouvement.
Parades	Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

Tableau I.1 : Pertes du MCC.

Remarque : *La somme des pertes mécaniques et fer est appelée pertes constantes P_c, Comme elles dépendent de la vitesse de rotation et de l'état magnétique de la machine, on peut déterminer T_p appelé couple de pertes avec :*

$$T_p = P_c / \Omega \quad [N.m] \quad \text{.....(I.4)}$$

La figure suivante résume les différents types de puissance et l'emplacement de leur production.

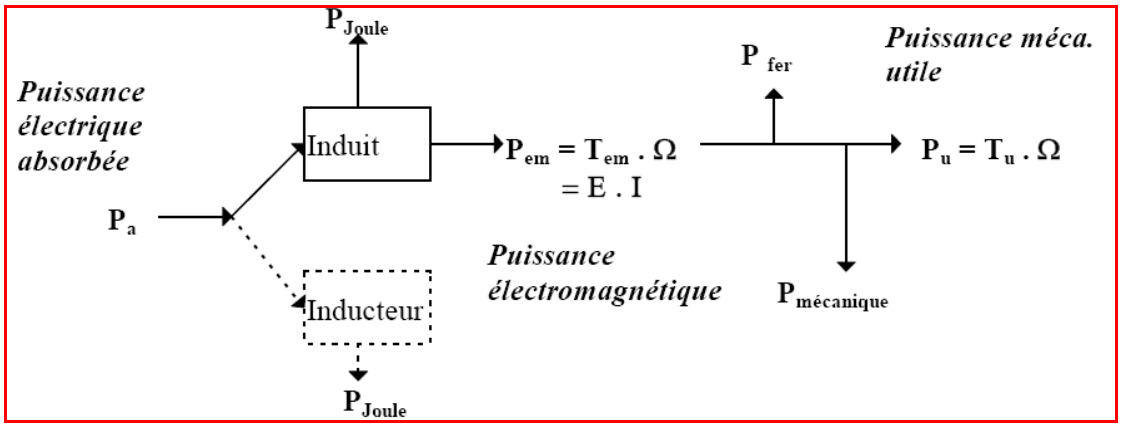


Figure I.13 : Diagramme de puissance.

I.3.5. Rendement

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

I.4. MODES D'EXCITATION

On peut donner un modèle électrique équivalent de l'induit (**fig.I.14**), **E** représente la force électromotrice; **L** représente la self équivalente de l'enroulement d'induit; **R** représente la résistance équivalente de l'induit (résistance des fils du bobinage et résistance de contact au niveau des balais).

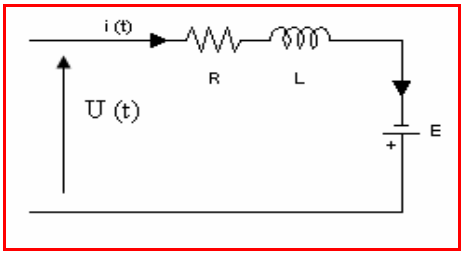


Figure I.14 : Modèle électrique équivalent du rotor du MCC.

Le schéma électrique équivalent de l'inducteur est donné sur la figure suivante :

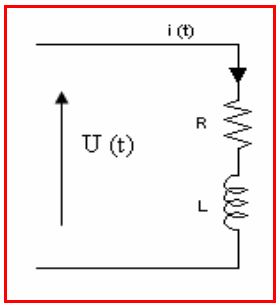


Figure I.15 : Modèle électrique équivalent du stator du MCC.

D'où **L** représente la self équivalente de l'enroulement inducteur; **R** représente la résistance équivalente de l'inducteur (résistance des fils du bobinage).

I.4.1. Excitation série

L'inducteur de ce moteur est en série avec l'induit : le courant d'induit est également le courant d'excitation comme le montre la figure suivante :

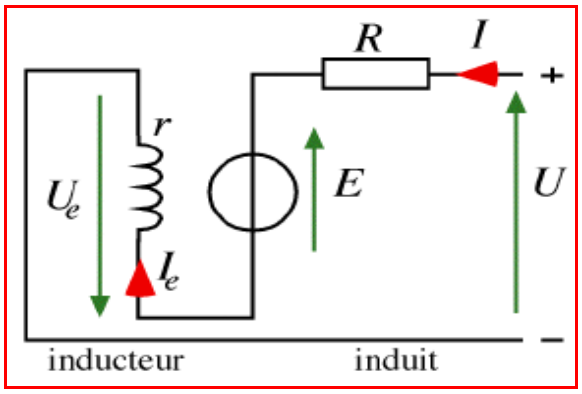


Figure I.16 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation série.

Le bobinage inducteur comporte dans ce cas peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre. Cette conception lui procure une très bonne robustesse face aux vibrations et lui a valu un succès inégalé en traction ferroviaire.

- **Equations caractérisant le MCC à excitation série**

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$	[V]	(I.5)
$U = E + (R + r). I$	[V]	(I.6)
$C_e = K. \Phi. I$	[N. m]	(I.7)

Où « *r* » est la résistance de l'inducteur, et « *R* » la résistance de l'induit.

- **Caractéristiques**

✓ Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse.

✓ Ne jamais faire fonctionner le moteur série à vide car si « *I = 0 [A]* », alors « *Ω* » tend vers l'infini.

✓ Toujours mettre le moteur en charge mécanique car si le couple est faible, alors Ω tend vers l'infini.

- **Domaines d'emploi**

✓ Engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges; traction.

I.4.2. Excitation séparée

Dans un moteur à excitation séparée, l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes. Les cas fréquents où la tension d'excitation est constante sont équivalents à ceux des moteurs à aimants permanents, dont le flux est constant.

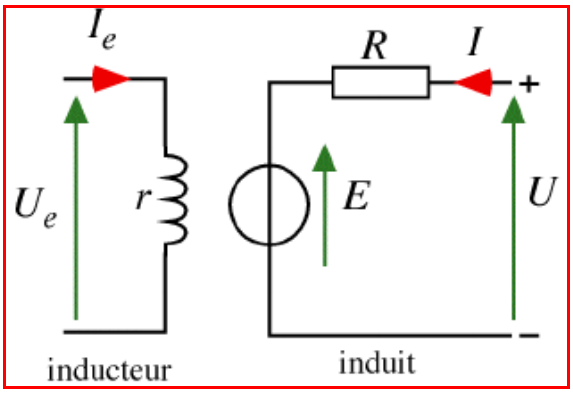


Figure I.17 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation séparée.

- **Equations caractérisant le MCC à excitation séparée**

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$	[V]	(I.8)
$U = E + R.I$	[V]	(I.9)
$C_e = K.\Phi.I$	[N. m]	(I.10)

- **Caractéristiques**

✓ L'inducteur est alimenté par une source indépendante.

✓ Grande souplesse de commande.

✓ Large gamme de vitesse.

✓ Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.

✓ Fourni un couple important à faible vitesse.

- **Domaines d'emploi**

✓ Machines outils : moteur de (broche, d'axe). Machines spéciales.

I.4.3. Excitation shunte

Dans un moteur à excitation shunte, l'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle et alimentés par une seule source de tension continue. Le modèle câblé de ce moteur est présenté sur la figure suivante :

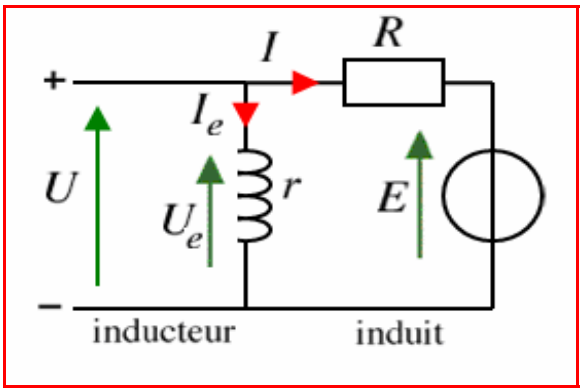


Figure I.18 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation shunte.

- **Equations caractérisant le MCC à excitation shunte**

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$$E = K.\Phi.\Omega \quad [V] \quad \text{(I.11)}$$

$$\begin{cases} U = Ue \\ U = E + R.I \\ Ue = Re.Ie \end{cases} \quad [V] \quad \text{(I.12)}$$

$$C_e = K.\Phi.(I+I_e) \quad [N.m] \quad \text{(I.13)}$$

Remarque : *On remarque qu'il n'y a aucune différence entre le mode d'excitation shunte et l'excitation séparée, en vue des équations mathématiques malgré la grande différence au niveau du câblage (raccordement physique).*

- **Caractéristiques**

  ✓ couple constant quelque soit la charge.

- **Domaines d'emploi**

  ✓ Machines outils, appareil de levage (ascenseur).

I.4.4. Excitation composée

Dans le mode composé, l'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.

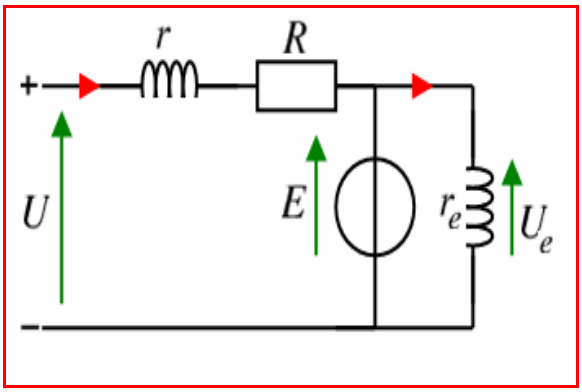


Figure I.19 : Modèle électrique équivalent du MCC à excitation composée.

- **Caractéristiques**

  ✓ Le MCC à excitation composée réuni les avantages du série et du shunte toute en éliminant le phénomène d'emballement du série.

  ✓ Entraînements de grande inertie.

  ✓ Couple très variable avec la vitesse.

- **Domaines d'emploi**

  ✓ Petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie.

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur la machine à courant continu (moteur), sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement et ses différents modes d'excitations.

La machine à courant continu a été durant de nombreuses années l'actionneur utilisé principalement dans les applications à vitesse variable. En effet, comme cela a été mis en évidence, le contrôle de la vitesse de rotation peut être aisément réalisé par action sur la f.é.m d'induit de la machine (en grandeur « permanente », donc moyenne). Sur un autre plan, on peut agir sur le flux inducteur qui est réglé par le courant dans l'inducteur (appelé aussi courant d'excitation).

Le transit de la puissance par des contacts glissants au niveau du collecteur rend cette machine fragile. Elle réclame un entretien périodique de contrôle des balais et des lames du collecteur, voire du changement préventif de ces organes. C'est pourquoi dans les applications de puissance, elle tend actuellement à être remplacée par la machine asynchrone (MAS) beaucoup plus robuste et plus économique.

CHAPITRE II

Modélisation et Simulation du moteur à courant continu

II.1. INTRODUCTION

La modélisation est une phase importante pour ne pas dire primordiale sur le chemin de la simulation. Le modèle adopté devrait faciliter la tâche du programmeur et représenter le plus fidèlement possible l'ensemble des phénomènes que le concepteur cherche à mettre en évidence.

Notre objectif est la modélisation et simulation systémique. Dans cette approche, on s'intéressera à un système global et on cherchera à modéliser et simuler tous les phénomènes dont il pourrait être le siège. Pour atteindre cet objectif le modèle utilisé devrait être le plus général possible et représente de manière homogène des systèmes hétérogènes (pouvant contenir des composantes électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques, . .). Le moteur à courant continu constitue un exemple de système hybride présentant un couplage fort entre les domaines électrique et mécanique.

Dans bien des cas, les automaticiens utilisent des modèles mathématiques, qui malgré leur flexibilité perdent rapidement la signification physique du système et ne permettent pas généralement de faire un retour sur le modèle pour affiner la modélisation ou améliorer la conception du système pour simplifier sa commande. [5], [27]

Un des outils répondant à ces critères est le bond graph ou graphe à liens [8]. En effet, ce langage est basé principalement sur la notion de transfert de puissance entre les différentes parties ou composants du système et sur la transformation de l'énergie dans ces composants (dissipation, stockage, conversion du domaine énergétique). Ces différents phénomènes qui sont analogues dans tous les domaines physiques sont codés graphiquement. Le caractère unifié du bond graph constitue un langage de communication universel entre les experts de différentes disciplines. Grâce à cette décomposition et la représentation graphique, il est facile de décomposer le système en parties ou sous-systèmes et de faire un retour sur n'importe quel sous-système pour améliorer sa conception ou tenir compte d'un phénomène physique négligé ou non pris en compte. Le modèle bond graph peut être alors considéré comme un modèle intermédiaire entre le système physique et le modèle mathématique qui lui est associé [8], [9].

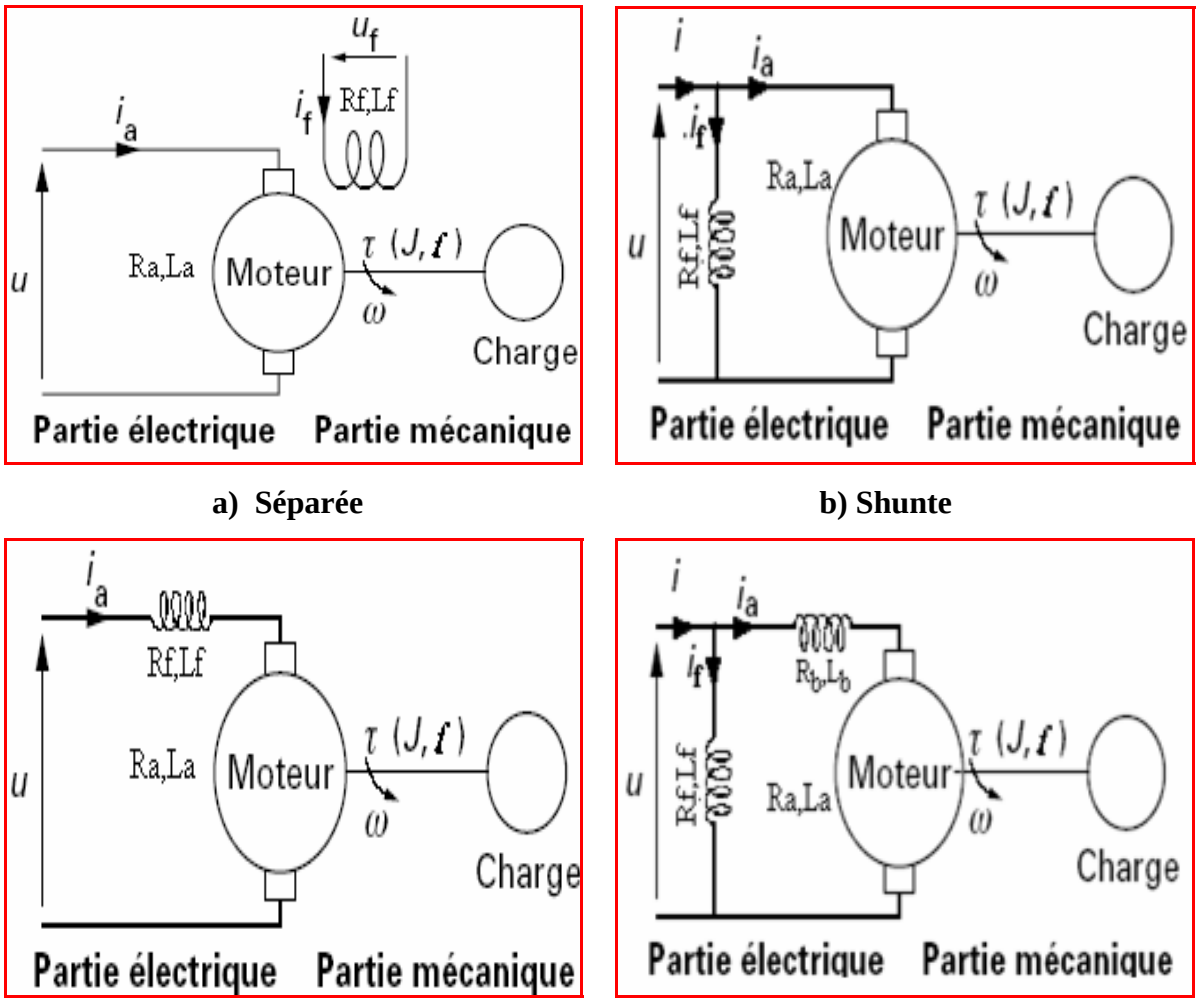
Dans ce chapitre, nous présentons dans la première partie le modèle bond graph, ensuite le modèle matlab élaboré à partir des équations mathématiques en deuxième partie. Nous présentons en fin une comparaison entre ces deux modèles dans une optique de simulation.

II.2. MODELISATION PAR BOND GRAPH

Dans ce mémoire, on réalise la modélisation graphique du moteur à courant continu (seul les transfert de puissance sont pris en compte, et sans recoure aux équations mathématique)

Le moteur a courant continu met en œuvre des puissances électrique et mécanique et des pertes de puissance dans ces deux domaines (**fig.I.13**) du chapitre précédent. Les schémas (a, b, c, d) représentés dans la **(fig.II.1)** sont les schémas physiques des différentes excitations du moteur à courant continu, avec les phénomènes pris en considération pour la modélisation, la partie électrique et représenter par des résistances et des inductances, la partie mécanique qui englobe le frottement et l'inerties et la charge mécanique, et le moteur qui fait le lien entre la partie (transformation d'énergie) électrique et mécanique. [2], [21], [26]

Remarque : *Pour plus d'informations, vous trouvez dans l'annexe A toute une théorie sur les bond graphs et l'outil de simulation SYMBOLS 2000.*



a) Séparée **b) Shunte**

c) Série **d) Composée**

Figure II.1 : Schéma physique d'un moteur à courant continu (a, b, c, d : types d'excitations).

Pour réaliser tous type de modélisation, il faut suivre une méthodologie. La méthodologie à suivre pour réaliser un modèle bond graph d'un système physique est la suivante : [15], [33], [34]

- Bien décrire le système a modélisé (tous les éléments qui échangent la puissance).
- Faire le bond graph a mots du système à modéliser.
- Dans le logiciel Symbols 2000, placé les éléments, les assemblés par des liens, numérotation des liens, précisé le sens de transfert de puissance et affecte la causalité intégrale préférentiel pour les éléments, ces étapes sont réuni sous le terme modèle bond graphe.
- Enfin, la validation du modèle.

Cette méthodologie est résumée par la figure (**fig.II.2**).

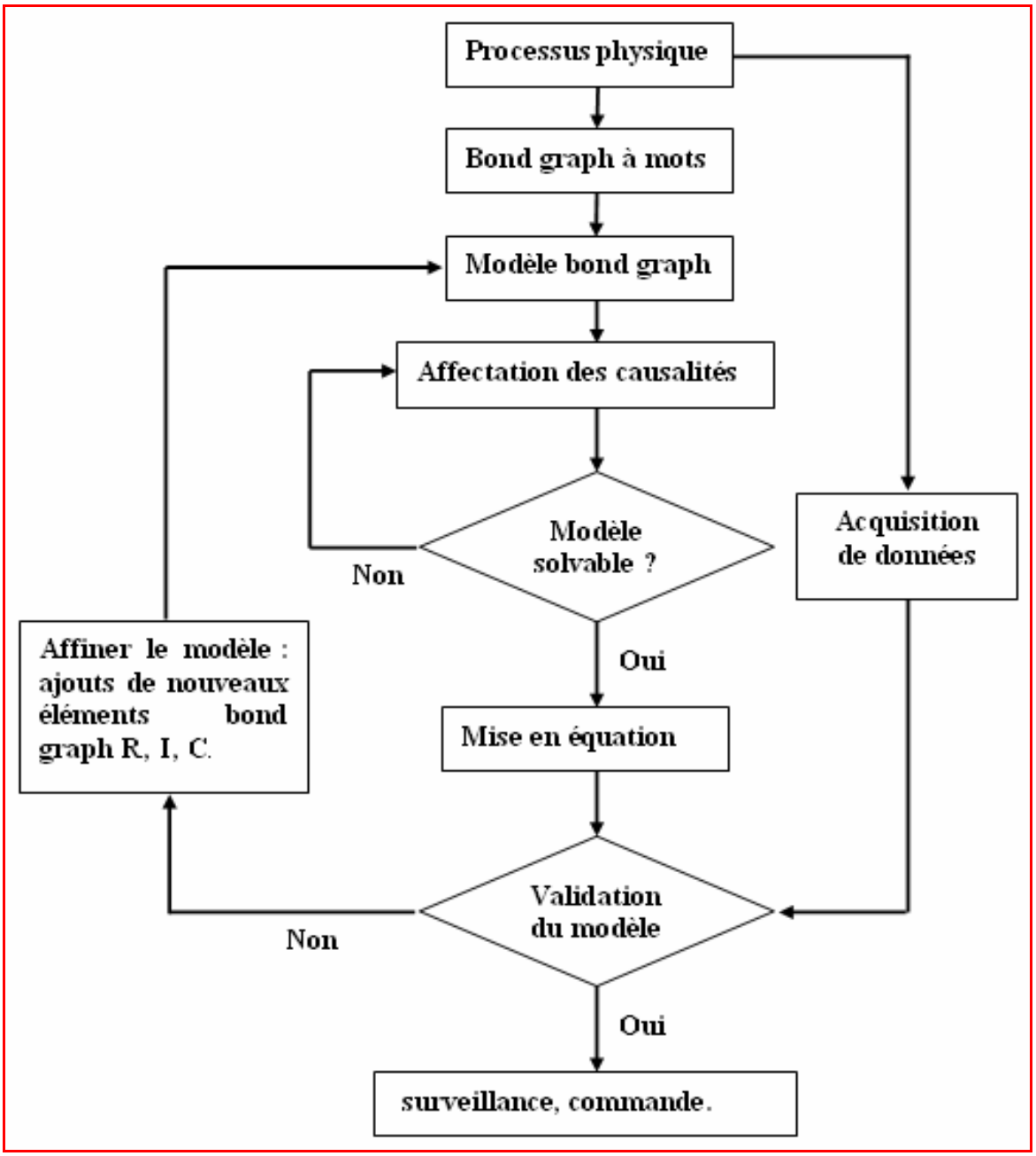


Figure II.2 : Etapes à suivre pour la modélisation par bond graph.

II.2.1. Bond graph a mots

Ce niveau de modélisation consiste à construire l'architecture du système par l'assemblage de différents sous-systèmes qui échangent de la puissance. L'interconnexion des composants est assurée par un couple de variables (effort et flux). [4], [7]

Le modèle bond graph a mots du moteur a courant continu est représente par la figure (**fig.II.3**), les différents types d'excitations du moteur n'apparaissent pas dans ce niveau de modélisation.

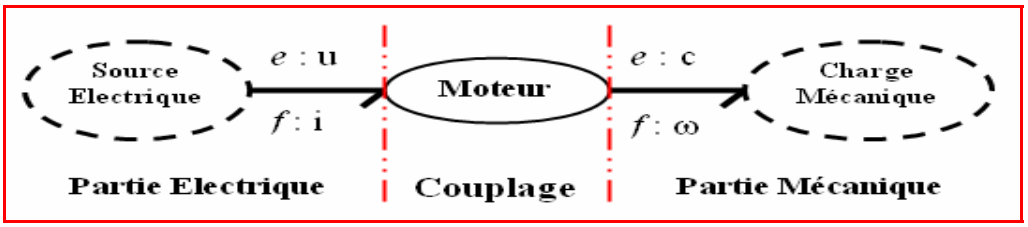


Figure II.3 : Bond graph à mots du MCC.

II.2.2. Modèle bond graph

Ce niveau de modélisation est physique, consiste à analyser les phénomènes physiques qui seront pris en considération dans la modélisation (inertie, frottement,...) et à reproduire l'architecture du système graphiquement, avec un langage unique pour tous les domaines physiques où apparaissent les échanges de puissance entre éléments [8], [9]. A ce niveau, la modélisation s'appuie sur une description énergétique des phénomènes physiques. On introduit les concepts fondamentaux de la physique : dissipation d'énergie, transformation, accumulation, sources, etc.… Les variables manipulées ont une sémantique physique forte : (énergie, puissance, effort, flux, …etc.). C'est à ce niveau qu'intervient la prise en compte des bilans d'énergies, de matières, de quantités de mouvements. [27], [26]

II.3. APPLICATION

II.3.1. Excitation séparée

Le modèle bond graph représentant le moteur à courant continu à excitation séparée est construit en notant que :

- Pour la partie électrique :
  - ❖ Sources d'efforts « *SE : U* » qui alimente l'induit.
  - ❖ La résistance « *R : Ra* » et l'inductance « *I : Ia* » de l'induit sont en série et elles sont portées sur une jonction « *1* ».
  - ❖ Sources d'efforts « *SE : Ue* » pour alimenter l'inducteur.
  - ❖ L'inducteur lui aussi est constitué d'une résistance « *R : Re* » et une inductance « *I : Ie* » en série, et portées sur jonction « *1* ».
- Pour la partie mécanique :
  - ❖ Le frottement, est présenté par l'élément « *R : f* », l'inertie par « *I : J* » et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc « *f, J* » ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction « *1* ».

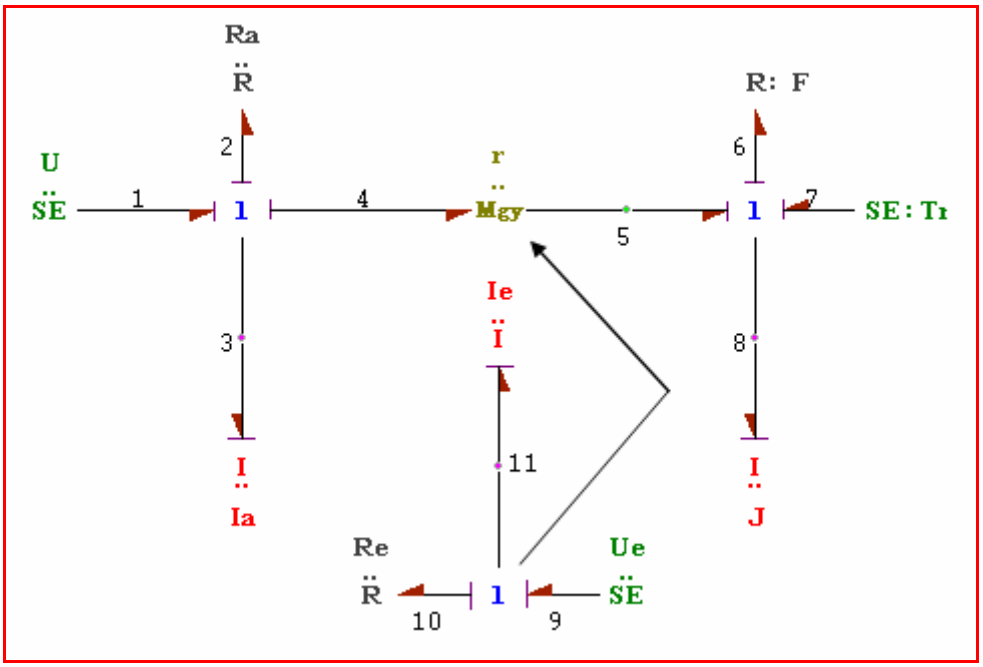


Figure II.4 : Modèle bond graph du MCC à excitation séparée.

❖ Si le moteur est couplé à une charge, cette dernière applique sur le moteur un couple résistant, donc on met une source d'effort « *SE : Tr* » pour représenter le couple résistant (qui représente la charge).

- Pour l'excitation:

❖ le gyrateur « *GY* » représente Le moteur, ou plutôt, représente le point de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique, il est modulé car son coefficient de modulation n'est constant et reçoit un signal de commande de l'induit.

❖ La flèche pleine représente le signal de commande, cette flèche ne représente aucun transfert de puissance mais seulement un signal de commande.

Après avoir conçu le modèle de la (**fig.II.4**), on passe à la simulation de ce modèle, c'est l'étape nécessaire pour ne pas dire primordiale dans un travail de modélisation, elle représente la bonne fonctionnalité du modèle, dans l'outil Symbols 2000 la simulation se fait dans une fenêtre externe à celle de la modélisation. [25]

Pour arriver à afficher les résultats de simulation il faut passer par :

- Le travaille de modélisation se fait dans le module « *BondPad* », par contre la simulation se fait dans la fenêtre de simulation « *Simulator* », qui est représentée par le lien « *1* » sur la (**fig.II.5**).

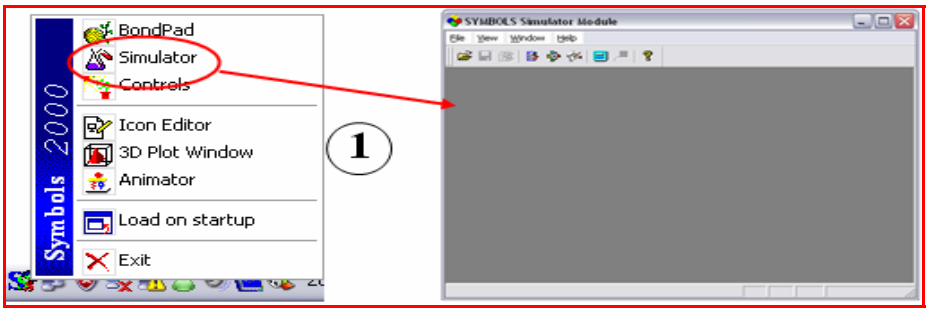


Figure II.5 : Ouverture de la fenêtre de simulation.

- En cliquant sur le bouton sélectionner par le lien « *2* » sur la (**fig.II.6**), nous choisissons le modèle à prendre en charge.

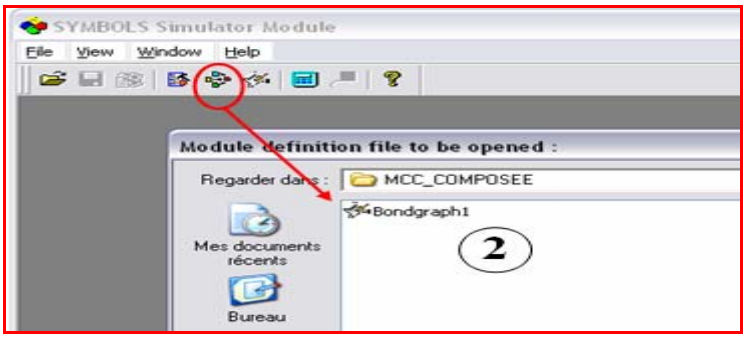


Figure II.6 : Choix du modèle à simuler.

- En sélectionnant le modèle à simuler, s'ouvre une nouvelle fenêtre comportant des données spécifiques au modèle sélectionné**.** Dans cette fenêtre en trouve trois boutons nommés (create, compile, cancel).

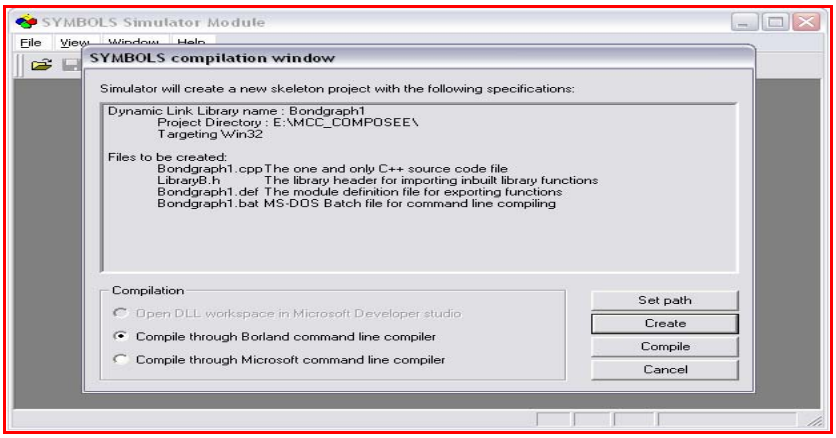


Figure II.7 : Compilation des données du modèle.

✓ Create : sert à charger les données du modèle dans le compilateur, et crée un fichier approprié au modèle sélectionné.

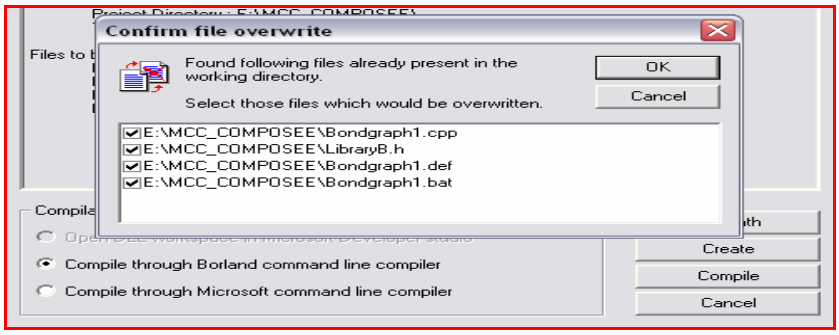


Figure II.8 : Création du fichier pour la simulation.

✓ Compile : comme son nom l'indique, sert à compiler les données, et vérifie s'il y a une erreur dans le modèle.

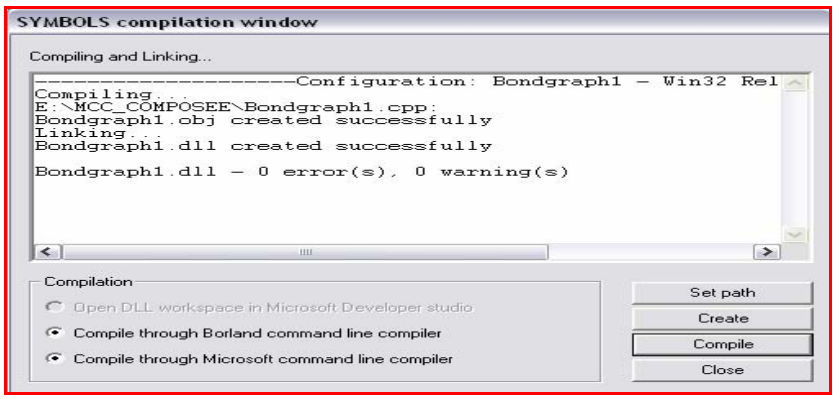


Figure II.9 : Vérification du modèle.

✓ Cancel : c'est pour fermer la fenêtre et passer à l'affichage des résultats, s'il n y a pas d'erreur.

- Finalement, et après toutes les étapes précédentes s'ouvre la fenêtre de simulation, il reste à charger les paramètres, et sélectionner ce qu'on veut afficher.

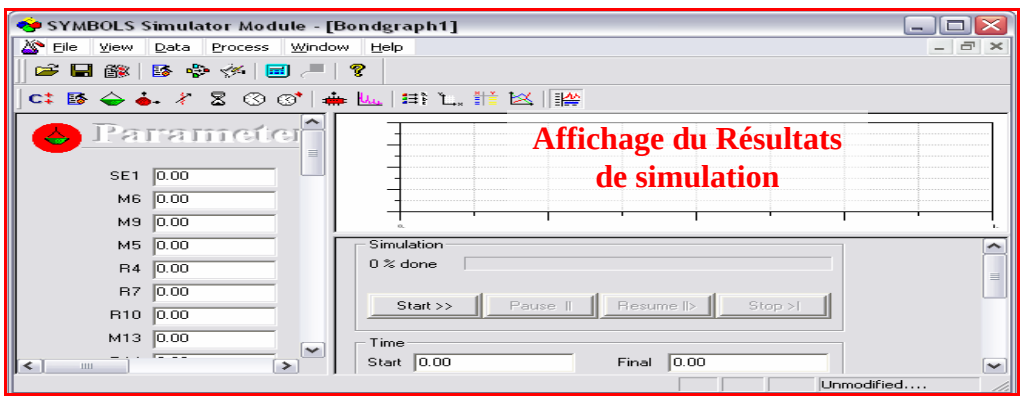


Figure II.10 : Fenêtre de simulation.

Revenons à la simulation de modèle du moteur à courant continu à excitation séparée, qui sera repartie comme suit :

En premier lieu on donne des résultats avec un couple résistant nul donc le moteur est à vide. Puis, on constate que le moteur subit un couple résistant de 5N.m (moteur en charge). Les paramètres utilisés pour la simulation sont présentés dans le tableau (**Tab.II.1**) suivant :

PARAMETRES	VALEURS [Unités]
Se : U	220 [V]
Se : Ue	220 [V]
R : Ra	6.76 [Ω]
I : Ia	0.198 [H]
R : Re	880 [Ω]
I : Ie	55.366 [H]
R : f	0.00019 [N.m.s/rd]
I : J	0.0398 [Kg.m^2]

Tableau II.1 : Paramètres du MCC à excitation séparée.

Voici donc les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation séparée, avec un couple résistant nul.

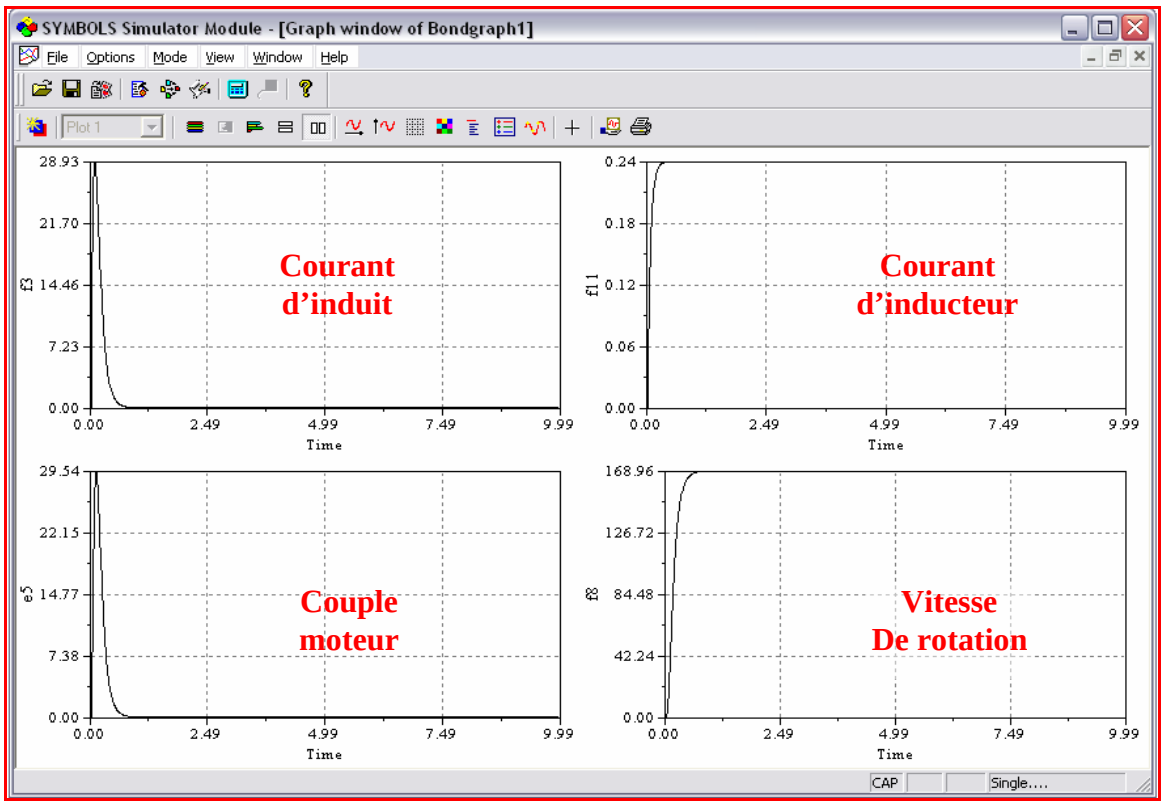


Figure II.11 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (à vide).

Sur la (**fig.II.12**) sont représentés les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation séparée, cette fois si avec un couple résistant non nul et égale à 5N.m.

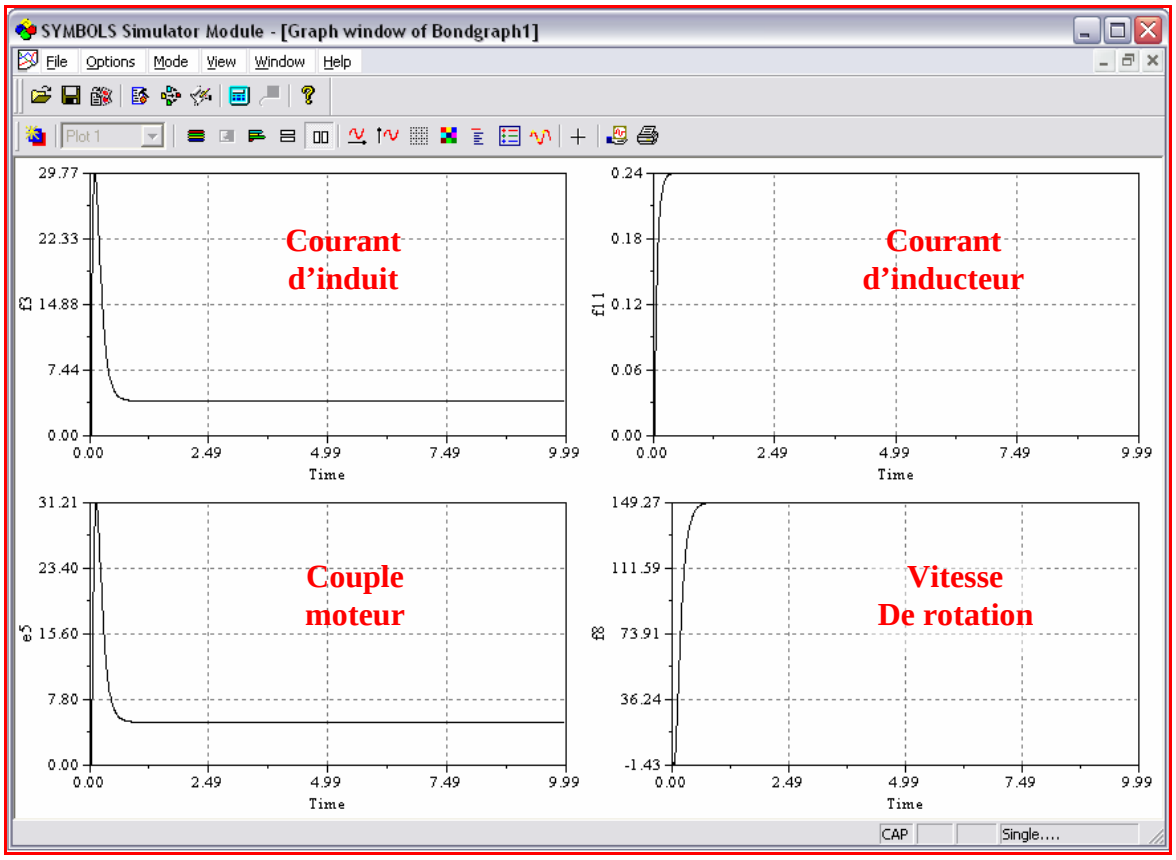


Figure II.12 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (en charge).

II.3.2. Excitation série

Pour l'excitation série et comme il est présenté sur la (**fig.II.1.c**) l'induit et l'inducteur sont en série et alimenté par la même source de tension.

- Pour la partie électrique :
  - ❖ Une source d'effort « *SE : U* », qui alimente l'induit et l'inducteur.
  - ❖ La résistance « *R : Ra* » et l'inductance « *I : Ia* » de l'induit sont en série et elles sont portées sur une jonction « *1* ».
  - ❖ L'inducteur lui aussi est constitué d'une résistance « *R : Re* » et une inductance « *I : Ie* » en série et elles sont portées sur une jonction « *1* ».
- Pour la partie mécanique :
  - ❖ Le frottement, est présenté par l'élément « *R : f* », l'inertie par « *I : J* » et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc « *f, J* » ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction « *1* » avec le couple « *Se : Tr* ».

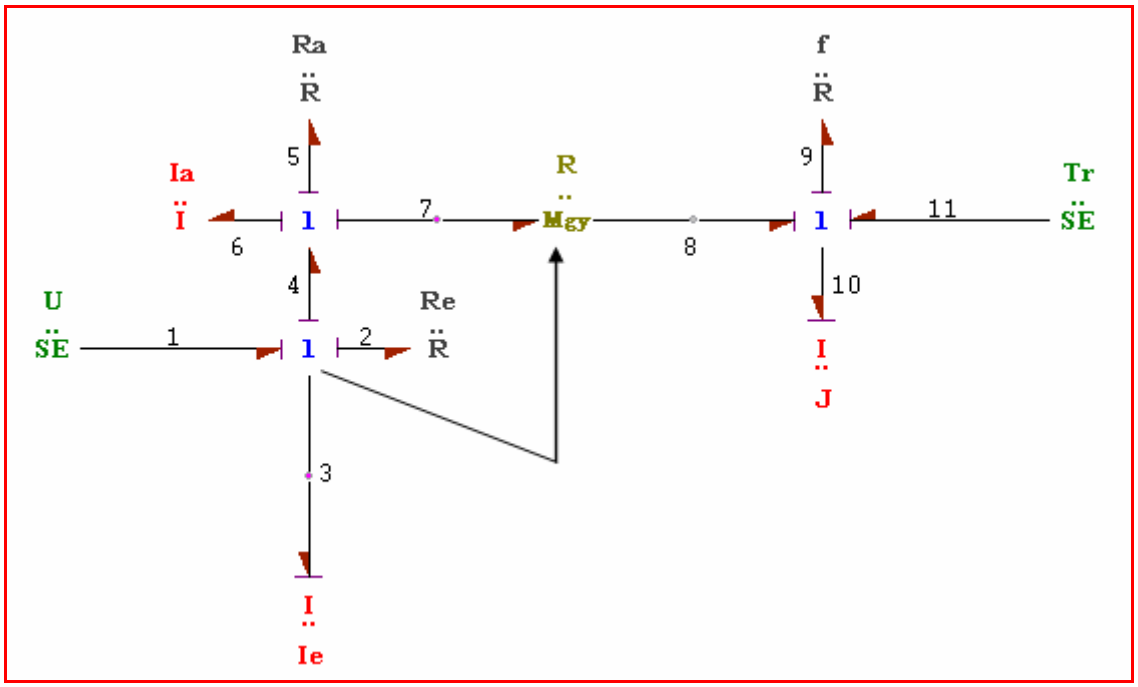


Figure II.13 : Modèle bond graph du MCC à excitation série.

- Pour l'excitation:

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

Le tableau (**Tab.II.2**) regroupe les paramètres utilisés pour la simulation du moteur à excitation série.

PARAMETRES	VALEURS [Unités]
Se : 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]
I : J	0.0398 [Kg.m^2]

Tableau II.2 : Paramètres du MCC à excitation série.

Sur la (**fig.II.14**) sont représentés les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation série a vide, et sur la (**fig.II.15**) le moteur subit un couple résistant de 5N.m.

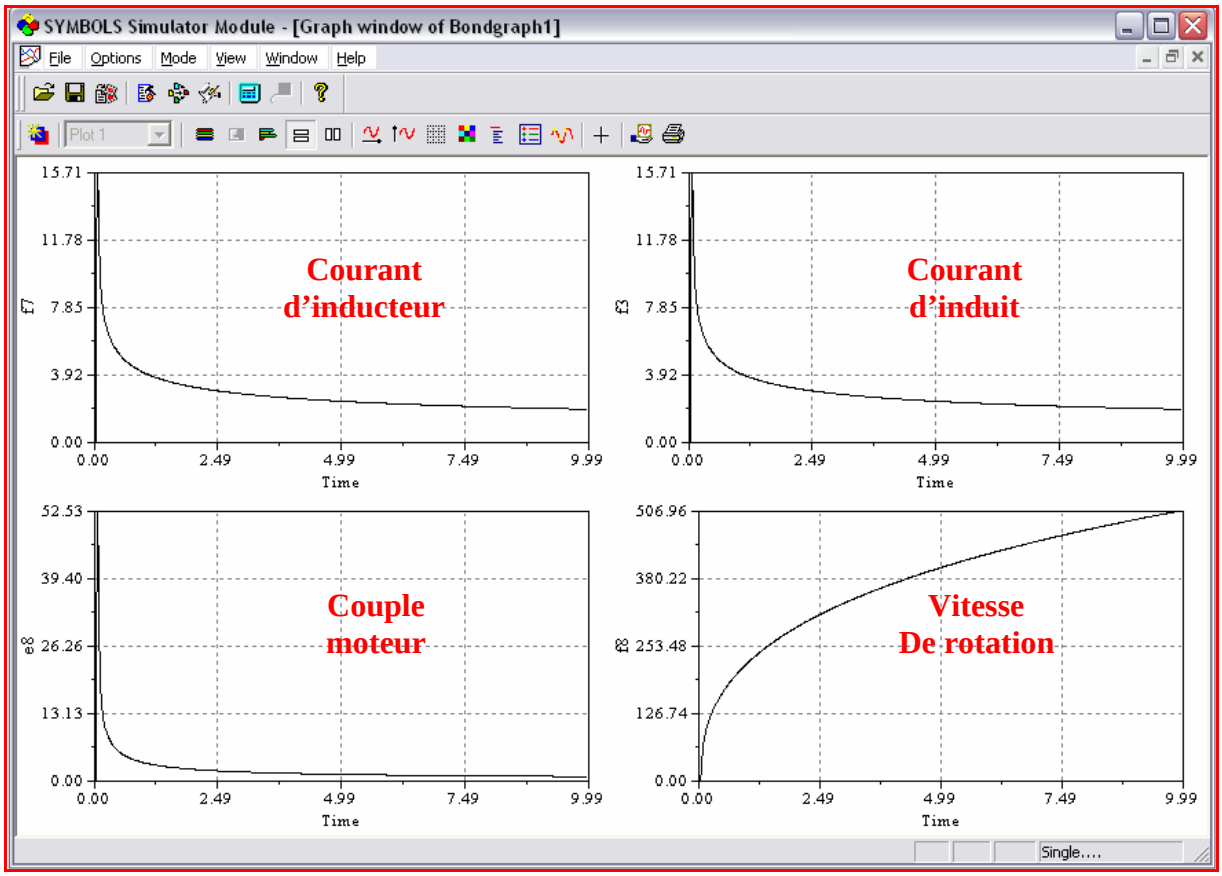


Figure II.14 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation série (à vide).

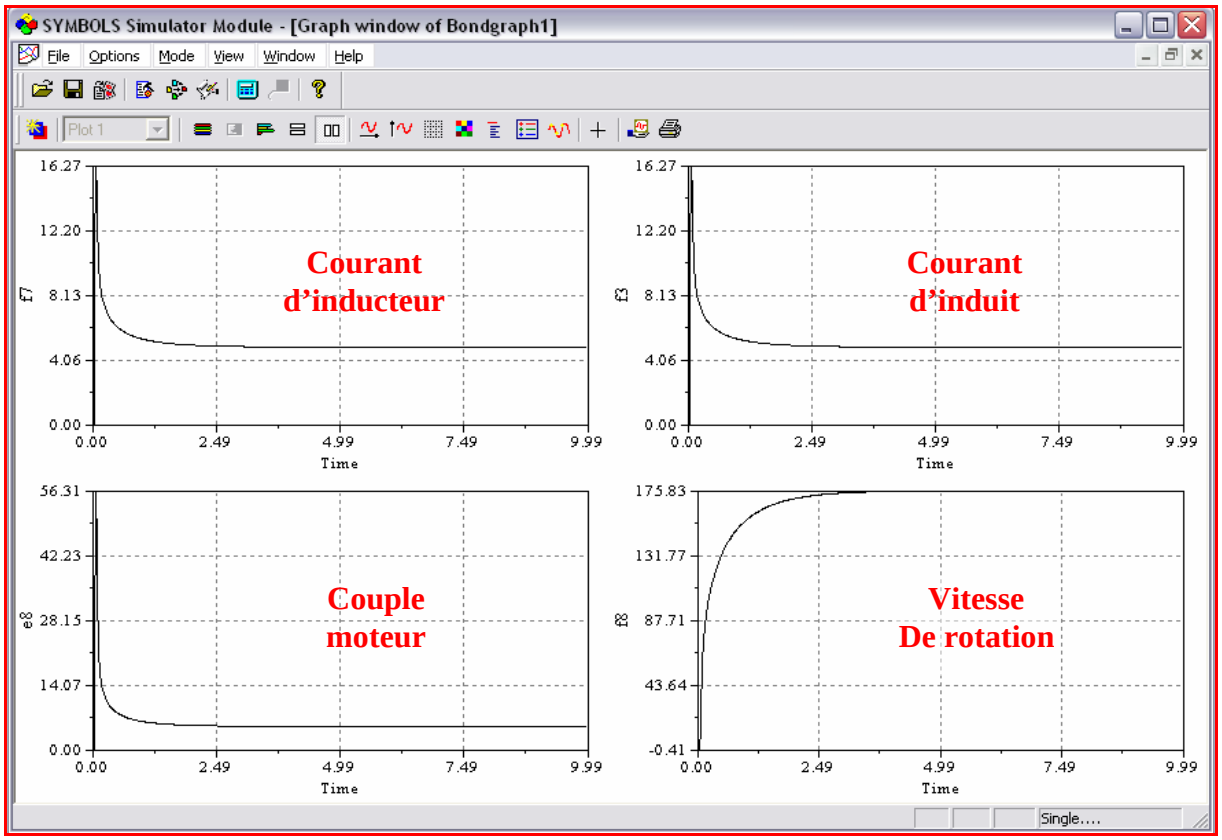


Figure II.15 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation série (en charge).

II.3.3. Excitation shunte

L'induit et l'inducteur sont en parallèle, c'est pour cela que ce type d'excitation porte le nom « *shunte ou parallèle* ».

- Pour la partie électrique :
  - ❖ Une source d'effort « *SE : U* », qui alimente l'induit et l'inducteur.
  - ❖ une jonction « *1* » qui porte La résistance « *R : Ra* » et l'inductance « *I : Ia* » de l'induit qui sont en série.
  - ❖ une jonction « *1* » qui porte les deux éléments qui constitue l'inducteur, la résistance « *R : Re* » et l'inductance « *I : Ie* » qui sont en série.
  - ❖ L'induit et l'inducteur sont en parallèle, donc une jonction « *0* » qui relie les deux jonction « *1* » précédentes.
- Pour la partie mécanique :
  - ❖ Le frottement, est présenté par l'élément « *R : f* », l'inertie par « *I : J* » et puisque l'arbre du moteur tourne avec la même vitesse donc « *f, J* » ont le même flux ce qui conduit à les mettre sur une jonction « *1* ».
- Pour l'excitation:
  - ❖ le gyrateur « *GY* » qui représente Le moteur reçoit le signal de commande de l'induit à travers la flèche pleine.

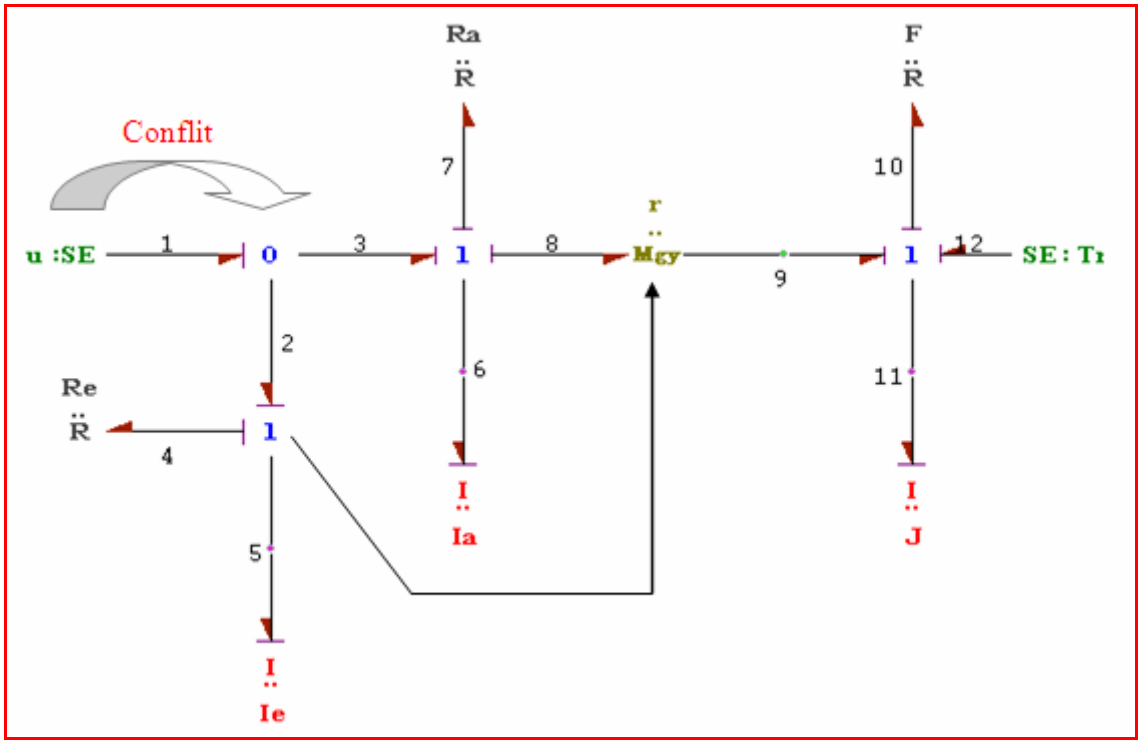


Figure II.16 : Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (réel).

En suivant les étapes précédente pour modéliser le moteur à courant continu à excitation shunte, on a obtenu le modèle de la (**fig.II.16**). On constate quant on n'a pas respecté l'une des lois principales sur lesquelles est basé le bond graph un conflit apparaît.

Une source d'effort doit être toujours portée sur une jonction « *1* », et la source de flux sur une jonction « *0* ». Pour éviter ce conflit on était obligé d'ajouter un élément « *R* » porté sur une jonction « *1* », cette élément représente une faible résistance due au câble relient la source au circuit ou parvient de la protection interne de la source.

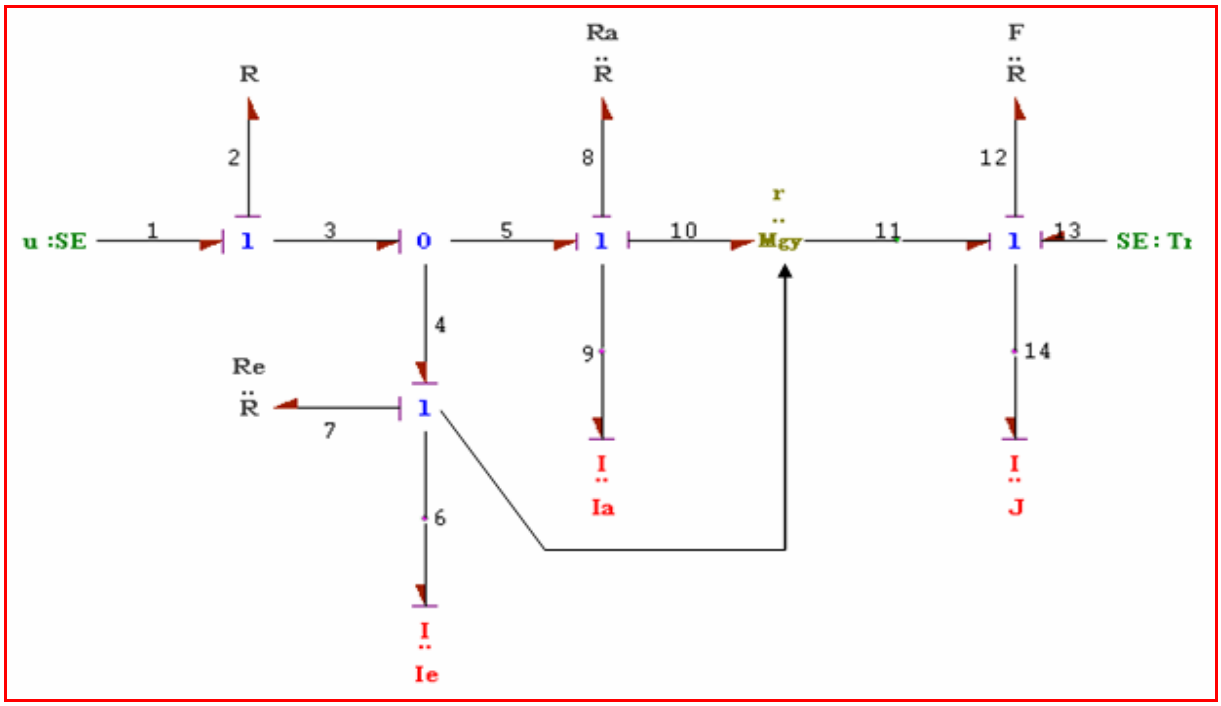


Figure II.17 : Modèle bond graph du MCC à excitation shunte (sans conflit).

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

PARAMETRES	VALEURS [Unités]
Se : U	220 [V]
R : Ra	6.76 [Ω]
I : Ia	0.198 [H]
R : Re	880 [Ω]
I : Ie	55.366 [H]
R : f	0.00019 [N.m.s/rd]
I : J	0.0398 [Kg.m^2]
R : R	0 .001 [Ω]

Tableau II.3 : Paramètres du MCC à excitation shunte.

Voici donc les résultats de simulations obtenus, premièrement à vide ensuite en charge.

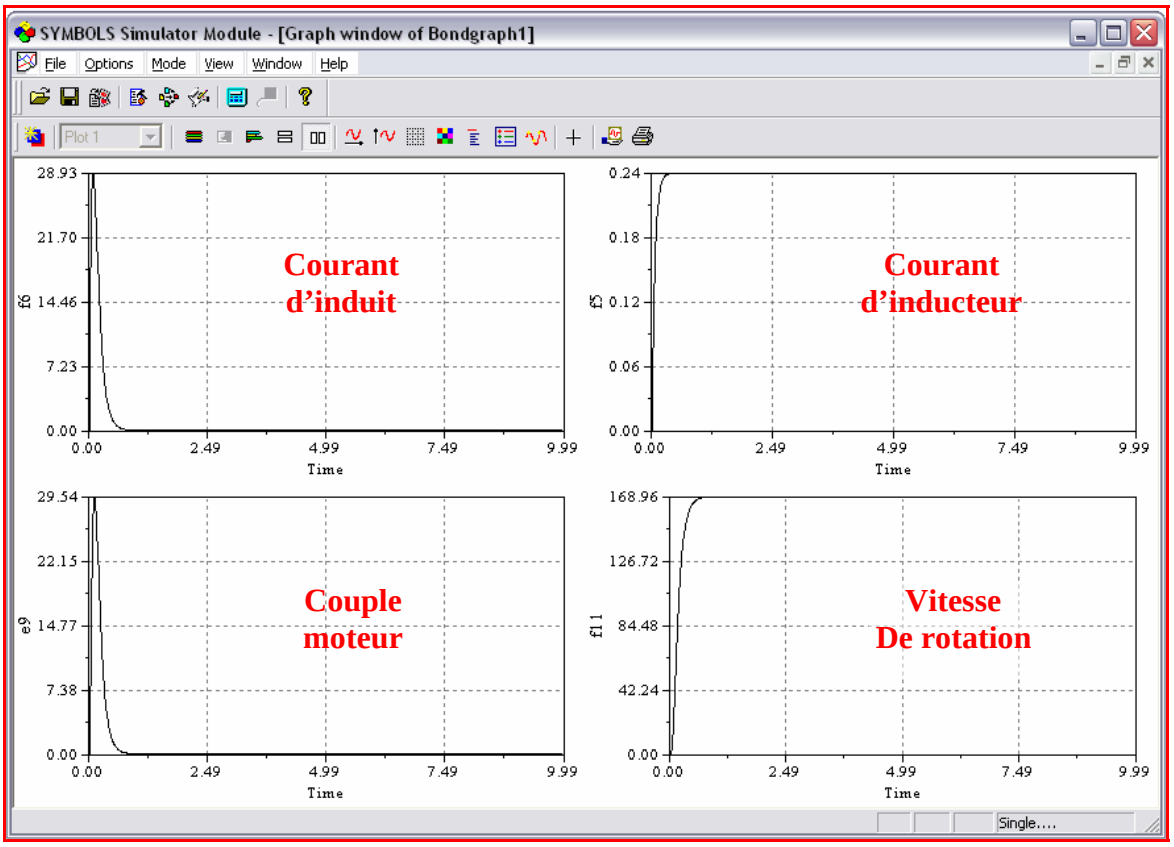


Figure II.18 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation shunte (à vide).

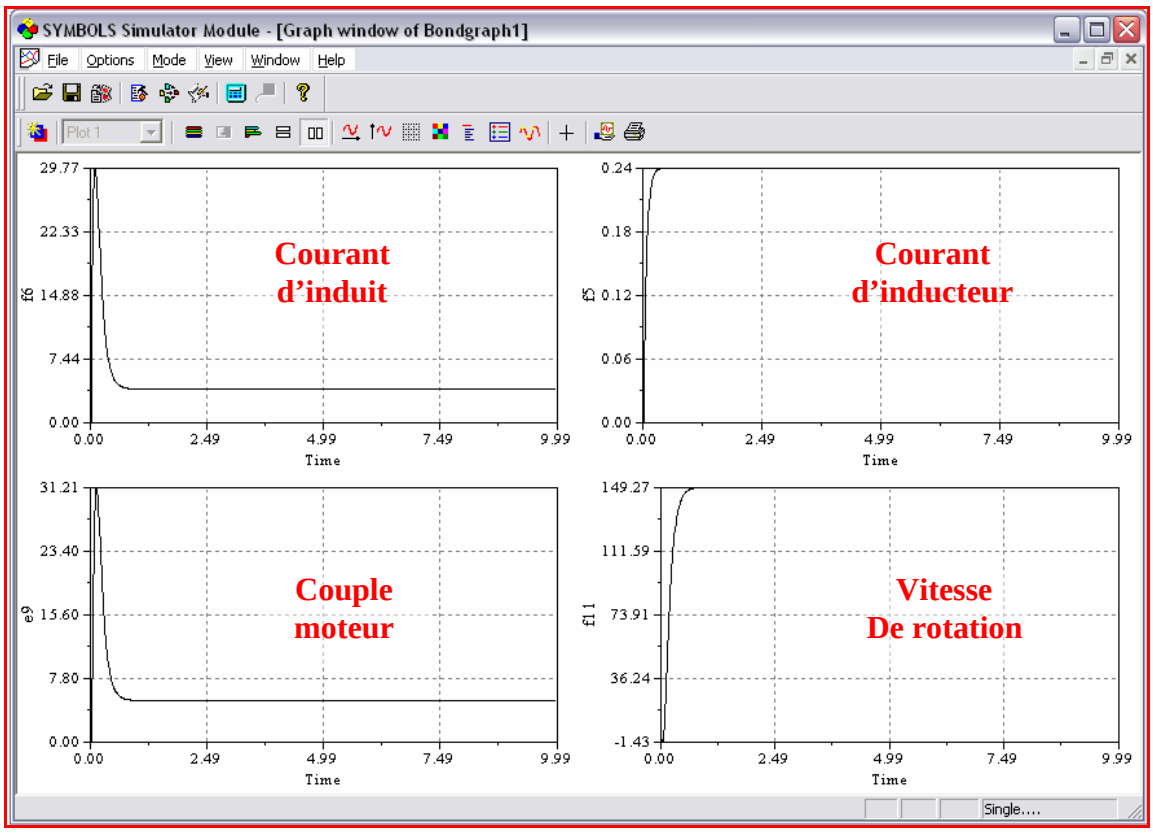


Figure II.19 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation shunte (en charge).

II.3.3. Excitation composée

Le moteur à excitation composée est le résultat de couplage de deux excitations série et shunte, une partie de l'inducteur est en série avec l'induit et l'autre partie est en parallèle.

Pour construire le modèle bond graph du moteur à excitation composée, on a suivi :

- Pour la partie électrique :
  - ❖ Une seule source d'effort « *SE : U* » qui alimente l'induit et l'inducteur.
  - ❖ Une jonction « *1* » qui porte la résistance « *R : Ra* » et l'inductance « *I : Ia* » de l'induit placés en série.
  - ❖ L'inducteur est divisé en deux parties, l'une est en série avec l'induit, elle est représentée par les deux éléments « *R : Rs* » et « *I : Is* » portés sur une jonction « *1* ». et une deuxième partie en parallèle, représentée par une résistance « *R : Rc* » et l'inductance « *I : Ic* » portées sur une jonction « *1* ».
  - ❖ La première partie de l'inducteur est en série avec l'inducteur « *partie série* » donc les deux jonctions « *1* » sont liées par un lien de puissance, la partie série est en parallèle avec la deuxième partie de l'inducteur, donc reliée avec une jonction « *0* ».
  - ❖ Même chose pour l'excitation shunte, il faut ajouter un composant pour éliminer le conflit de la source d'effort « *Se : U* ».

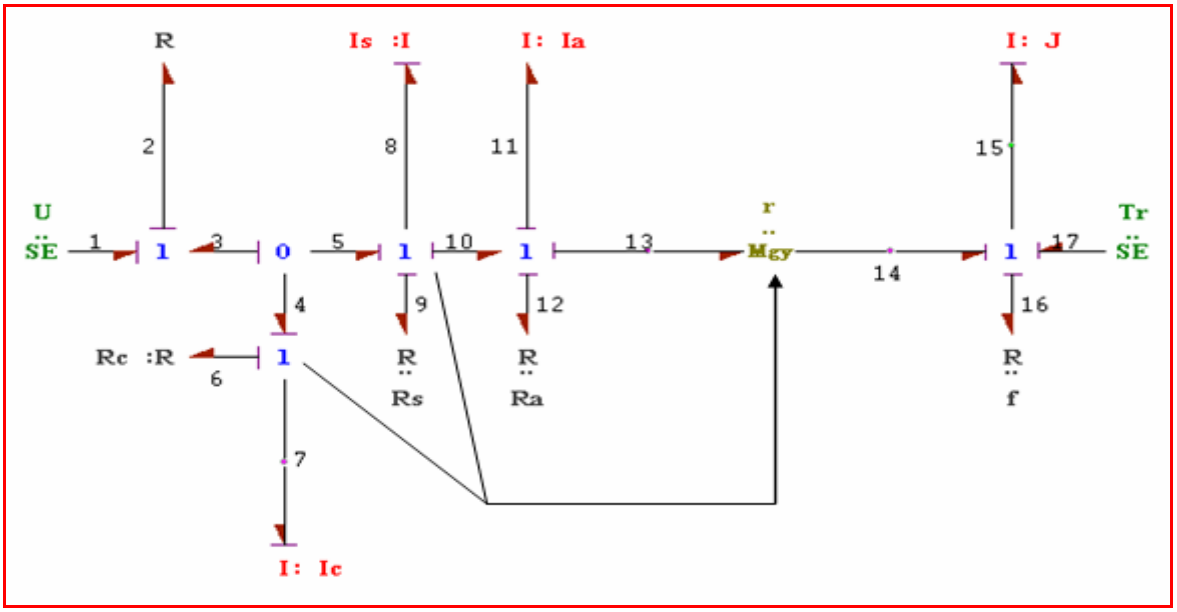


Figure II.20 : Modèle bond graph du MCC à excitation composée (sans conflit).

- Pour la partie mécanique :
  - ❖ La partie mécanique est la même pour tous les cas, donc en trouve les frottements « *R : f* » et l'inertie « *I : J* » portés sur une jonction « *1* ».

- Pour l'excitation:

  - ❖ le gyrateur « *GY* » qui représente le moteur, reçoit le signal de commande des deux parties qui constituent l'induit à travers la flèche pleine.

Le tableau (**Tab.II.4**), englobe les paramètres utilisés pour la simulation de notre modèle :

PARAMETRES	VALEURS [Unités]
Se : U	**220 [V]**
R : Ra	**6.76 [Ω]**
I : Ia	**0.198 [H]**
R : Rs	**1.158 [Ω]**
I : Is	**0.0868 [H]**
R : Rc	**880 [Ω]**
I : Ic	**55.366 [H]**
R : f	**0.00019 [N.m.s/rd]**
I : J	**0.0398 [Kg.m^2]**
R : R	**0 .001 [Ω]**

Tableau II.4 : Paramètres du MCC à excitation composée.

Sur la (**fig.II.21**) sont représentés les résultats de simulation du moteur à courant continu à excitation composée à vide, et sur la (**fig.II.22**) le moteur subit un couple résistant de 5N.m.

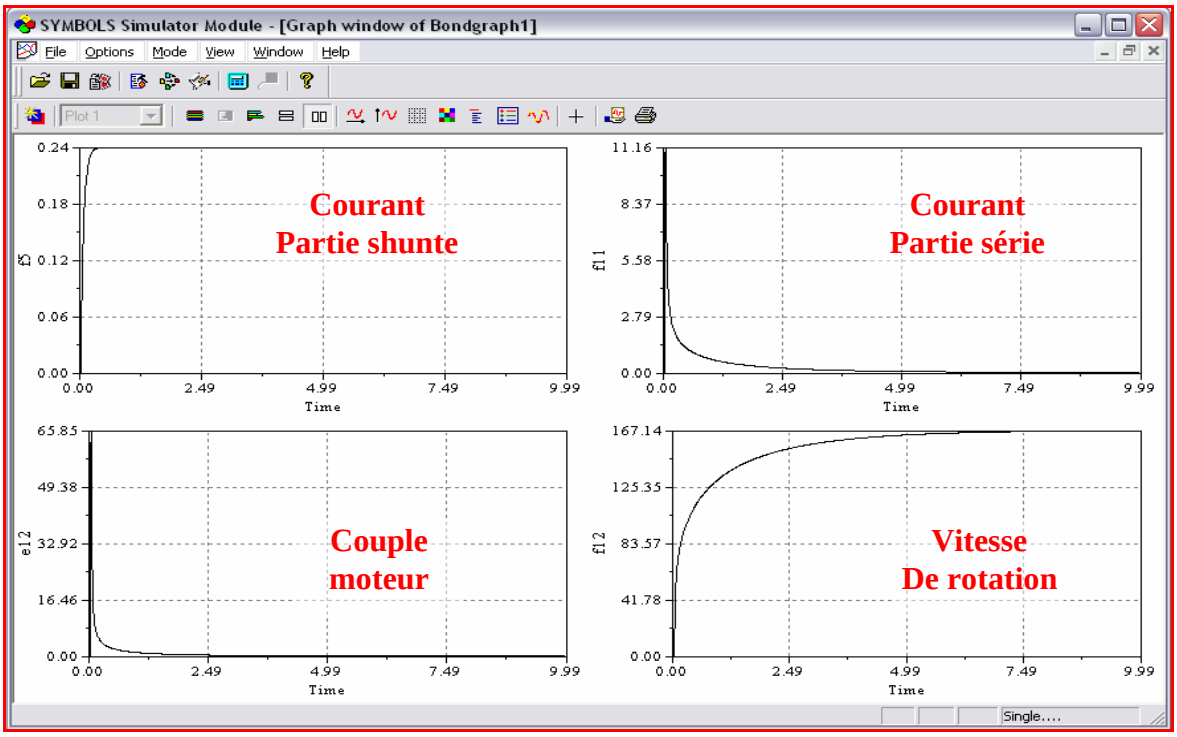


Figure II.21 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation composée (à vide).

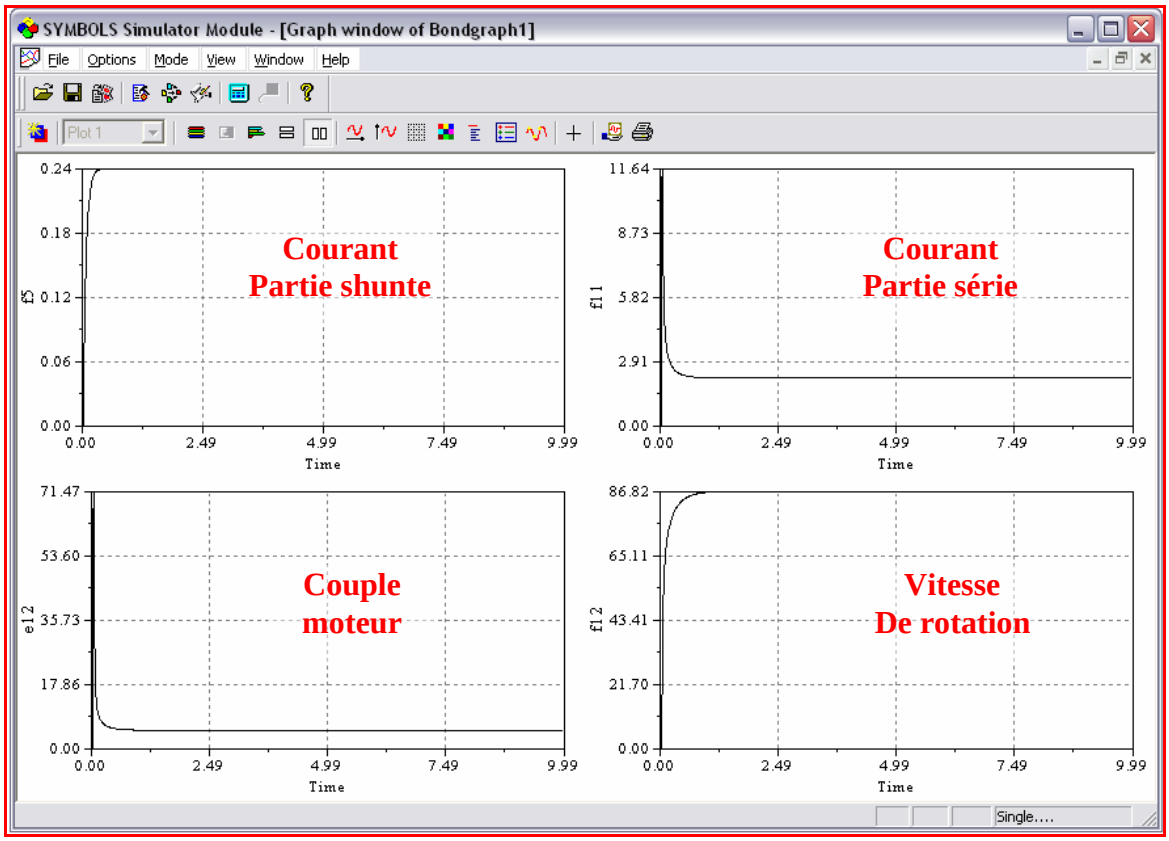


Figure II.22 : Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation composée (en charge).

II.4. MODELISATION PAR MATLAB SIMULINK

Dans la première partie de ce chapitre, on a réalisé une modélisation graphique du moteur à courant continu avec ces différents types d'excitations. Graphique, parce qu'on s'est basé sur les phénomènes physiques « *transfert de puissance* » pour réaliser la modélisation, et les modèles obtenus sont présentés par des liens graphiques.

Contrairement à la première partie on se concentre cette fois-ci sur les équations mathématiques qui régissent le moteur à courant continu, on peut appelé cette modelisation par la modélisation numérique.

La modélisation numérique du moteur à courant continu peut se faire de plusieurs manières, et plusieurs repères sont possible. [3]

Pour cela, notre choix est porté sur la modélisation du moteur à courant continu dans le système d'axes « *d, q* », l'outil Matlab Simulink présente une bonne plate forme pour la validation et la simulation de nos modèles.

Remarque : *Pour plus d'informations sur Matlab Simulink, retrouvez une démonstration de l'utilisation de l'outil Matlab Simulink dans l'annexe B.*

II.4.1. Excitation séparée

Le modèle du moteur à excitation séparée est représenté dans le système d'axe « *d, q* » comme suit :

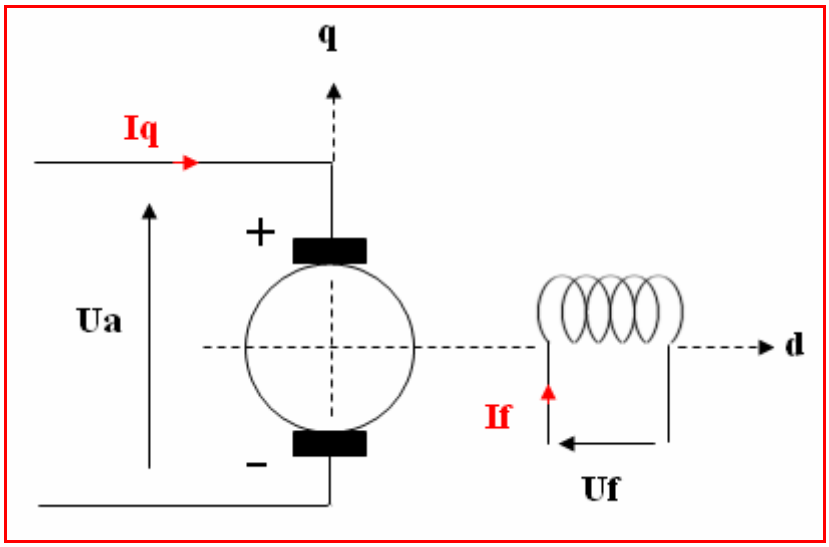


Figure II.23 : Schéma du MCC à excitation séparée sur les axes « *d, q* ».

A partir du schéma de la figure précédente, on peut écrire les équations électriques et mécaniques suivantes :

- Equations électriques :

$$\begin{cases} Ce = M_{fd} * I_f * I_q \\ U_f = R_f * I_f + L_f * \dfrac{dI_f}{dt} \\ U_a = R_a * I_q + La * \dfrac{dI_q}{dt} + \omega_r * M_{fd} * I_f \end{cases} \quad \text{..... (II.1)}$$

- Equations mécaniques :

$$J * \frac{d\omega_r}{dt} = Ce - Cr \quad \text{..... (II.2)}$$

On remplace « *Ce* » par son expression de l'équation (**II.1**) dans l'équation (**II.2**), on obtient :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_{fd} * I_q * I_f}{J} - \frac{Cr}{J} \quad \text{..... (II.3)}$$

D'après ces équations on peut construire le schéma bloc suivant :

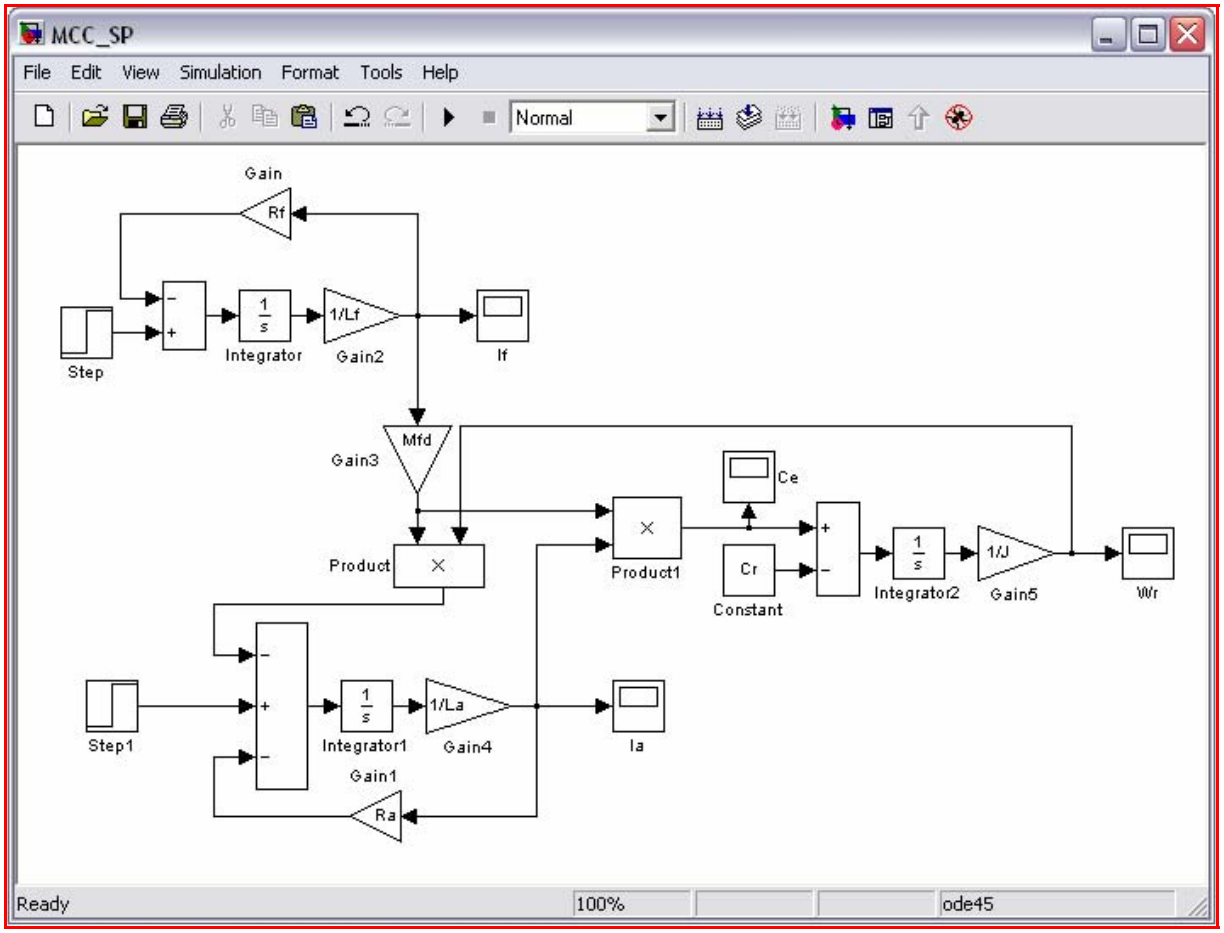


Figure II.24 : Modèle Matlab du MCC à excitation séparée.

Les paramètres utilisés pour la simulation sont les suivants :

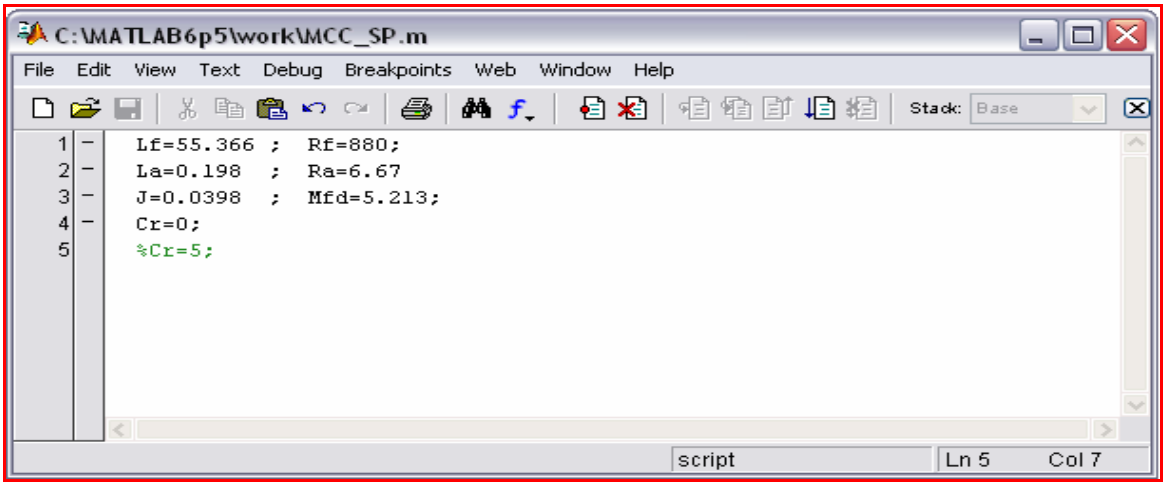


Figure II.25 : Paramètres utiliser pour la simulation du MCC à excitation séparée.

Comme dans la première partie on présente deux cas de simulation, premièrement le moteur est à vide puis en charge (couple résistant de 5 N.m).

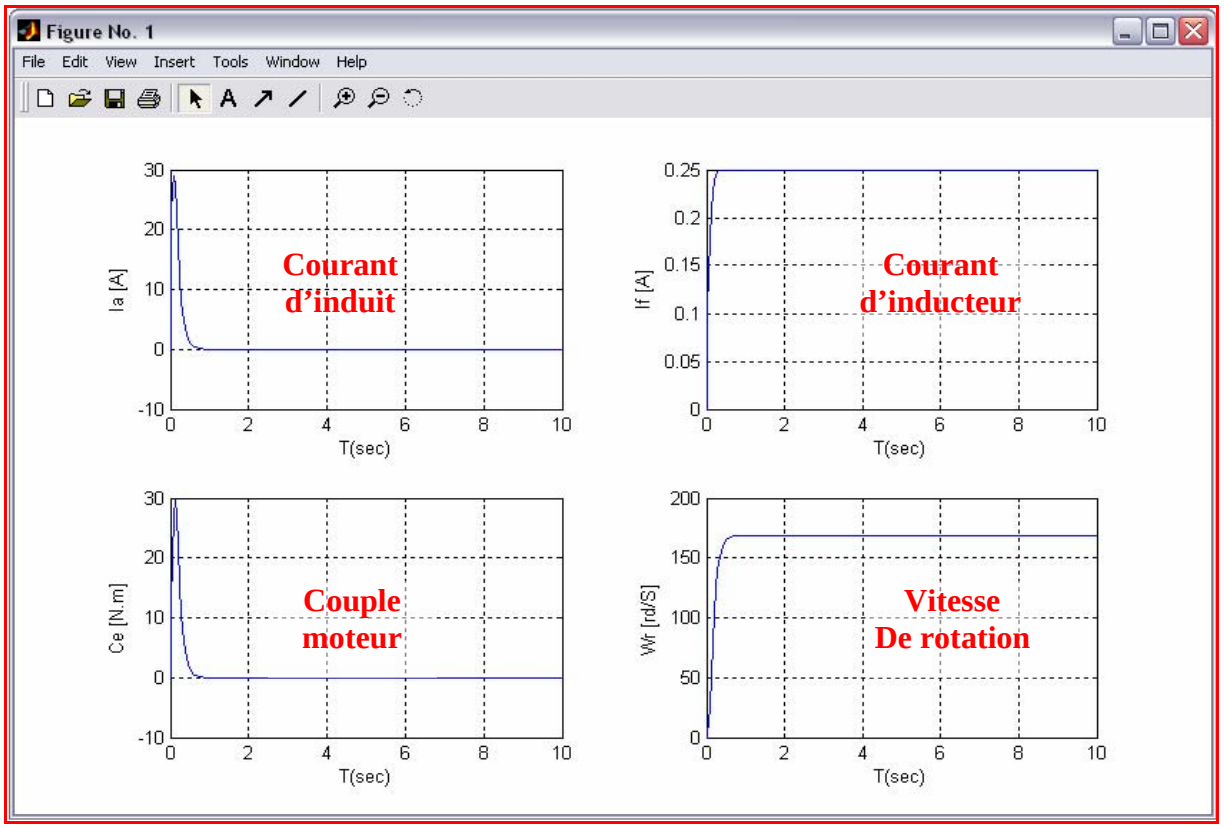


Figure II.26 : Simulation du MCC à excitation séparée (a vide).

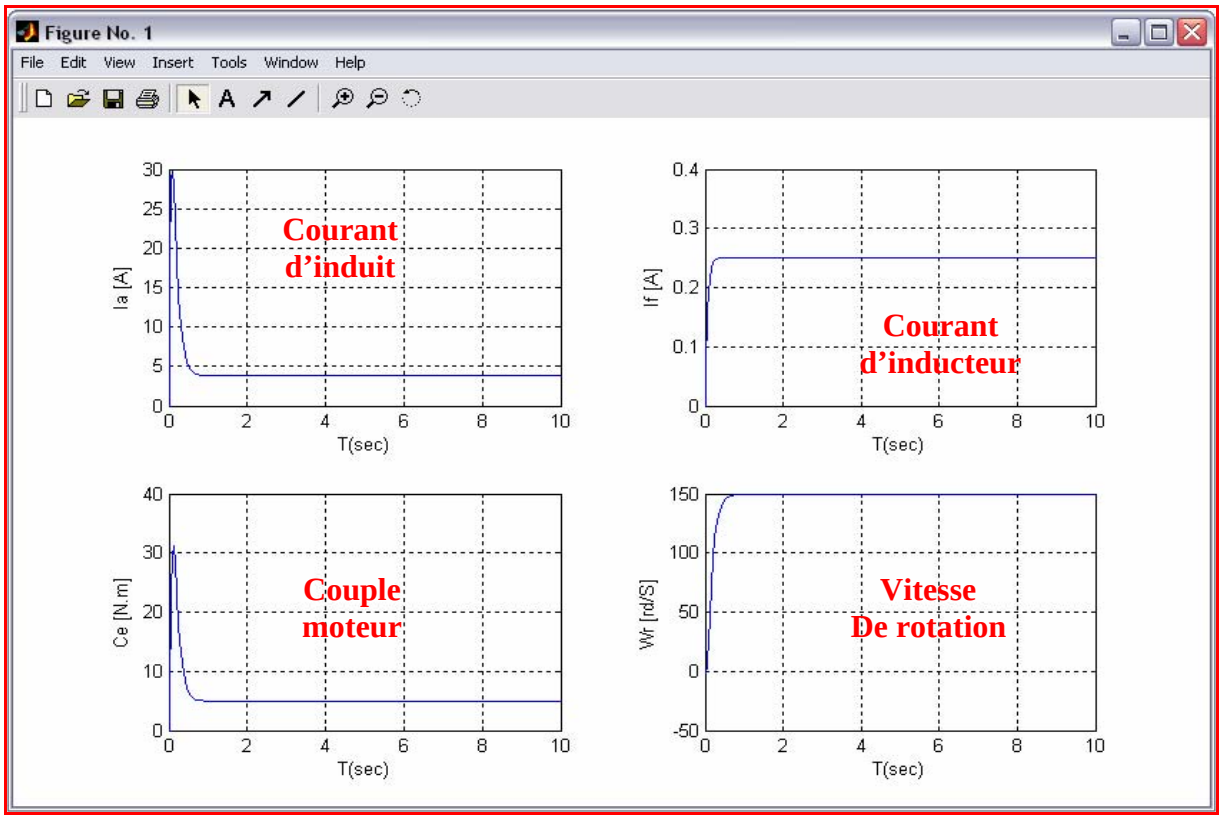


Figure II.27 : Simulation du MCC à excitation séparée (en charge).

II.4.2. Excitation série

Le modèle de la figure suivante représente, le modèle du moteur à excitation série sur les axes « *d, q* ».

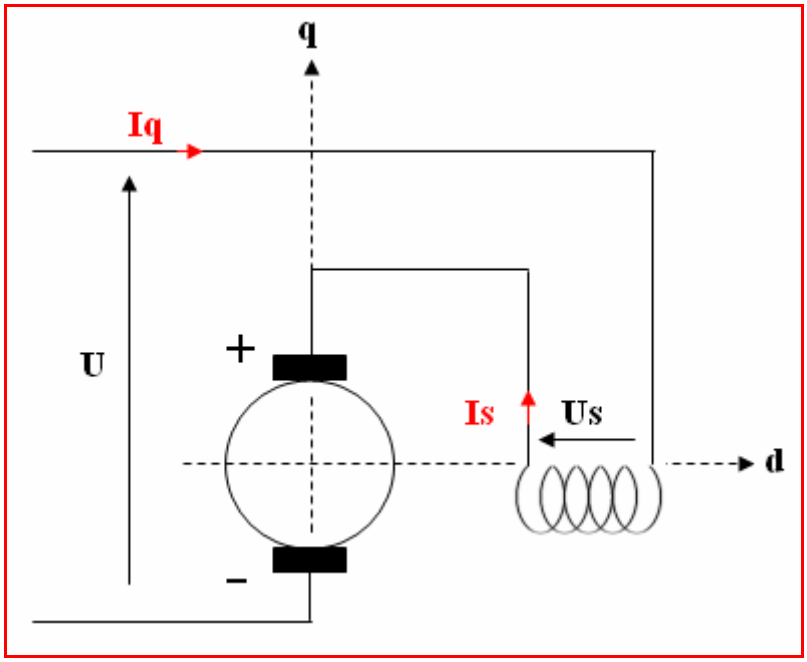


Figure II.28 : Schéma du MCC à excitation série sur les axes « *d, q* ».

Pour le moteur à excitation série, le circuit d'induit est en série avec l'inducteur alors le même courant parcourt les deux circuits, et la tension est égale à la somme des deux tensions, ce qui nous conduit à écrire :

$$\begin{cases} U = U_a + U_s \\ I_q = I_s \end{cases} \quad \text{..... (II.4)}$$

- Equations électriques :

$$\begin{cases} U_s = R_s * I_s + L_s * \dfrac{dI_s}{dt} \\ U_a = R_a * I_q + L_a * \dfrac{dI_q}{dt} + \omega_r * M_{sd} * I_q \\ U = (R_a + R_S + \omega_r * M_{sd}) * I_q + (L_a + L_s) * \dfrac{dI_q}{dt} \\ Ce = M_{sd} * I_f * I_q \end{cases} \quad \text{..... (II.5)}$$

- Equations mécaniques :

$$J * \frac{d\omega_r}{dt} = Ce - Cr \quad \text{..... (II.6)}$$

En remplaçant « *Ce* » par son expression, on obtient :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_{fd} * I_q^2}{J} - \frac{Cr}{J} \quad \text{..... (II.7)}$$

D'après les équations électriques et mécaniques obtenues à partir du modèle du moteur à courant continu à excitation série, on a construit le schéma bloc présenté par la figure ci-dessous :

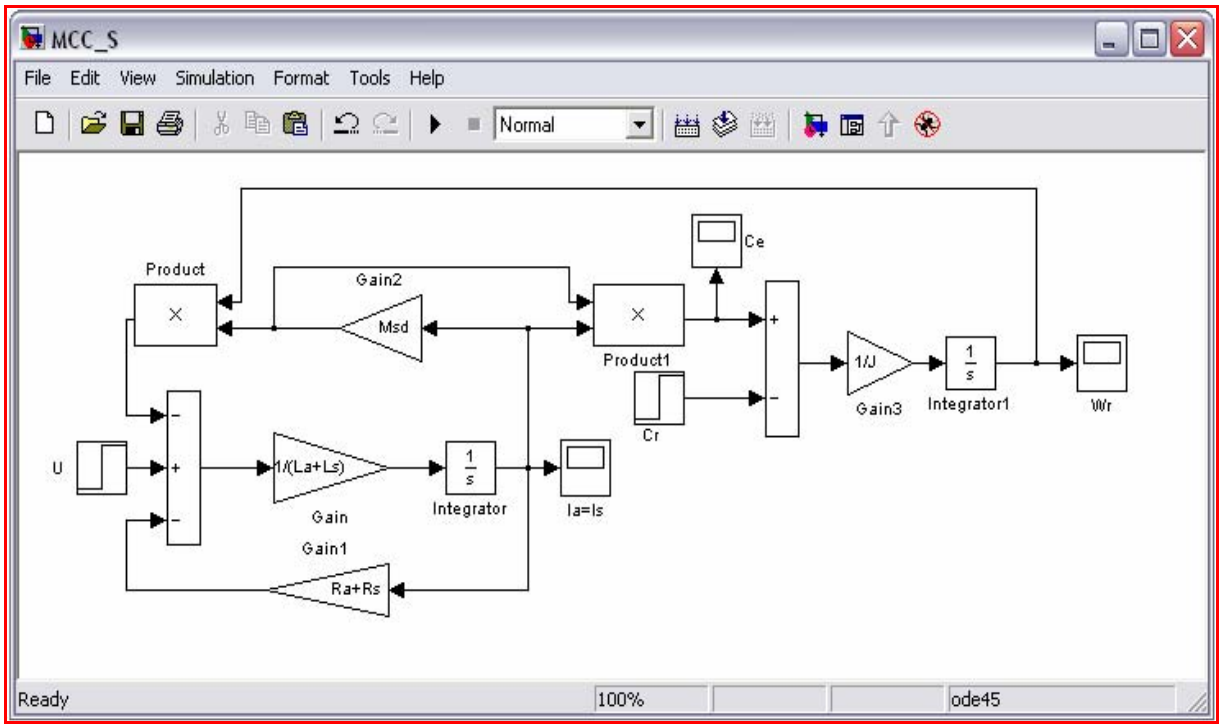


Figure II.29 : Modèle Matlab du MCC à excitation série.

Pour simuler le modèle donné par la figure (**fig.II.29**) on doit définir les paramètres *« Ls, Rs, La, Ra, f, Msd* ». En utilisant le fichier d'initialisation de la figure (**fig.II.30**).

On présentera ensuite les résultats de simulation obtenue, notons qu'on commence par les résultats où le moteur est à vide, puis les résultats du moteur qui entraîne une charge de (5 N.m) de couple résistant.

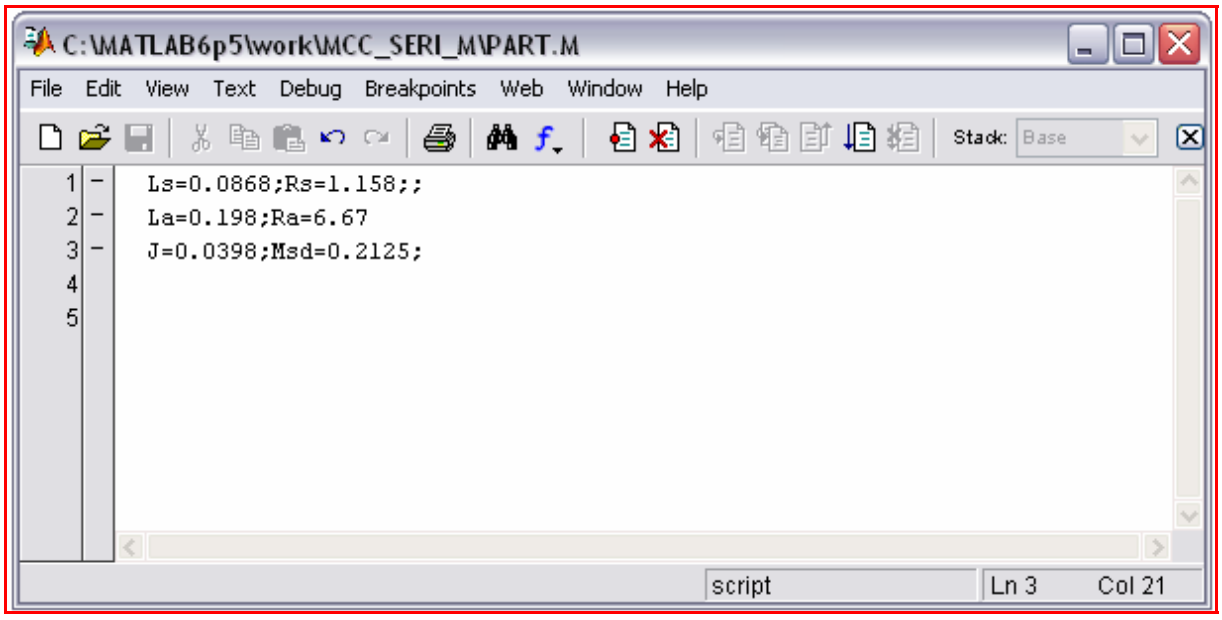


Figure II.30 : Paramètres utilisés pour la simulation du MCC à excitation série.

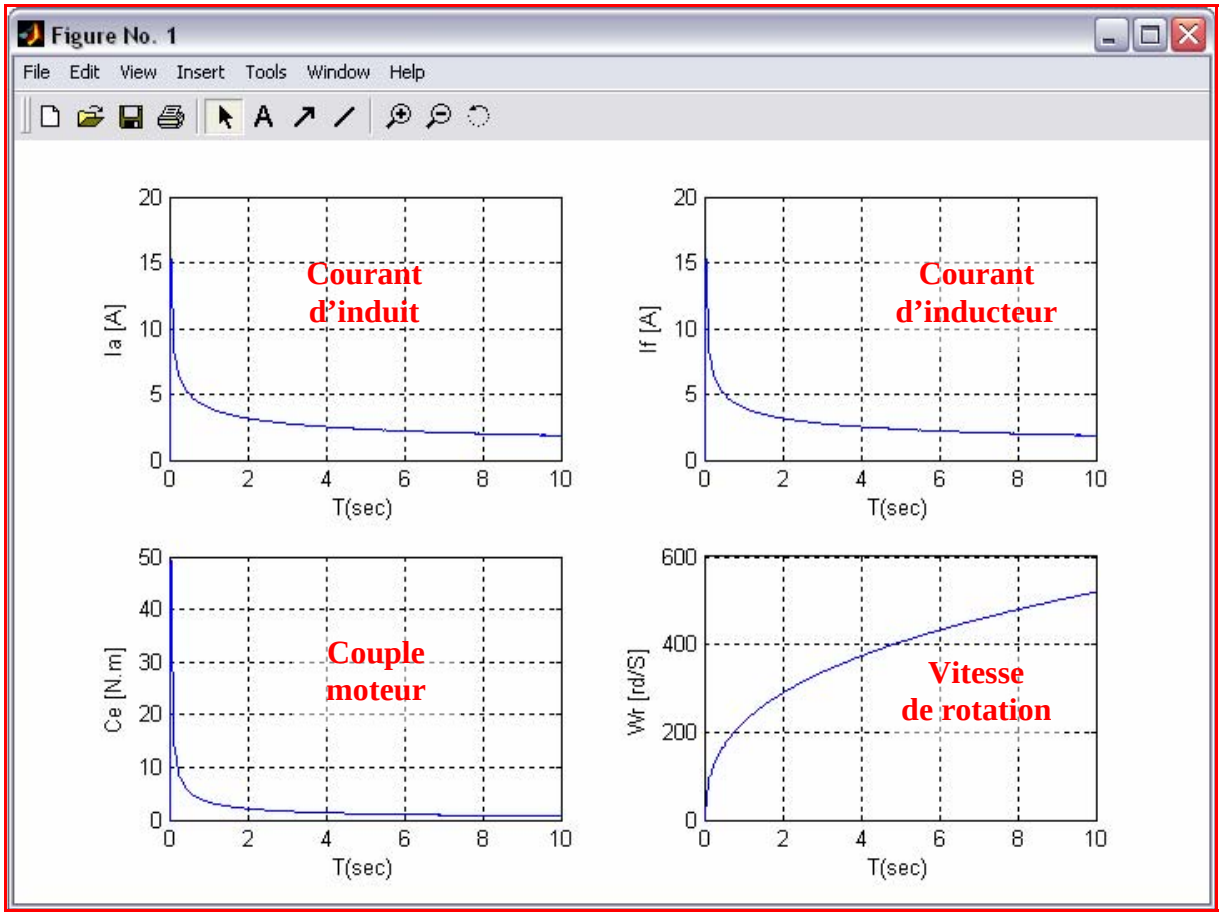


Figure II.31 : Simulation du MCC à excitation série (à vide).

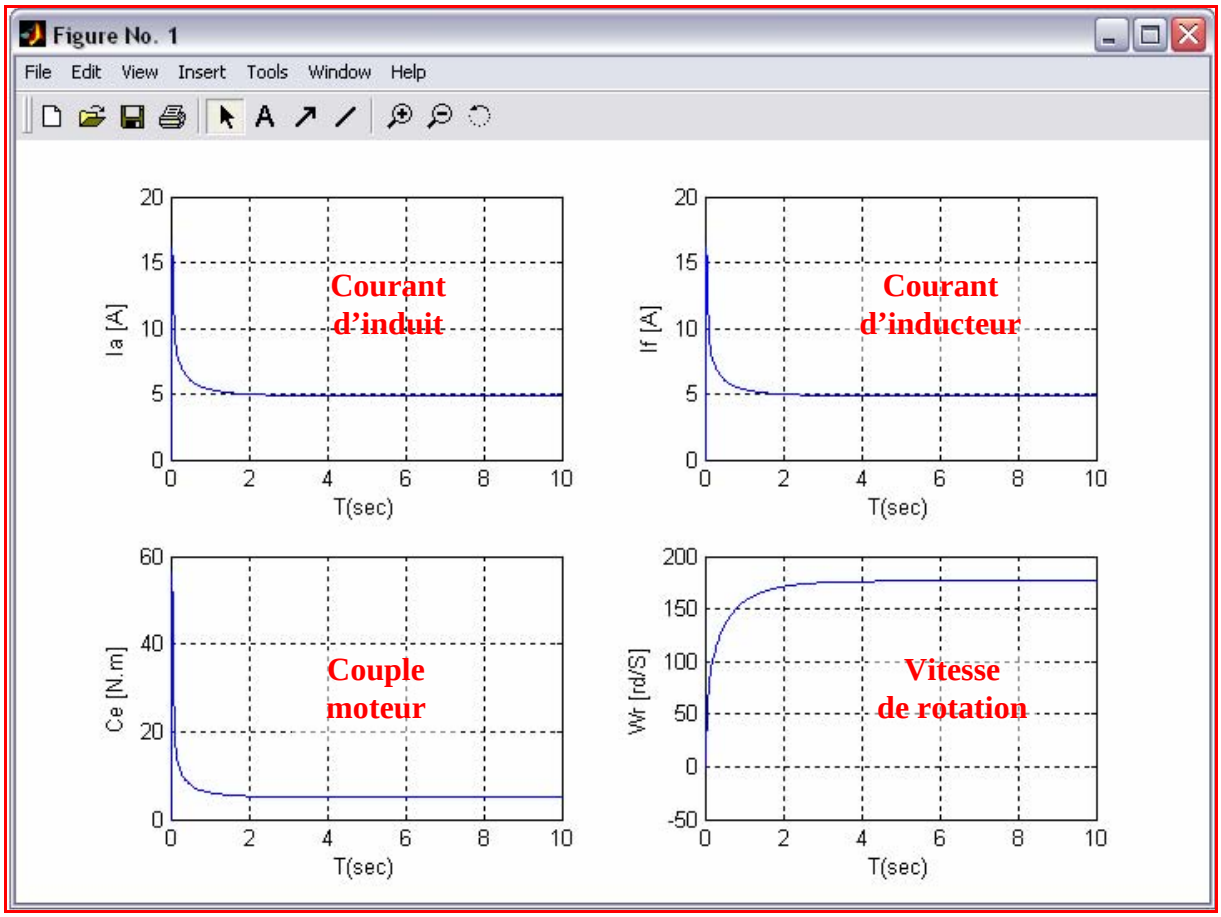


Figure II.32 : Simulation du MCC à excitation série (en charge).

II.4.3. Excitation shunte

Le modèle du moteur à excitation shunte est représenté dans le système d'axes (d, q) comme suit :

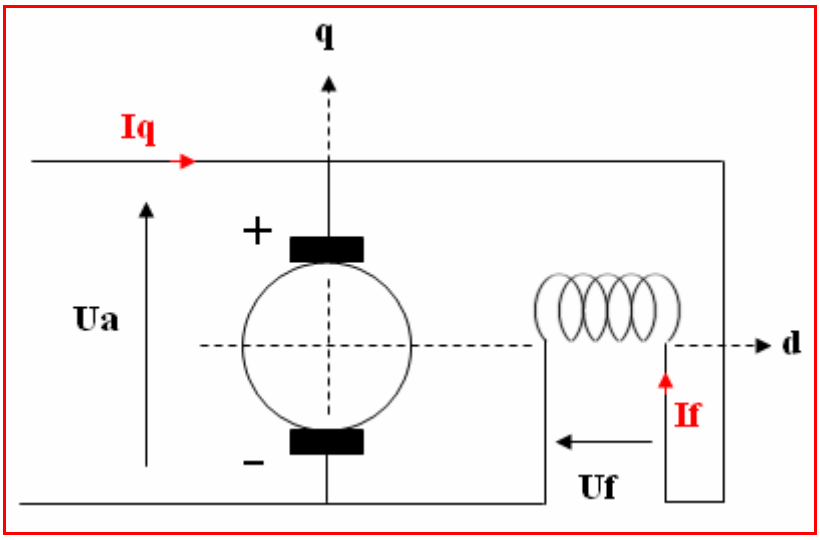


Figure II.33 : Schéma du MCC à excitation shunte sur les axes « *d, q* ».

Le circuit d'induit et en parallèle avec l'inducteur, donc la tension aux bornes des deux circuits est la même, par contre le courant diffère parce qu'il dépend des paramètres de chaque circuit.

$$U_a = U_f \quad \text{..... (II.8)}$$

- Equations électriques :

$$\begin{cases} Ce = M_{fd} * I_f * I_q \\ U_f = R_f * I_f + L_f * \dfrac{dI_f}{dt} \\ U_a = R_a * I_q + L_a * \dfrac{dI_q}{dt} + \omega_r * M_{fd} * I_f \end{cases} \quad \text{..... (II.9)}$$

- Equations mécaniques :

$$J * \frac{d\omega_r}{dt} = Ce - Cr \quad \text{..... (II.10)}$$

On remplace « *Ce* » par son expression, l'équation (**II.10**) devient :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_{fd} * I_q * I_f}{J} - \frac{Cr}{J} \quad \text{..... (II.11)}$$

Le schéma bloc du moteur à courant continu à excitation shunte est le suivant :

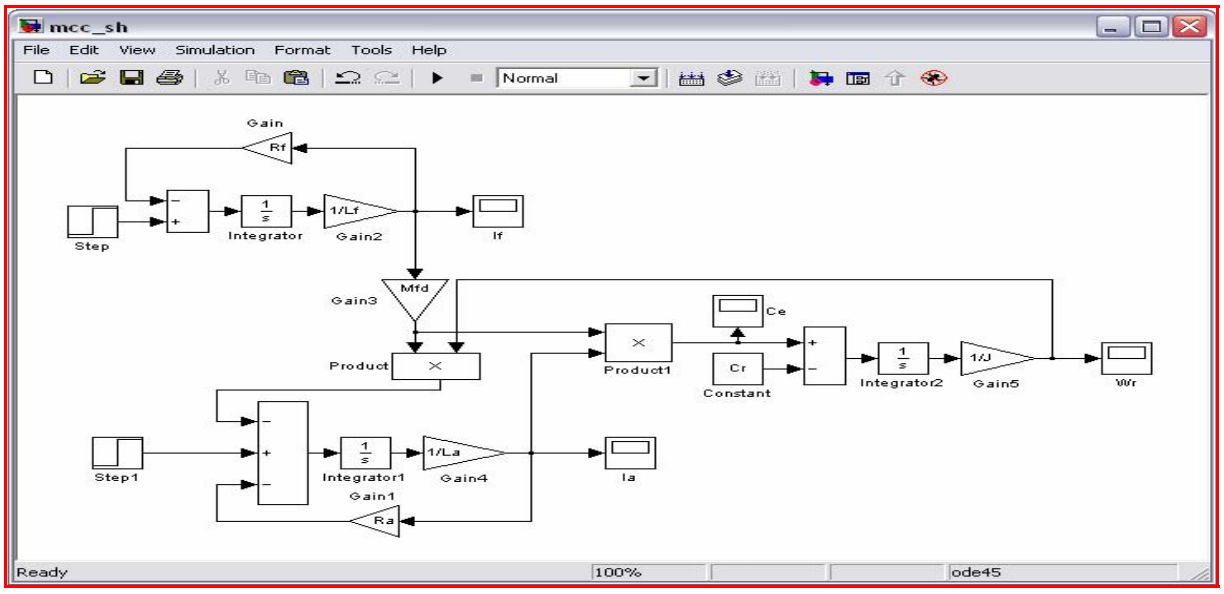


Figure II.34 : Modèle Matlab du MCC à excitation shunte.

Les résultats de simulation seront présentés par les figures (**fig.II.36**) et (**fig.II.37**) tout en respectant la même succession que précédemment (à vide puis en charge), et les paramètres utilisés pour la simulation sont les suivants :

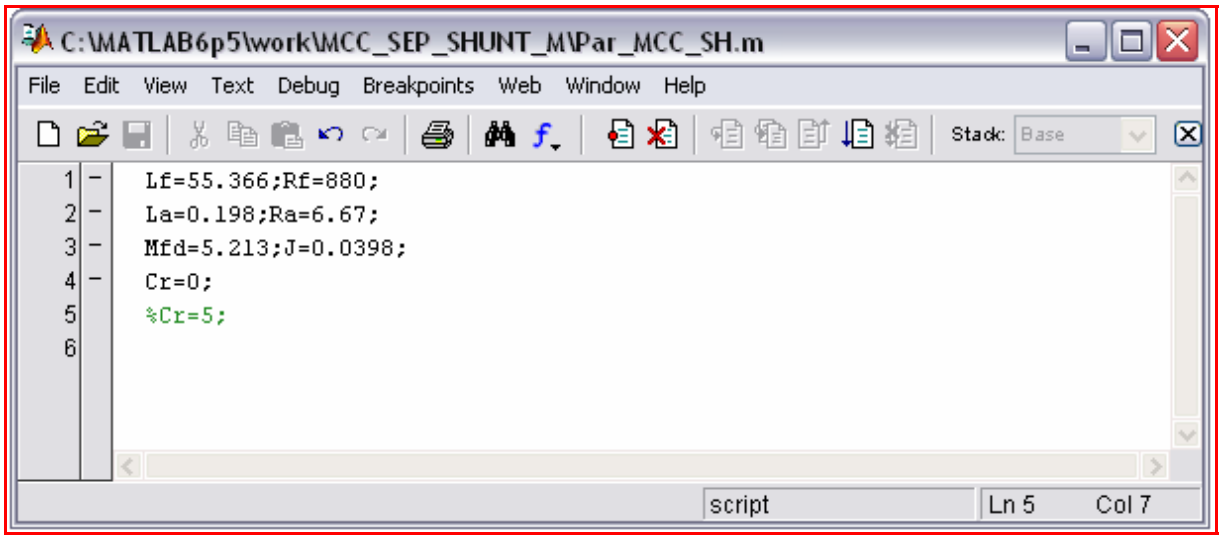


Figure II.35 : Paramètres utilisés pour la simulation du MCC à excitation shunte.

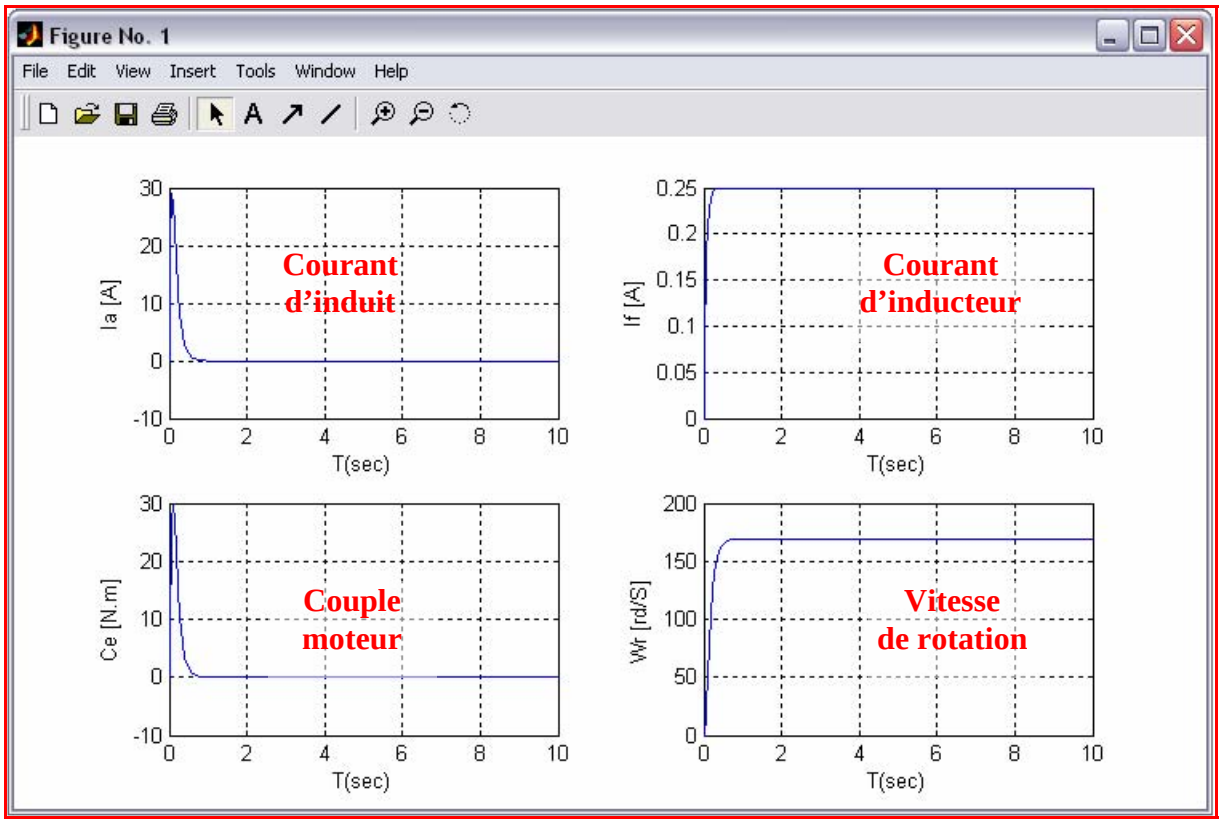


Figure II.36 : Simulation du MCC à excitation shunte (à vide).

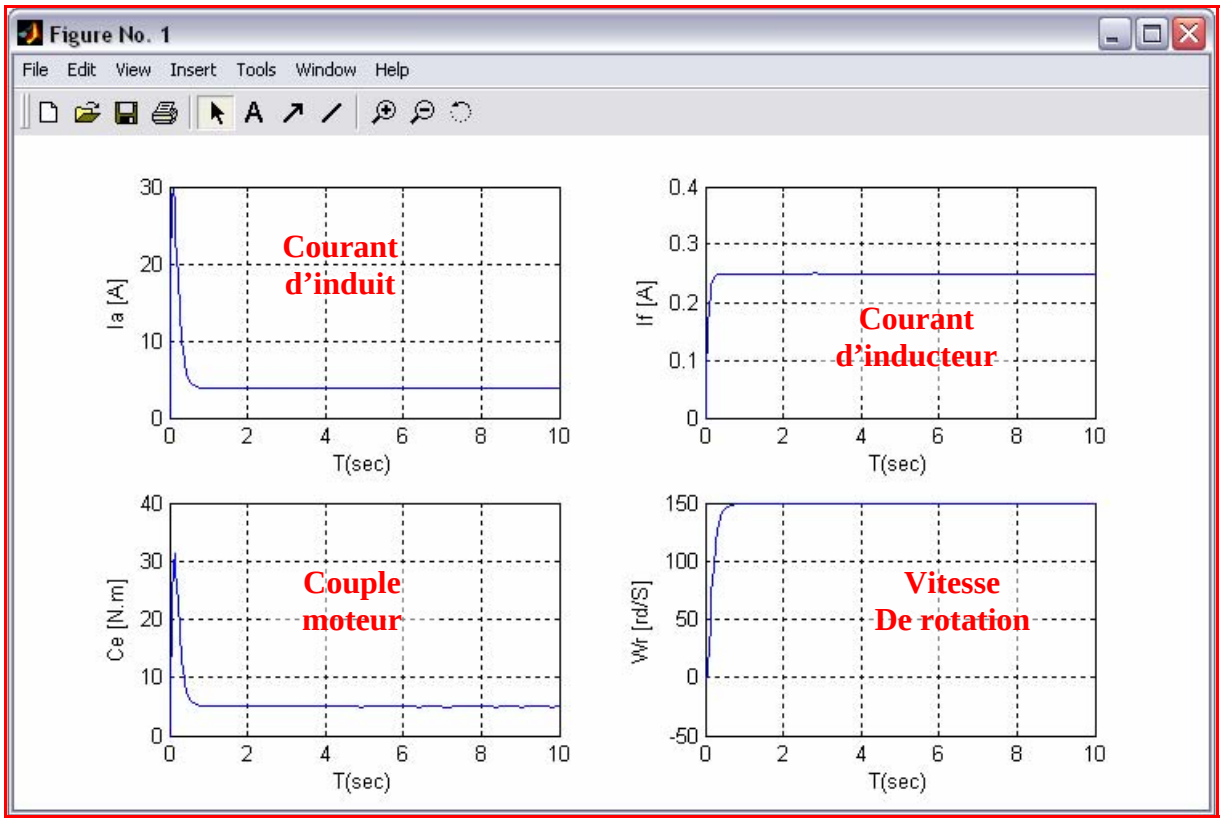


Figure II.37 : Simulation du MCC à excitation shunte (en charge).

II.4.4. Excitation Composée

L'excitation composée est le jumelage des deux excitations composée et série, et sa représentation sur le système d'axes « *d, q* » est la suivante :

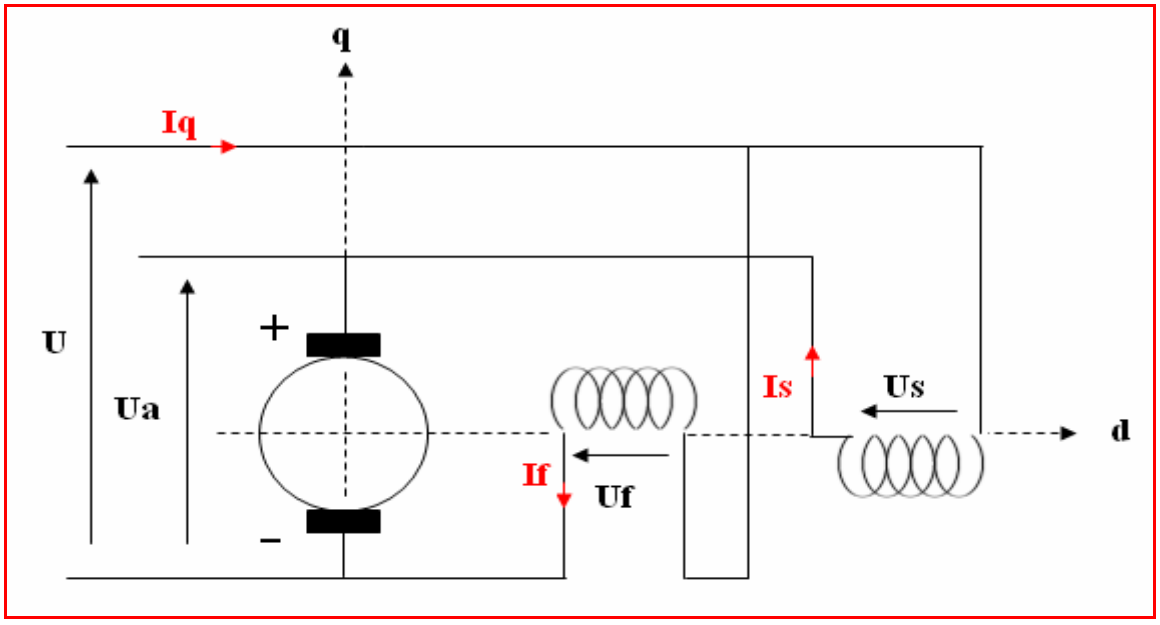


Figure II.38 : Schéma du MCC à excitation composée sur les axes « *d, q* ».

Du schéma de la figure précédente, on remarque que le courant est le même qui traverse la partie série et l'inducteur mais la tension est la somme des deux et est égale à celle de la partie parallèle, ce qui nous conduit à écrire :

$$\begin{cases} U = U_a + U_s \\ U = U_f \\ I_q = I_s \end{cases} \quad \text{..... (II.12)}$$

- Equations électriques :

$$\begin{cases} U_s = R_s * I_s + L_s * \dfrac{dI_s}{dt} + M_{fs} * \dfrac{dI_f}{dt} \\ U_a = (R_a + \omega_r * M_{sd}) * I_q + L_a * \dfrac{dI_q}{dt} + \omega_r * M_{fd} * I_f \\ U_f = R_f * I_f + L_f * \dfrac{dI_f}{dt} + M_{fs} * \dfrac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad \text{..... (II.13)}$$

A partir des systèmes d'équation **(II.12)** et **(II.13)**, on peut écrire :

$$\begin{cases} U = (R_a + R_s + \omega_r * M_{sd}) * I_q + (L_a + L_s) * \dfrac{dI_q}{dt} + M_{fs} * \dfrac{dI_f}{dt} + \omega_r * M_{fd} * I_f \\ Ce = M_{fd} * I_f * I_q + M_{sd} * I_q^{\,2} \end{cases} \quad \text{..... (II.14)}$$

- Equations mécaniques :

$$J * \frac{d\omega_r}{dt} = Ce - Cr \quad \text{..... (II.15)}$$

On remplace ***Ce*** par son équation, on obtient :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{M_{fd} * I_f * I_q + M_{sd} * I_q^{\,2}}{J} - \frac{Cr}{J} \quad \text{..... (II.16)}$$

A partir des équations électriques et mécaniques qui décrivent le moteur à courant continu à excitation composée, on a construit le schéma bloc suivant :

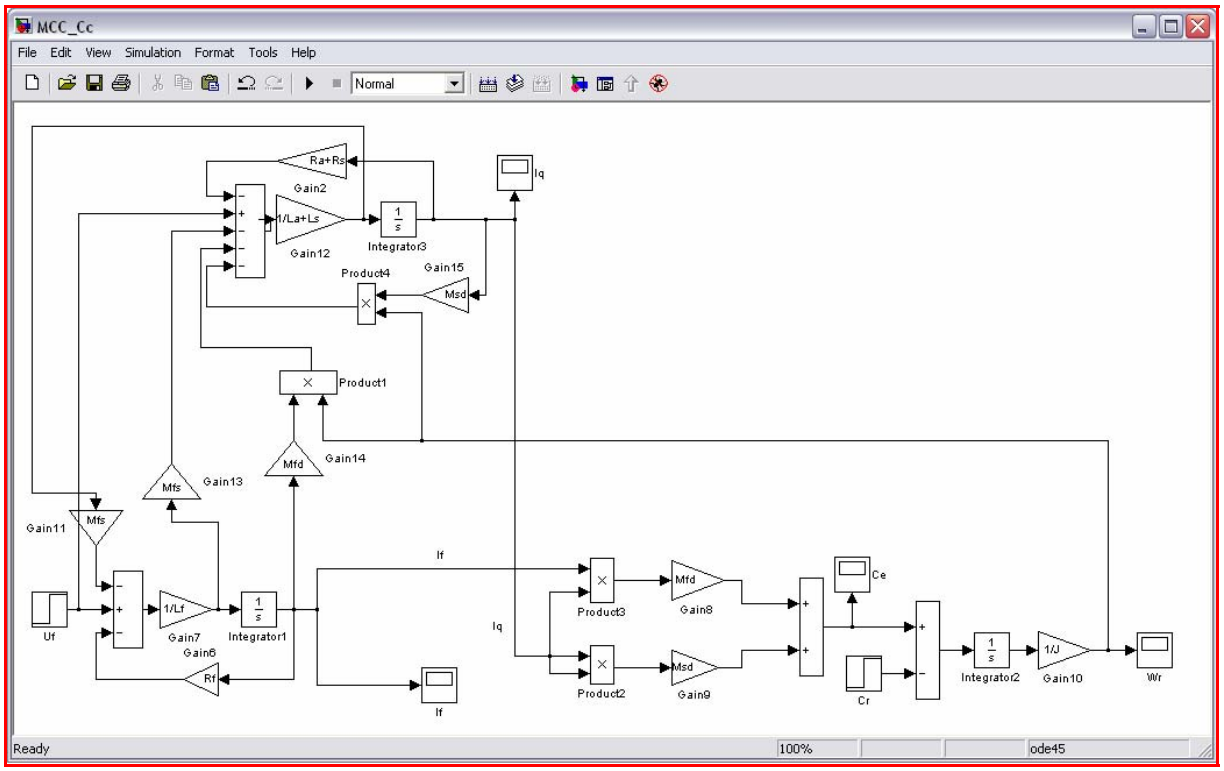


Figure II.39 : Modèle Matlab du MCC à excitation composée.

Les paramètres du moteur à excitation composée utilisés pour la simulation sont les suivants :

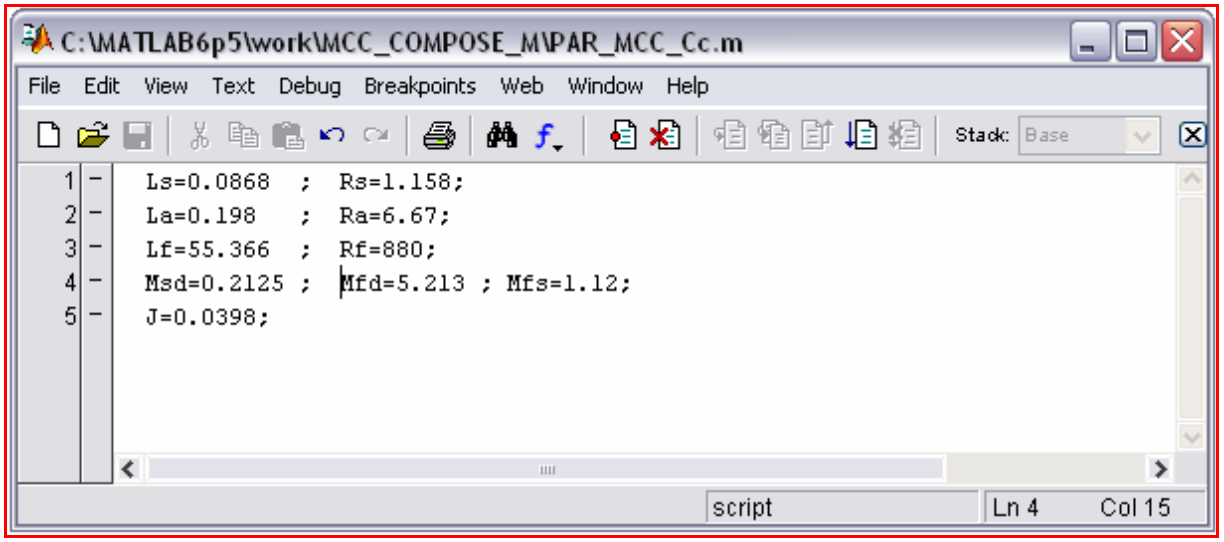


Figure II.40 : Paramètres utilisés pour la simulation du MCC à excitation composée.

La figure (**fig.II.41**) représente les résultats de simulation du moteur à excitation composée lorsque le moteur est à vide. Par contre la figure (**fig.II.42**) représente les résultats de simulation du même moteur mais cette fois-ci le moteur subit un couple résistant de 5 N.m qui est due à l'entraînement d'une charge.

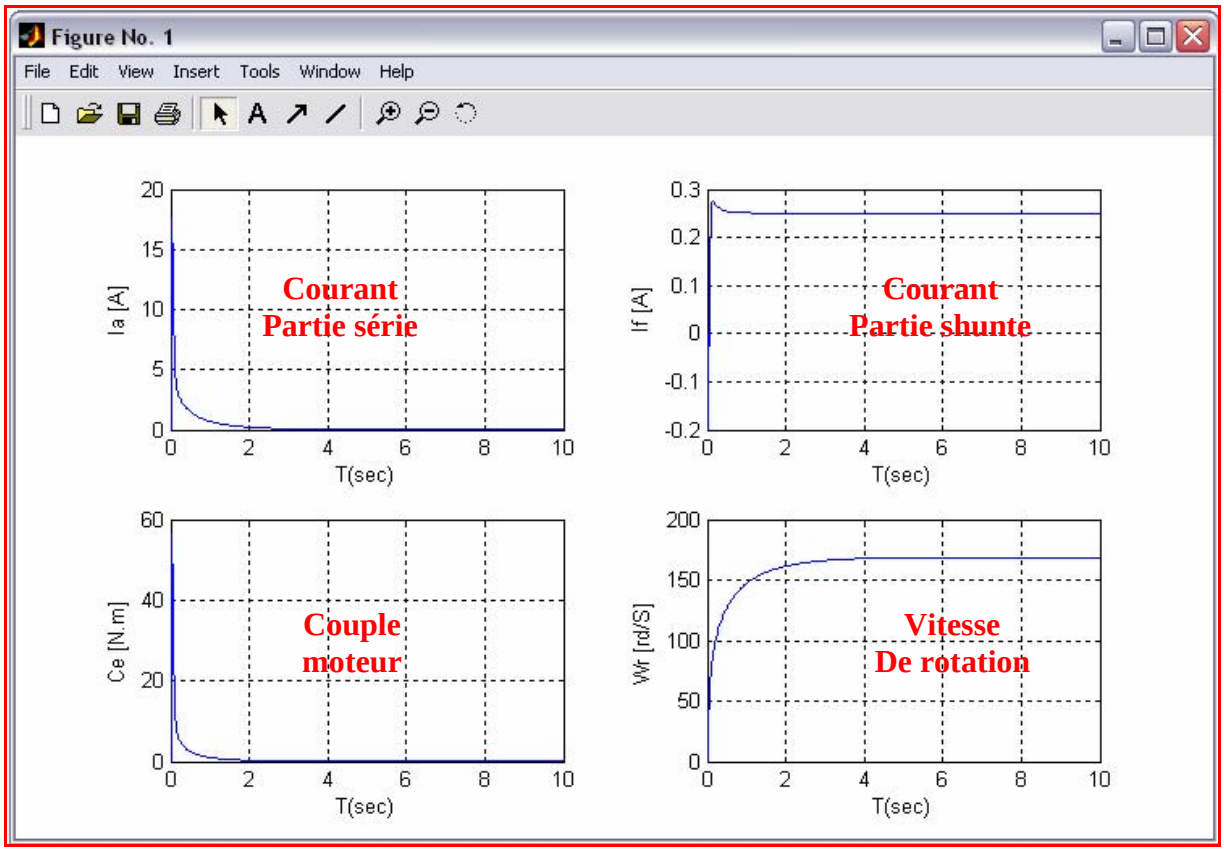


Figure II.41 : Simulation du MCC à excitation composée (à vide).

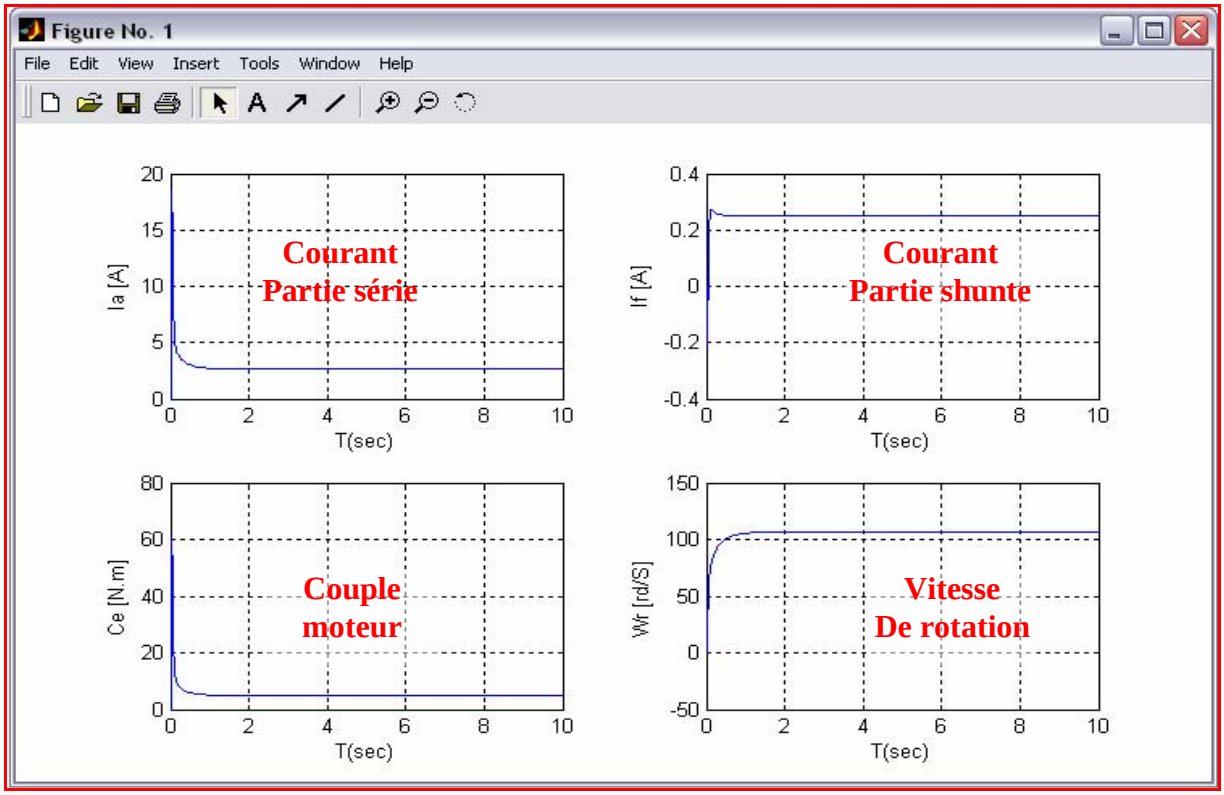


Figure II.42 : Simulation du MCC à excitation composée (en charge).

II.5. INTERPRETATION DES RESULTATS OBTENUS

II.5.1. Excitation séparée

En comparant les résultats de simulation présentés par les figures (**fig.II.11**) et (**fig.II.26**) qui correspondent aux simulations du modèle du moteur à courant continu à excitation séparée par bond graph et Matlab Simulink successivement, on constate que ces résultats sont proches « avec une erreur de 0.01 sur tous les résultats » et les caractéristiques de ce type d'excitation décrites au premier chapitre, apparaissent clairement dans ces résultats, le moteur développe un couple fort à une faible vitesse et le courant d'inducteur atteint un pic de «*I=28.93 A* » durant le régime transitoire, puis la vitesse se stabilise sur «*Ω= 168.96 rad/s* » par contre le courant d'inducteur et le couple électromagnétique s'annulent.

Avec les mêmes paramètres et un couple résistant de «*5 N.m* » produit par la charge qu'entraîne le moteur, on remarque que les résultats représentés par les figures (**fig.II.12**) et (**fig.II.27**) sont presque identiques, sur ces résultats apparaît clairement la diminution de la vitesse du moteur qui atteint la valeur de «*Ω= 149.27 rad/s* », par contre le couple moteur et le courant d'inducteur font les mêmes pics qu'à vide en régime transitoire, et ne s'annulent pas au régime permanent et cela est dû à la charge.

II.5.2. Excitation série

En comparant les résultats de simulation présentés par les figures (**fig.II.14**) et (**fig.II.31**), qui correspondent aux simulations du modèle du moteur à courant continu à excitation série par bond graph et Matlab Simulink successivement, on constate que ces résultats sont très proches «*avec une erreur de 0.01 sur tous les résultats* ». On voit sur les deux figures que la vitesse ne cesse pas d'augmenter «*Ω= 506 rad/s* », c'est-à-dire que le moteur c'est emballé « *vitesse infinie* ». Le couple développé par ces modèles est très grand « *Ce=52.3 N.m*». On remarque que le même courant traverse l'induit et l'inducteur «caractéristique du circuit série ». Donc d'après ces résultats, on peut dire que nos modèles donnent de bons résultats reste à vérifier sur le moteur en charge.

Par comparaison entre les résultats donnés par les figures (**fig.II.15**) et (**fig.II.32**) on peu dire qu'ils sont très proches.

On remarque sur ces résultats que la vitesse du moteur atteint rapidement le régime permanent « *vitesse constante* » « *Ω= 175 rad/s* », le couple développé est très grand

« *Ce=56N.m*» par contre le courant absorbé est moyennement faible ce qui permet à ce moteur d'entraîner une grande charge.

Donc le modèle du moteur à courant continu à excitation série, obtenu par bond graph et Matlab Simulink est très fiable et proche du comportement réel du moteur.

II.5.3. Excitation shunte

Dans le premier chapitre, on a remarqué que le moteur shunte a les mêmes équations que le moteur séparée malgré la grande différence au raccordement physique, et cela apparaît clairement sur les résultats présentés par les figures (**fig.II.14**) et (**fig.II.31**) pour l'excitation *séparée* et (**fig.II.18**) et (**fig.II.36**) pour l'excitation *shunte* où on voit que les courbes (courant, couple et vitesse) sont identiques

Même chose pour le cas du moteur en charge, les résultats obtenus par bond graph et Matlab Simulink sont identiques et répondent aux données du cahier de charge. Tous cela nous permet de dire que nos modèles sont fiables.

II.5.4. Excitation composée

Les avantages du moteur série et du shunte sont réunis dans le moteur à excitation composée, un couple de démarrage très fort, un courant faible tout en éliminant le phénomène d'emballement.

Si on visualise les résultats donnés par le modèle bond graph et le modèle Matlab Simulink, on peut voir que la vitesse du moteur sans charge atteint un niveau constant «*Ω=165 rad/s* »au régime permanent ce qui justifie l'élimination du phénomène d'emballement, le couple est grand au démarrage et le courant absorbé ne dépasse pas trois fois le courant nominale.

En ajoutant la charge au moteur, on remarque que la vitesse diminue «*Ω= 90 rad/s* » mais le couple de démarrage reste le même qu'à vide ; c'est la caractéristique principale du moteur shunte « *couple constant quelque soit la charge* ».

En analysant ces résultats, on peut dire que les modèles du moteur composé obtenu sont acceptables.

Remarque : *Les valeurs des résultats qui apparaissent sur les courbes de simulation valident les expressions mathématiques et confirme les résultats pratiques du cahier de charges.*

II.6. CONCLUSION

La modélisation du moteur à courant continu par l'approche graphique « *Bond graph* » qui a été simulé par le logiciel « *SYMBOLS 200* » et celle réalisée sous l'environnement « *Matlab Simulink* » nous a permis de confirmer la validation du modèle du moteur.

A partir de ces résultats, nous constatons que l'approche bond graph est très fiable dans le domaine de modélisation car elle est simple et ne prend pas compte des équations mathématiques parfois inconnues et surtout qu'elle nous fait gagner beaucoup de temps.

La validation du modèle bond graph nous permet de passer à l'étape de surveillance, qui sera présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Surveillance du moteur à courant continu

III.1. INTRODUCTION

La procédure de surveillance nécessite de disposer d'informations sur le mode de fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies à travers des capteurs permettant de mesurer les différentes variables des processus. L'instrumentation du système à surveiller n'entraîne pas obligatoirement de coût supplémentaire dans la mesure où celle-ci est nécessaire pour réaliser la commande automatique du processus.

Ce chapitre comporte une partie théorique qui englobe des définitions de quelques concepts, les différentes étapes à suivre pour la surveillance, ainsi que les différentes méthodes utilisées en surveillance des systèmes physiques. La deuxième partie contient la surveillance de notre système par l'approche bond graph.

III.2. DEFINITIONS ET CONCEPTS GENERAUX

La difficulté majeure rencontrée lors de la description des concepts et de la terminologie utilisée dans le monde de la maintenance provient du fait que l'on peut aborder

ce problème de différentes manières selon l'origine et la formation des intervenants. De plus, les différences sont très subtiles et subjectives et ces définitions peuvent différer d'une entreprise à l'autre.

III.2.1. Composant « *Component* »

Un composant est un organe technologique représentant une partie du processus industriel « *pompe, vanne, conduite, ...* » [30].

III.2.2. Défaut « *Fault* »

Le terme défaut est généralement défini comme une imperfection physique liée à la conception ou la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance [35].

III.2.3. Défaillance « *Failure* »

Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées.

Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnostic [32] et [35].

III.2.4. Panne « *Break-down* »

La panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir la fonction vitale. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance [35].

III.2.5. Résidu « *Residual* »

Un résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle « *supposées décrire correctement le processus* » [31] et [32].

III.2.6. Diagnostic « *Diagnosis* »

L'opération de diagnostic consiste à identifier la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'observations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Il s'agit donc de travailler sur les relations de causalité liant les effets « *symptômes observés sur le système* » et les causes « *défauts du système* ». L'objectif d'un système de diagnostic est alors de rendre compte de l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible « *c'est-à-dire avant qu'il n'entraîne des dommages importants à travers des défaillances* » [30].

III.2.7. Perturbation

C'est l'entrée du système physique qui n'est pas une commande. Autrement dit, c'est une entrée non contrôlée [31].

III.3. LES DIFFERENTES ETAPES DE SURVEILLANCE

La surveillance d'un système industriel nécessite un certain nombre d'étapes résumées dans la (**fig.III.1**) [32].

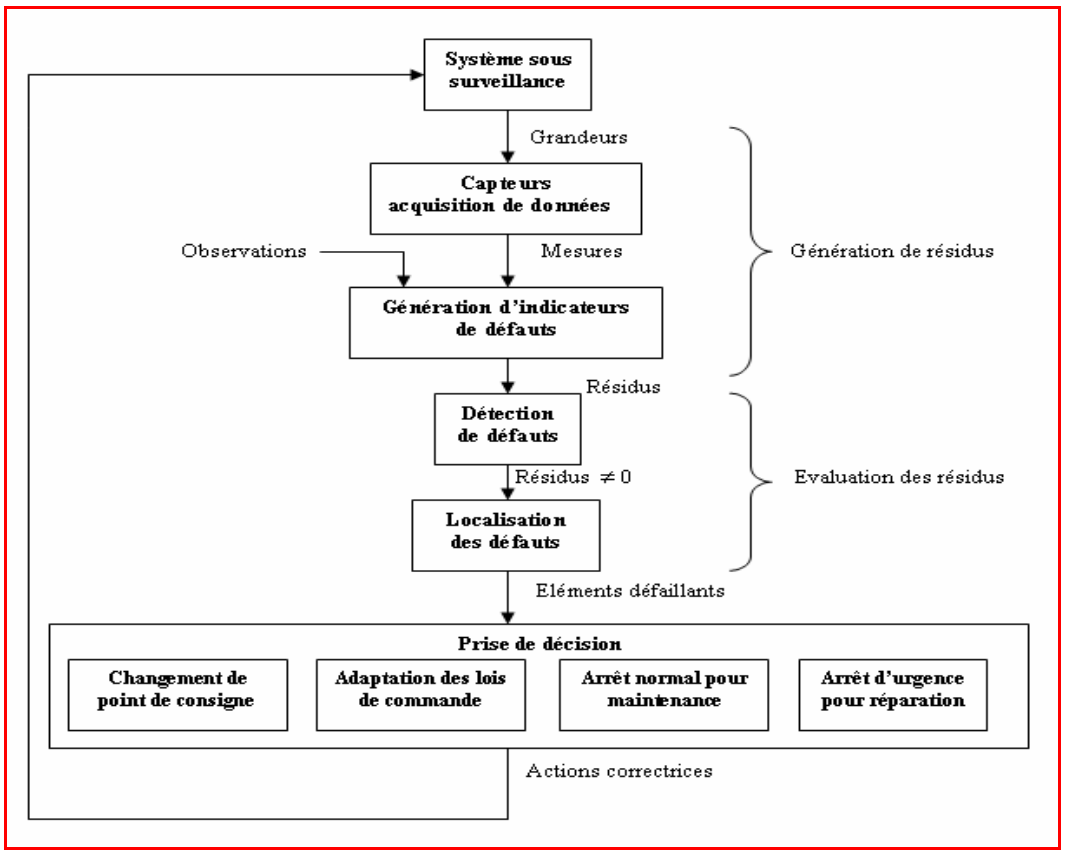


Figure III.1 : Les différentes étapes de surveillance.

III.3.1. Acquisition de données

La procédure de surveillance nécessite de disposer d'information sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation. Cette étape implique donc l'utilisation de capteurs qui permettent de mesurer les différentes variables des processus. L'instrumentation du système à surveiller n'entraîne pas obligatoirement de coût supplémentaire dans la mesure où celle-ci est de toute façon nécessaire pour réaliser la commande automatique de processus. [32]

III.3.2. Elaboration d'indicateurs de défauts

A partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation, il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine de surveillance, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus. Un résidu représente un écart entre les grandeurs estimées et mesurées. De ce point de vue, le terme de résidu est tout à fait justifié car l'étape d'élaboration d'indicateurs de défauts consiste finalement, quelque soit la méthode employée, à comparer le comportement réel du système à un comportement de référence. Cet écart de comportement doit donc être idéalement nul en l'absence de défaut et différent de zéro dans le cas contraire.

III.3.3. Détection

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal. On pourrait penser qu'il suffit de tester la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut. En pratique, le problème n'est pas si simple, car les grandeurs mesurées sont toujours entachées de bruits. D'autre part, le système surveillé est toujours soumis à des perturbations non nécessairement mesurables, le modèle utilisé, n'est qu'une représentation toujours imparfaite de la réalité, de sorte que les résidus peuvent être non nuls en l'absence de défaut. Par conséquent, cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, est réalisée à l'aide d'un seuillage. [10]

III.3.4. Localisation

Il s'agit, à partir des résidus détectés non nuls statistiquement, de localiser le défaut, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défaillants. On appelle signature d'un défaut

l'effet de celui-ci sur un ou plusieurs résidus. Si l'on dispose de la connaissance de la signature des défauts, il est possible, à partir de celle-ci, de remonter des effets (résidus non nuls) aux causes (les éléments défaillants). [10]

III.3.5. Prise de décision

Le fonctionnement incorrect du système étant constaté, il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées d'un système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation. Ces 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.

III.4. CLASSIFICATION DES METHODES DE SURVEILLANCE

Dans ce paragraphe, on présente différentes méthodes utilisées en surveillance des systèmes physiques. Le domaine était très vaste, des choix arbitraires ont été faits. Le but n'est donc pas de faire une synthèse exhaustive de l'existant, mais de montrer la richesse des possibilités qui s'offrent au concepteur de système de diagnostic. En effet, différents types d'algorithmes de détection dédiés aux systèmes physiques ont été conçus par les chercheurs de la communauté de l'automatique. Néanmoins, on s'est astreint à balayer le large spectre des techniques actuellement utilisées en surveillance, à savoir [32]:

- Méthodes sans modèle analytique.
- Méthodes basées sur les modèles analytiques.

Actuellement, on s'oriente vers des systèmes de surveillance mettant en œuvres différentes techniques de détection. En effet, chacune d'entre elles est plus ou moins bien adaptée pour appréhender tel ou tel type de défaut.

III.4.1. Méthodes sans modèle analytique

On peut trouver plusieurs méthodes qui ne sont pas à base de modèle analytique, ou chacune de ces méthodes est dédié à un domaine précis.

- Analyse fréquentielle :

Une première approche du traitement du signal repose sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est très utilisée pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. Le contenu spectral des signaux est utilisé pour détecter des défauts dans les machines électriques tels que les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les décentrages, les court-circuits dans les bobinages. Avec le développement des applications à vitesse variable, les recherches actuelles portent plus particulièrement sur les méthodes adaptées à la caractérisation de signaux non stationnaires : temps fréquence, temps échelle.

L'analyse du spectre des signaux issus des capteurs, permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation sous surveillance. Les signaux sont ici tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de panne (le problème, c'est qu'un changement de consigne modifie les caractéristiques fréquentielles et cela n'a rien d'un défaut). Cette approche possède l'avantage d'être relativement simple à mettre en pratique, mais l'inconvénient d'être assez sensible aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt. De plus, un échantillonnage fréquent est nécessaire pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence [31], [23] et [24].

- Redondance matérielle :

Cette méthode consiste à multiplier physiquement les capteurs critiques d'une installation. Un traitement des signaux issus des éléments redondants effectue des comparaisons et distingue l'élément défectueux en cas d'incohérence. Cette méthode est pénalisante en termes de poids, puissance consommée, volume et coût d'achat et de maintenance. Elle est donc essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (l'aérospatiale, le nucléaire). En effet, elle apporte l'avantage, une fois la défaillance détectée et localisée, de pouvoir utiliser la partie de l'équipement encore saine mais cette technique ne s'applique généralement que sur des capteurs [32] et [35].

- Capteurs spécifiques :

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs de fin de

course, d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles, ils sont dits capteurs - détecteurs [31].

- Réseaux de neurones artificiels :

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle du procédé est impossible, l'utilisation de modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Pour cela des réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés. Leur application dans les domaines de la modélisation, de la commande et du diagnostic a largement été rapportée dans la littérature.

Un RNA est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traite de façon dynamique l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs. [13]

De manière générale, l'utilisation des RNA se fait en deux phases. Tout d'abord, la synthèse du réseau est 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 [31] et [32].

Comme il a été dit précédemment, 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 attrayants pour cette utilisation. Leur emploi peut alors se faire à trois niveaux :

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

- Systèmes d'inférence flous :

Pendant les vingt dernières années, les systèmes d'inférence floue « *SIF* » dont les bases relèvent de la théorie des ensembles flous de Zadeh sont devenus très populaires. Les applications dans le traitement du signal, la modélisation, la commande, la supervision de procédés et la prise de décision démontrent la capacité des SIF à traiter des problèmes non linéaires grâce à l'utilisation de connaissances expertes. [11]

La structure de base d'un SIF est constituée de :

- ❖ Un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes, les plus usuelles étant les formes triangulaires, trapézoïdales, et gaussiennes,
- ❖ Une base de connaissance qui regroupe les règles liant les variables d'entrée et de sortie sous la forme « *Si…Alors…* »,
- ❖ Un mécanisme de raisonnement qui base son fonctionnement sur la logique du « *modus ponens* » généralisé.

Les SIF peuvent être qualifiés de méthode « boîte grise ». 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.

- Reconnaissance de formes :

La reconnaissance de formes regroupe l'ensemble des méthodes permettant la classification automatique d'objets, suivant sa ressemblance par rapport à un objet de référence. L'objectif est de décider, après avoir observé un objet, à quelle forme celui-ci ressemble le plus. Une forme est définie à l'aide de « *p* » paramètres, appelés descripteurs,

qui sont les composantes d'un vecteur forme que nous noterons « X ». La résolution d'un problème de reconnaissance de formes nécessite [13]:

- ❖ La définition précise des ***l*** classes entre lesquelles va s'opérer la décision. Cette étape est liée à la nature des objets à classer et est donc spécifique au problème posé.

- ❖ Le choix d'un jeu de caractères pertinents pour la discrimination des vecteurs de formes. Malheureusement, il n'existe pas de méthodes systématiques permettant de choisir les paramètres les plus appropriés à la résolution d'un problème donné. Par conséquent, seule une bonne connaissance du problème à résoudre peut permettre un choix adéquat des paramètres de forme. Notons enfin 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.

- ❖ L'élaboration d'un classificateur permettant l'affectation d'une forme observée à l'une des classes. Le classificateur est généralement établi à l'aide d'un ensemble d'apprentissage constitué de formes pour lesquelles on connaît l'appartenance aux différentes classes.

III.4.2. Méthodes basées sur les modèles analytiques

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.

Ces connaissances peuvent en particulier provenir de la connaissance du comportement entrée / sortie d'un procédé ou des processus qui en gouverneraient l'évolution. Cette connaissance est généralement exprimée sous forme de modèles mathématiques.

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

- Espace de parité :

L'approche la plus classique est celle dite de l'espace de parité. 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 [13].

- Observateurs :

La génération de résidus à l'aide d'une estimation d'état consiste à reconstruire l'état ou, plus généralement, la sortie du processus à l'aide d'observateurs et à utiliser l'erreur d'estimation comme résidu. Cette méthode s'est beaucoup développée car elle donne lieu à la conception de générateurs de résidus flexibles [24] et [31].

- Estimation paramétrique :

L'approche d'estimation paramétrique considère que l'influence de défauts se reflète sur les paramètres et non pas uniquement, comme c'est le cas des observateurs, sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode 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 possède l'avantage d'apporter de l'information sur l'importance des déviations

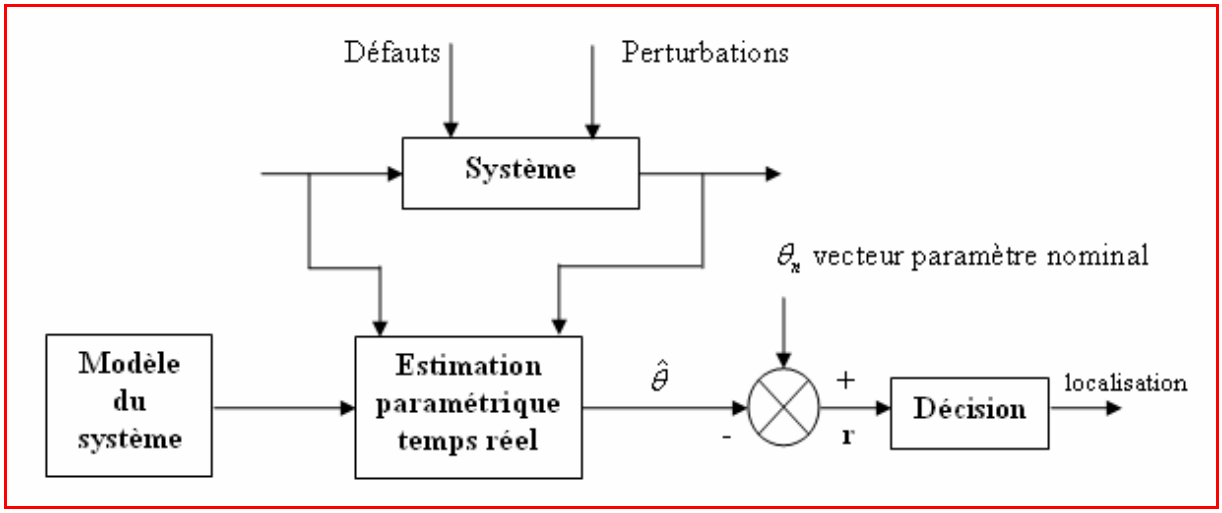


Figure III.2 : Estimation paramétrique pour la surveillance.

III.4.3. Surveillance Par Bond Graph

D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph, un système de surveillance peut être illustré par la (**fig.III.3**). [14]

On distingue essentiellement deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie « *formée par le processus et l'ensemble des actionneurs* », alors que la seconde

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

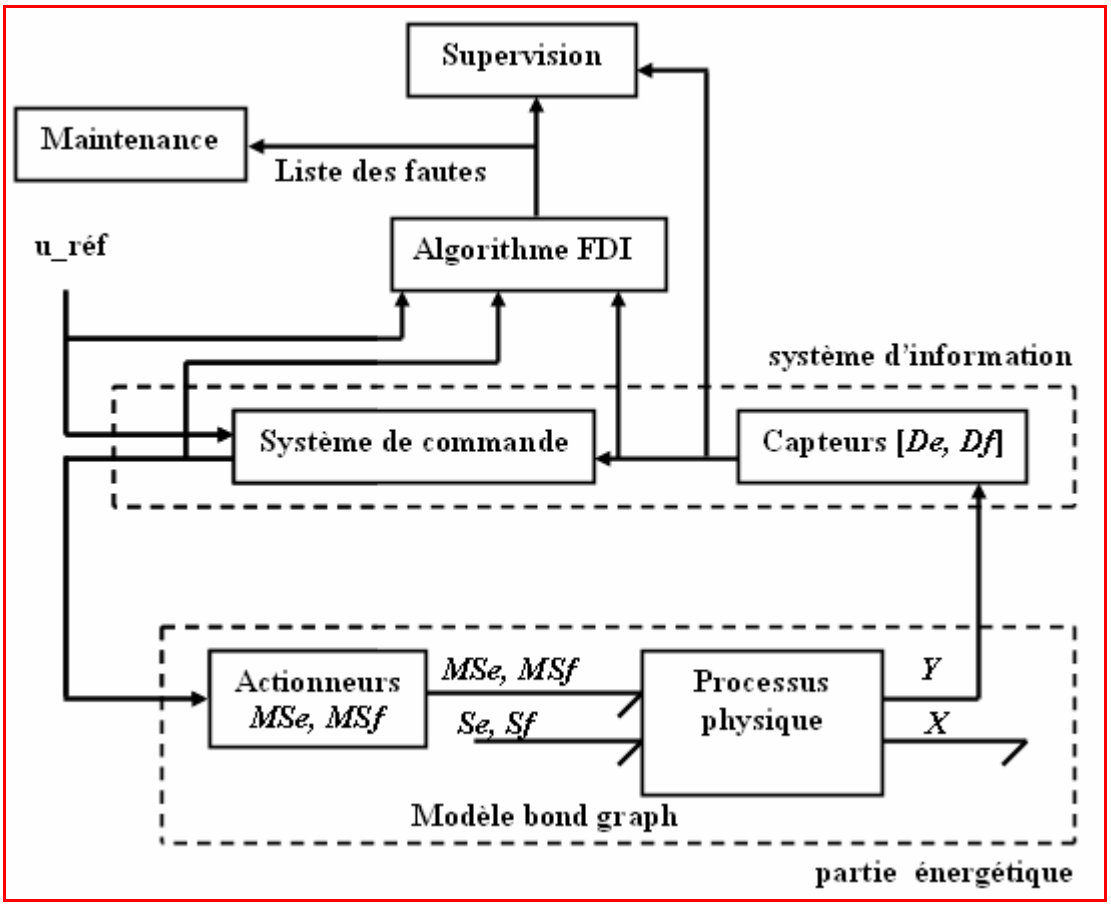


Figure III.3 : Représentation bond graph d'un système de surveillance.

Les algorithmes de surveillance « *de détection et d'isolation de fautes FDI* » reçoivent les informations en ligne issues des capteurs « *détecteurs d'effort De et de flux Df* » et

délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défaillants sont transmises au service de maintenance [14], [22].

On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus: l'approche quantitative et l'approche qualitative.

III.4.3.1. L'approche qualitative pour la surveillance en utilisant le bond graph

Cette approche ne nécessite pas un modèle très précis. Contrairement aux représentations de connaissances conventionnelles permettant de décrire la structure du système et son état par le biais de divers outils (schéma bloc, équations différentielles, ...), les bond graphs qualitatifs ne décrivent explicitement que la localisation des composants du système et leurs interconnexions. La surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif s'avère plus simple en comparaison avec les méthodes quantitatives car elle ne nécessite pas un modèle précis. [12]

Ces modèles qualitatifs sont construits sans aucune considération des paramètres du système. Ils se basent sur des valeurs qualitatives (à la place des valeurs numériques) définies par l'ensemble {[1] [+] [0] [-] [-1] [?]} représentant la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Les opérateurs sont ainsi qualitatifs, ils peuvent être définis en utilisant les opérateurs des nombres réels : {+, -, x, ÷, =}.

On résout alors un système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique d'occurrence de la faute. [12], [29]

D'autres utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance [16] et [29]. L'avantage que présente cette approche est qu'elle ne nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres. Toutefois, cette approche devient complexe pour les processus multi - énergie et présente d'autres inconvénients comme la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations.

III.4.3.2. L'approche quantitative pour la surveillance en utilisant le bond graph

Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Contrairement à l'approche qualitative, l'approche quantitative se

base sur des lois physiques et nécessite donc une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Les modèles quelque soient leurs formes (fonction de transfert, équations d'état, ...) sont obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) ou sur la base d'une identification statistique des paramètres. Depuis 1995 on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance [14], [29].

Les avantages que présente cette approche par rapport aux approches basées sur les observateurs sont : la simplicité de la compréhension des relations de redondance analytique (RRA) puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph, 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.

III.5. PLACEMENT DE CAPTEURS

III.5.1. Algorithme

Nous utilisons les détecteurs d'effort « *De* » et de flux « *Df* » pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance; nous utilisons donc un lien de type signal « *une flèche* ». Le but est d'obtenir un placement optimal de capteurs qui assure la surveillance des composants c'est à dire assurer la détection et la localisation des défaillances des composants. On admet que les défauts sur les composants ne sont pas multiples, les sources et les capteurs ne sont pas défaillants [19].

On a un modèle bond graph d'un processus physique. On suppose que les capteurs ne sont pas encore placés sur le modèle bond graph. Les variables booléennes « y_i *et* z_j » correspondant au placement d'un capteur sur une jonction sont telles que :

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

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{si le j}^{\text{ème}} \text{ capteur est placé à la j}^{\text{ème}} \text{ jonction "1".} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad \text{..... (III.2)}$$

Soient : N_0 le nombre de jonctions ‘’0’’.

- N_1 le nombre de jonctions ‘’1’’.
- n_i le nombre de liens attachés à la $i^{ème}$ jonction ‘’0’’ ($i = 1,\ldots, N_0$).
- m_j le nombre de liens attachés à la $j^{ème}$ jonction ‘’1’’ ($j = 1,\ldots, N_1$).
- e et f représentent l’effort et le flux respectivement.

Les équations de la $i^{ème}$ jonction ‘’0’’ sont :

$$\begin{cases} \sum_{K=1}^{n_i} a_k f_k = 0 \qquad \text{où} \qquad a_k = \begin{cases} 1 & \text{si le demiflèche est vers la jonction.} \\ -1 & \text{sinon.} \end{cases} \\ e_k = e_{C\ i} \quad k = 1,\ldots,\ n_i - 1 \end{cases} \quad \textbf{(III.3)}$$

Les équations de la $j^{ème}$ jonction ‘’1’’ sont :

$$\begin{cases} \sum_{l}^{m_j} a_l e_l = 0 \qquad \text{où} \qquad a_l = \begin{cases} 1 & \text{si la demi flèche est vers la jonction.} \\ -1 & \text{sinon.} \end{cases} \\ f_l = f_{R\ j} \quad l = 1,\ldots,\ m_j - 1 \end{cases} \quad \textbf{(III.4)}$$

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

$$K = \left\{ M_{S_e} \cup M_{S_f} \cup D_e \cup D_f \cup S_e \cup S_f \right\} \quad \textbf{(III.5)}$$

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

$$X = \left\{ e_1 , f_1 \right\} \cup \left\{ e_2 , f_2 \right\} \cup \ldots \cup \left\{ e_{ne} , f_{ne} \right\} \ / \ X \in \Re^{2 \times ne} \quad \textbf{(III.6)}$$

Où « *ne* » est le nombre de liens de puissance dans les éléments « *C, I et R* ».

- Les variables inconnues peuvent être calculées par le parcours des chemins causaux.

Le flux et l’effort d’un élément « *I* » lié à une jonction « *1* » sont les suivants :

$$\begin{cases} e_{I_j} = \phi_{I_j} \left[s \left\{ \left(1 - z_j \right) f_{I_j} + z_j Df_j \right\} \right]; \ j = 1,\ldots,N_1 \\ f_{I_j} = \frac{1}{s} \left(1 - z_j \right) \phi_{I_j}^{-1} (e_{I_j}) + z_j Df_j \end{cases} \quad \textbf{(III.7)}$$

Où « s » est la variable de Laplace.

Mais si l'élément « I » est placé sur une jonction « 0 », les variables effort et flux seront calculées comme suit :

$$\begin{cases} e_{I_i} = \phi_{I_i} s\left(1-y_i\right) f_{I_i} + y_i De_i;\ i=1,\ldots,N_0 \\ f_{I_i} = \dfrac{1}{s}\left[\left(1-y_i\right)\phi_{I_i}^{-1}(e_{I_i}) + y_i \phi_{I_i}^{-1} Df_i\right] \end{cases} \quad \text{..... (III.8)}$$

La relation (**III.8**), présente comment calculer l'effort et le flux d'un élément « R » placé sur une jonction « 1 »,

$$\begin{cases} e_{R_j} = \phi_{R_j}\left[\left(1-z_j\right) f_{R_j} + z_j Df_j\right];\ j=1,\ldots,N_1 \\ f_{R_j} = \left(1-z_j\right)\phi_{R_j}^{-1}(e_{R_j}) + z_j Df_j \end{cases} \quad \text{..... (III.9)}$$

Et (**III.9**) si l'élément « R » est placé sur une jonction « 0 » :

$$\begin{cases} e_{R_i} = \phi_{R_i}\left(1-y_i\right) f_{R_i} + y_i Df_i\ ;\ i=1,\ldots,N_0 \\ f_{R_i} = \left(1-y_i\right)\phi_{R_i}^{-1}(e_{R_i}) + y_i \phi_{R_i}^{-1} Df_i \end{cases} \quad \text{..... (III.10)}$$

III.5.2. Génération des relations de redondance analytique

La génération des RRAs par la méthodologie bond graph repose sur l'élimination des variables inconnues dans les lois de structure de jonction « *0, 1, TF et GY* » par le parcours de chemins causaux, plusieurs relations entre les différents flux et effort peuvent être établies. Les variables connues K sont celles des détecteurs et des sources et les variables inconnues « X » sont celles des liens de puissances dans les éléments « *C, I et R* ». L'élimination des variables inconnues est systématique sur un modèle bond graph grâce à ses propriétés causales et au parcours des chemins causaux. La procédure de génération des RRAs à partir d'un modèle bond graph est [19], [29] :

1. Mettre le modèle bond graph en causalité intégrale préférentielle,

2. Écrire les lois de structure au niveau des jonctions et exprimer les variables inconnues en fonction des variables connues en suivant les chemins causaux possibles,
3. Pour toute équation de jonction « *0 et 1* » contenant un détecteur une relation de redondance analytique est déduite.

III.5.3. Matrice de signature des défaillances

La structure des RRAs forme une matrice binaire S_{ij} qui nous renseigne sur la sensibilité des résidus aux défaillances des composants du processus physique. Les éléments de la matrice sont définis comme suit:

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la i}^{\text{ème}} \text{ RRA contient des variables du j}^{\text{ème}} \text{ composant.} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad \text{..... (III.11)}$$

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 [22], [25].

III.6. APPLICATION

Notre application consiste à surveiller le moteur à courant continu avec ces différents types d'excitations.

III.6.1. Excitation série

Le modèle bond graph du moteur série avec des détecteurs virtuels est donné sur la (**fig.III.4**). Ce modèle est composé de trois jonctions 0 « 0_{Re} , 0_{Ra} *et* 0_f », trois jonctions 1 « 1_{Ie}, 1_{Ia} *et* 1_J », six composants « I_e, R_e, I_a, R_a, *J et f* » et deux sources d'efforts **«** *Se* **».** Le but est d'assurer la surveillance des composants avec le minimum de capteurs. On suppose un placement virtuel des détecteurs « *De et Df* » sur toutes les jonctions et que les capteurs et les sources ne sont pas défaillants.

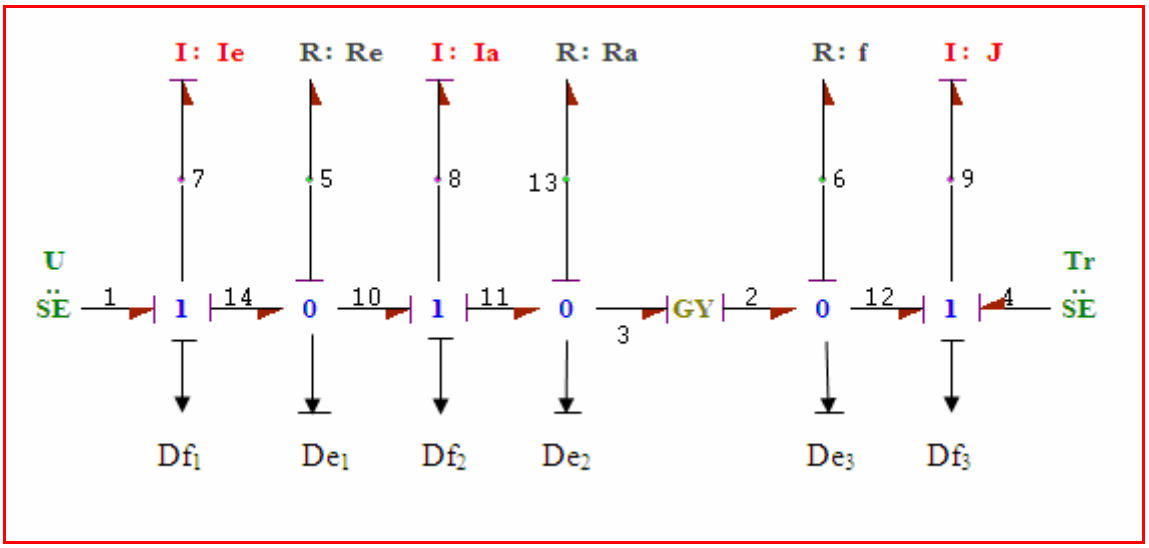


Figure III.4 : Modèle bond graph du MCC Série avec des détecteurs virtuels.

L'ensemble des variables connues est $K=\left\{Se_{(U)},Se_{(Tr)},Df_1,De_1,Df_2,De_2,Df_3,De_3\right\}$ et l'ensemble des variables inconnues est $X=\left\{e_7, f_7, e_5, f_5, e_8, f_8, e_{13}, f_{13}, e_6, f_6, e_9, f_9\right\}$.

Du modèle de la (**fig.III.4**), on peut écrire les équations suivantes :

Lois de structure		**Lois constitutives des éléments**	
Jonction 1 : Ie		Elément I_7 : Ie	
$\begin{cases} f_7=f_1; f_7=f_{14} \\ e_1-e_7-e_{14}=0 \\ e_1=Se_1 \end{cases}$	**(III.12)**	$\begin{cases} e_7=\Phi_{I_7}\left[s\left\{(1-z_1)*f_7+z_1*Df_1\right\}\right] \\ f_7=\frac{1}{s}*(1-z_1)\Phi_{I_7}^{-1}*(e_7)+z_1*Df_1 \end{cases}$	**(III.13)**
Jonction 0 : Re		Elément R_5 : Re	
$\begin{cases} e_5=e_{14}; e_5=e_{10} \\ f_{14}-f_5-f_{10}=0 \end{cases}$	**(III.14)**	$\begin{cases} e_5=\Phi_{R_5}*(1-y_1)*f_5+y_1*De_1 \\ f_5=(1-y_1)*\Phi_{R_5}^{-1}*(e_5)+\Phi_{R_5}^{-1}*y_1*De_1 \end{cases}$	**(III.15)**
Jonction 1 : Ia		Elément I_8 : Ia	
$\begin{cases} f_8=f_{10}; f_8=f_{11} \\ e_{10}-e_8-e_{11}=0 \end{cases}$	**(III.16)**	$\begin{cases} e_8=\Phi_{I_8}\left[s\left\{(1-z_2)*f_8+z_2*Df_2\right\}\right] \\ f_8=\frac{1}{s}*(1-z_2)*\Phi_{I_8}^{-1}*(e_8)+z_2*Df_2 \end{cases}$	**(III.17)**

Jonction 0 : Ra

$$\begin{cases} e_{13}=e_{11}; e_{13}=e_3 \\ f_{11}-f_{13}-f_3=0 \end{cases} \quad \textbf{(III.18)}$$

Elément R_{13} : Ra

$$\begin{cases} e_{13}=\Phi_{R_{13}}*(1-y_2)*f_{13}+y_2*D_{e_2} \\ f_{13}=(1-y_2)*\Phi_{R_{13}}^{-1}*(e_{13})+\Phi_{R_{13}}^{-1}*y_2*D_{e_2} \end{cases} \quad \textbf{(III.19)}$$

Jonction 0 : f

$$\begin{cases} e_6=e_2; e_6=e_{12} \\ f_2-f_6-f_{12}=0 \end{cases} \quad \textbf{(III.20)}$$

Elément R_6 : f

$$\begin{cases} e_6=\Phi_{R_6}*(1-y_3)*f_6+y_3*D_{e_3} \\ f_6=(1-y_3)*\Phi_{R_6}^{-1}*(e_6)+\Phi_{R_6}^{-1}*y_3*D_{e_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.21)}$$

Jonction 1 : J

$$\begin{cases} f_9=f_{12}; f_9=f_4 \\ e_{12}+e_4-e_9=0 \\ e_4=Se_2 \end{cases} \quad \textbf{(III.22)}$$

Elément I_9 : J

$$\begin{cases} e_9=\Phi_{I_9}\left[s\left\{(1-z_3)*f_9+z_3*D_{f_3}\right\}\right] \\ f_9=\frac{1}{s}*(1-z_3)*\Phi_{I_9}^{-1}*(e_9)+z_3*D_{f_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.23)}$$

Gyrateur GY : r

$$\begin{cases} f_2=r^{-1}*e_3 \\ f_3=r^{-1}*e_2 \end{cases} \quad \textbf{(III.24)}$$

A partir des équations de jonctions, on abouti au système d'équation suivant :

$$\begin{cases} r_1: e_1-e_7-e_{14}=0 \\ r_1: s e_1-\Phi_{I_7}\left[s\left\{(1-z_1)*f_7+z_1*D_{f_1}\right\}\right]-\Phi_{R_5}*(1-y_1)*f_5-y_1*D_{e_1}=0 \end{cases} \quad \textbf{(III.25)}$$

$$\begin{cases} r_2: f_{14}-f_5-f_{10}=0 \\ r_2: \frac{1}{s}*(1-z_1)*\Phi_{I_7}^{-1}*(e_7)+z_1*D_{f_1}-(1-y_1)*\Phi_{R_5}^{-1}*(e_5)-\Phi_{R_5}^{-1}*y_1*D_{e_1}-\frac{1}{s}*(1-z_2)*\Phi_{I_8}^{-1}*(e_8)-z_2*D_{f_2}=0 \end{cases} \quad \textbf{(III.26)}$$

$$\begin{cases} r_3: e_{10}-e_8-e_{11}=0 \\ r_3: \Phi_{R_5}*(1-y_1)*f_5+y_1*D_{e_1}-\Phi_{I_8}\left[s\left\{(1-z_2)*f_8+z_2*D_{f_2}\right\}\right]-\Phi_{R_{13}}*(1-y_2)*f_{13}-y_2*D_{e_2}=0 \end{cases} \quad \textbf{(III.27)}$$

$$\begin{cases} r_4: f_{11}-f_{13}-f_3=0 \\ r_4: \frac{1}{s}*(1-z_2)*\Phi_{I_8}^{-1}*(e_8)+z_2*D_{f_2}-(1-y_2)*\Phi_{R_{13}}^{-1}*(e_{13})-\Phi_{R_{13}}^{-1}*y_2*D_{e_2}-\Phi_{R_6}*(1-y_3)*f_6-y_3*D_{e_3}=0 \end{cases} \quad \textbf{(III.28)}$$

$$\begin{cases} r_5 : f_2 - f_6 - f_{12} = 0 \\ r_5 : r^{-1} * \Phi_{R_{13}} * (1 - y_2) * f_{13} + r^{-1} * y_2 * D_{e_2} - (1 - y_3) * \Phi_{R_6}^{-1} * (e_6) - \Phi_{R_6}^{-1} * y_3 * D_{e_3} - \frac{1}{s} * (1 - z_3) * \Phi_{I_9}^{-1} * (e_9) - z_3 * D_{f_3} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.29)**

$$\begin{cases} r_6 : e_{12} + e_4 - e_9 = 0 \\ r_6 : s_{e_2} + \Phi_{R_6} * (1 - y_3) * f_6 + y_3 * D_{e_3} - \Phi_{I_9} \left[s \left\{ (1 - z_3) * f_9 + z_3 * D_{f_3} \right\} \right] = 0 \end{cases}$$ ..... **(III.30)**

A partir des variables binaires « $y_i (i = 1,2,3)$ et $z_j (j = 1,2,3)$ », nous pouvons déterminer la structure finale du système de surveillance.

Pour simple vérification, si on place un capteur sur chaque jonction, le système doit être obligatoirement surveillable, ce cas correspond à $\left[z_1 y_1 z_2 y_2 y_3 z_3 \right] = \left[111111 \right]$.

$$\left.\begin{array}{l} r_1 : s_{e_1} - \Phi_{I_e} * s * D_{f_1} - D_{e_1} = 0 \\ r_2 : D_{f_1} - \Phi_{R_e}^{-1} * D_{e_1} - D_{f_2} = 0 \\ r_3 : D_{e_1} - \Phi_{I_a} * s * D_{f_2} - D_{e_2} = 0 \\ r_4 : D_{f_2} - \Phi_{R_a}^{-1} * D_{e_2} - r^{-1} * D_{e_3} = 0 \\ r_5 : r^{-1} * D_{e_2} - \Phi_f^{-1} * D_{e_3} - D_{f_3} = 0 \\ r_6 : s_{e_2} + D_{e_3} - \Phi_J * s * D_{f_3} = 0 \end{array}\right\}$$ ..... **(III.31)**

La matrice de signature des défaillances correspondante est représentée sur le (**Tab.III.1**) :

	$\phi_{I\,e}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Ia}	$\phi_{\mathrm{R}\,a}$	ϕ_f	ϕ_J
r_1	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_2	**0**	**1**	**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 III.1 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $\left[111111 \right]$.

On voie nettement que chaque composant est détectable et localisable ce qui nous conduit à dire que tout le système est surveillable par ce placement de capteurs.

Dans ce qui suit nous cherchons le cas optimal c'est-à-dire nous utilisons le moins possible de capteurs pour réaliser une surveillance globale du système.

Pour $\left[z_1 y_1 z_2 y_2 y_3 z_3 \right] = [101111]$, cette combinaison signifie que nous n'avons pas placé un capteur sur la jonction « 0_{Re} », et les résultats de ce placement sont représentés par le système d'équations (**III.32**).

$$\left.\begin{aligned}
&r_1 : s_{e_1} - \Phi_{I_e} * s * D_{f_1} - \Phi_{R_e} * (D_{f_1} - D_{f_2}) = 0 \\
&r_3 : \Phi_{R_e} * (D_{f_1} - D_{f_2}) - \Phi_{I_a} * s * D_{f_2} - D_{e_2} = 0 \\
&r_4 : D_{f_2} - \Phi_{R_a}^{-1} * D_{e_2} - r^{-1} * D_{e_3} = 0 \\
&r_5 : r^{-1} * D_{e_2} - \Phi_f^{-1} * D_{e_3} - D_{f_3} = 0 \\
&r_6 : s_{e_2} + D_{e_3} - \Phi_J * s * D_{f_3} = 0
\end{aligned}\right\} \quad \text{..... (III.32)}$$

La matrice de signature des défaillances correspondante est représentée par le (**Tab.III.2**) :

	$\phi_{I\,\mathrm{e}}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Ia}	$\phi_{\mathrm{R}\,a}$	ϕ_f	ϕ_J
r_1	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_3	**0**	**1**	**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 III.2 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[101111]$.

Les signatures de défauts sont différentes et ne sont pas nulles, ce qui signifie que tous les composants sont détectables et localisables donc le système est surveillable.

Pour $\left[z_1 y_1 z_2 y_2 y_3 z_3 \right] = [101011]$, cette combinaison signifie que deux capteurs n'ont pas été placés sur la jonction « 0_{Re} » et sur « 0_{Ra} », et les résultats de ce placement sont représentés par le système d'équations (**III.33**).

$$\left.\begin{aligned} &r_1 : s e_1 - \Phi I_e * s * D f_1 - \Phi R_e * (D f_1 - D f_2) = 0 \\ &r_3 : \Phi R_e * (D f_1 - D f_2) - \Phi I_a * s * D f_2 - \Phi R_a * (D f_2 - r^{-1} * D e_3) = 0 \\ &r_5 : r^{-1} * \Phi R_a * (D f_2 - r^{-1} * D e_3) - \Phi f^{-1} * D e_3 - D f_3 = 0 \\ &r_6 : s e_2 + D e_3 - \Phi J * s * D f_3 = 0 \end{aligned}\right\} \quad \text{..... (III.33)}$$

La matrice de signature des défaillances correspondante est représentée par le (**Tab.III.3**) :

	$\phi_{I\,e}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Ia}	$\phi_{R\,a}$	ϕ_f	ϕ_J
r_1	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_3	**0**	**1**	**1**	**1**	**0**	**0**
r_5	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**
r_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**

Tableau III.3 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[101011]$.

Les signatures de défauts sont différentes et ne sont pas nulles, ce qui signifie que tous les composants sont détectables et localisables, donc le système est surveillable.

On essaie de surveiller notre système par trois capteurs, le placement est donné par la combinaison $\left[z_1 y_1 z_2 y_2 y_3 z_3 \right] = [101010]$, et voici les RRAs correspondantes :

$$\left.\begin{aligned} &r_1 : s e_1 - \Phi I_e * s * D f_1 - \Phi R_e * (D f_1 - D f_2) = 0 \\ &r_3 : \Phi R_e * (D f_1 - D f_2) - \Phi I_a * s * D f_2 - \Phi R_a * (D f_2 - r^{-1} * D e_3) = 0 \\ &r_5 : r^{-1} * \Phi R_a * (D f_2 - r^{-1} * D e_3) - \Phi f^{-1} * D e_3 - \frac{1}{s} * \Phi J^{-1} * (S e_2 + D e_3) = 0 \end{aligned}\right\} \quad \text{..... (III.34)}$$

La matrice de signature des défaillances correspondante est donnée par le tableau suivant :

	$\phi_{I\,e}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Ia}	$\phi_{R\,a}$	ϕ_f	ϕ_J
r_1	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_3	**0**	**1**	**1**	**1**	**0**	**0**
r_5	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**1**

Tableau III.4 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[101010]$.

Les signatures de défauts de « ϕ_J et ϕ_f » sont les mêmes et ne sont pas nulles, ce qui signifie que le défaut de ces deux éléments est détectable mais non localisable, ce qui nous emmène à dire que le système n'est pas surveillable.

Le tableau suivant résume tous les résultats de placement de capteurs pour différentes combinaisons.

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

Tableau III.5 : Signature des différentes combinaisons.

On remarque sur le tableau précédent, que le cas optimal pour la surveillance de notre moteur est avec quatre capteurs, mais trois combinaisons sont possibles pour le placement de ces capteurs.

Notre choix est porté sur le placement donné par la combinaison $[101011]$, car les RRAs correspondantes sont simples et faciles à représenter.

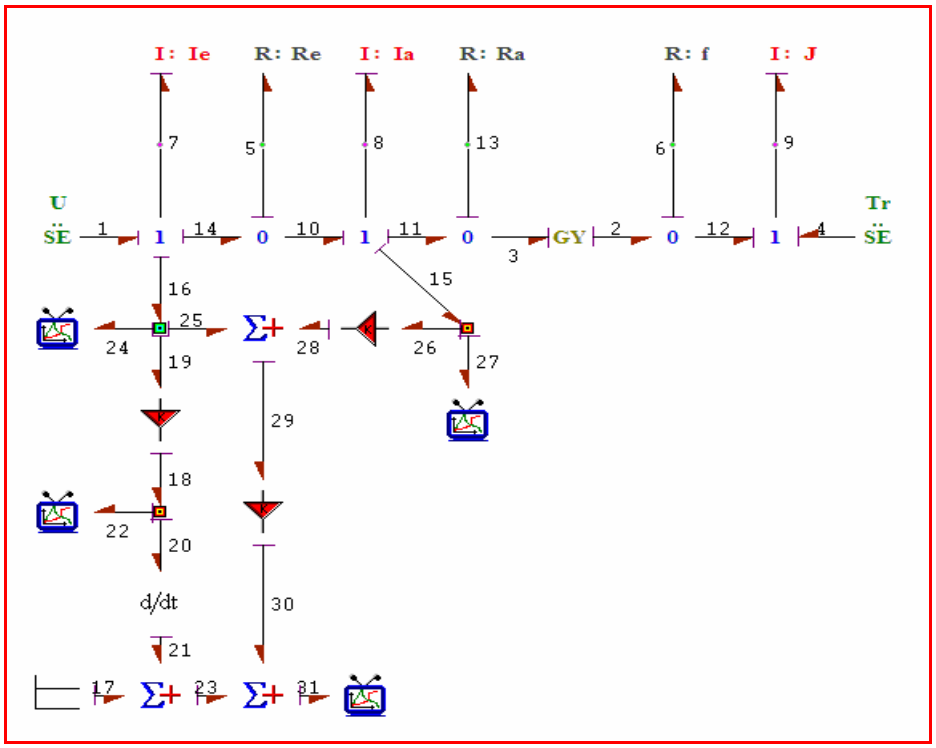


Figure III.5 : Modèle bond graph du résidu « r_1 ».

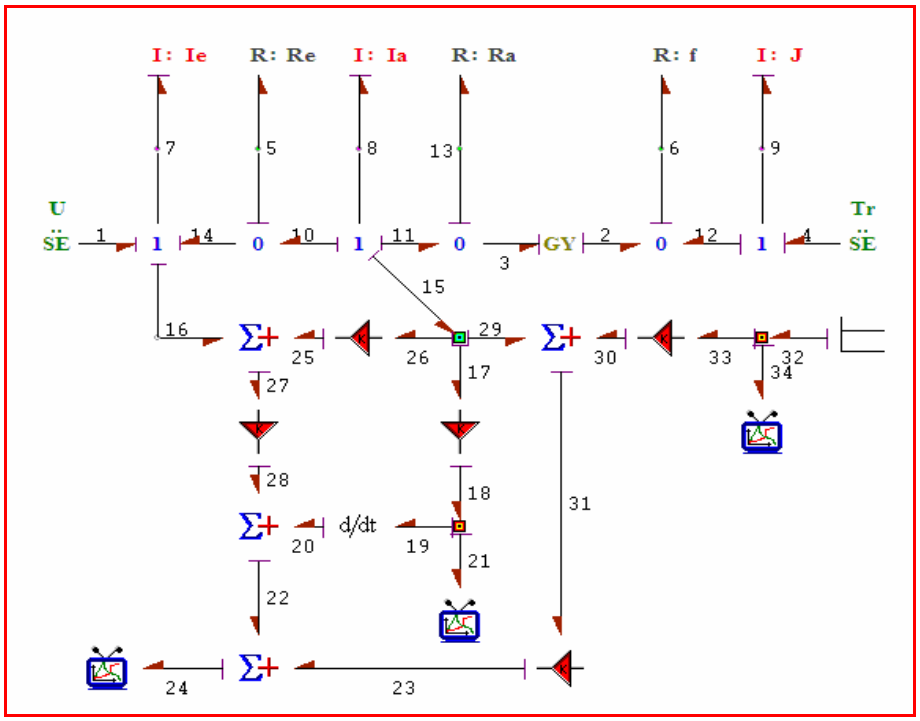


Figure III.6 : Modèle bond graph du résidu « r_3 ».

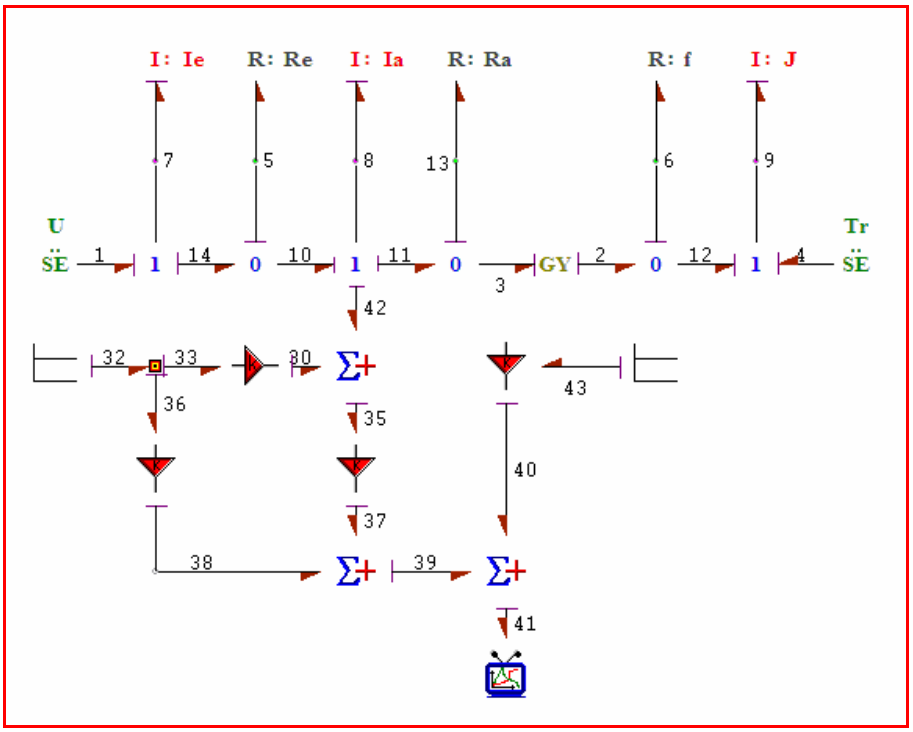


Figure III.7 : Modèle bond graph du résidu « r_5 ».

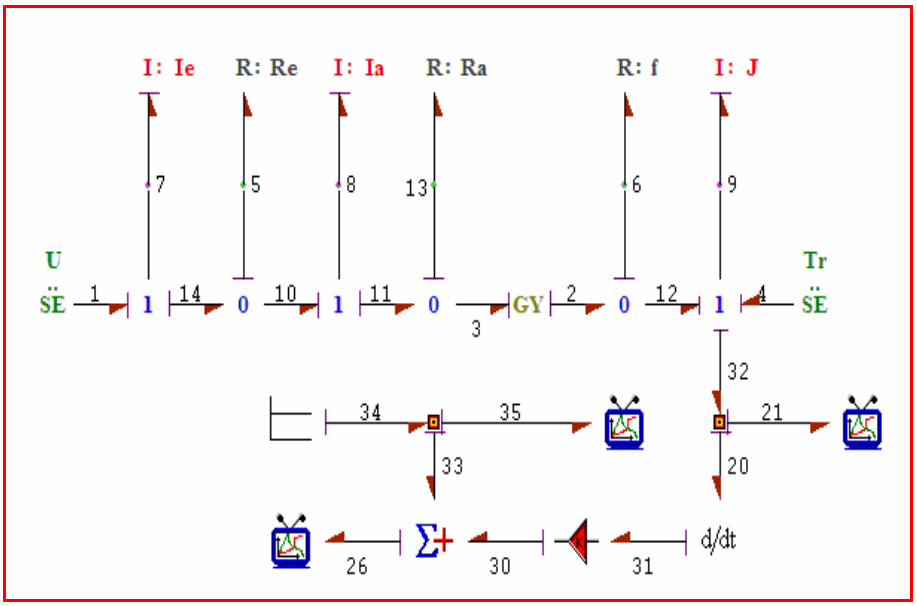


Figure III.8 : Modèle bond graph du résidu « r_6 ».

Remarque : *On n'a pas mis tous les résidus sur la même fenêtre, et cela pour éviter l'encombrement et la mauvaise lecture des résidus.*

A partir de ces modèles de résidus et des paramètres du moteur à excitation série utilisés dans le chapitre précédent, on obtient les simulations représentées par la (**fig.III.9**).

Dans ce cas aucun défaut n'est injecté, donc le système fonctionne normalement.

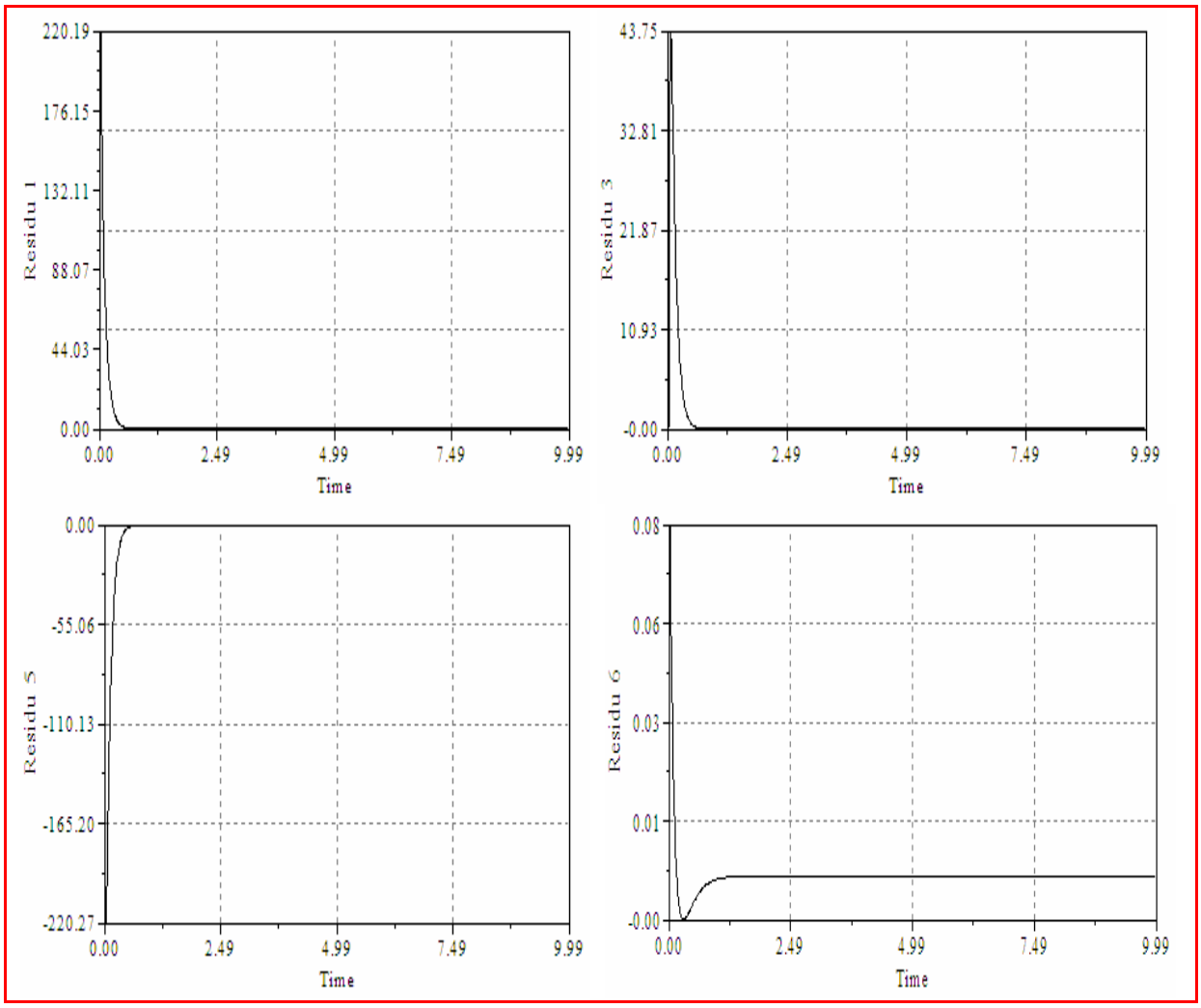


Figure III.9 : Réponses des résidus sans défauts.

Tous les résidus tendent vers zéro à la fin, ce qui représente le bon fonctionnement du moteur modélisé.

III.6.1.1. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Re »

La (**fig.III.10)** montre la réponse des résidus à ce défaut. On constate que les résidus r_1 et r_3 répondent clairement au défaut produit par l'élément « *Re* », et présente une déviation par rapport à son état initial entre les instants t = 5s et t = 7s et retournent à leur état initial après un court changement, un faible pic est apparu dans le résidu r_5 à cause de la forte perturbation du flux due à la variation de « *Re* », par contre le résidu r_6 ne répond pas à ce défaut. Si on se réfère à la signature du composant « *Re* » donnée au (**Tab.III.3**), on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu; c'est à dire qu'en cas de défaillance du composant « *Re* » seul les résidus r_1 et r_3 seront sensibles à ce défaut.

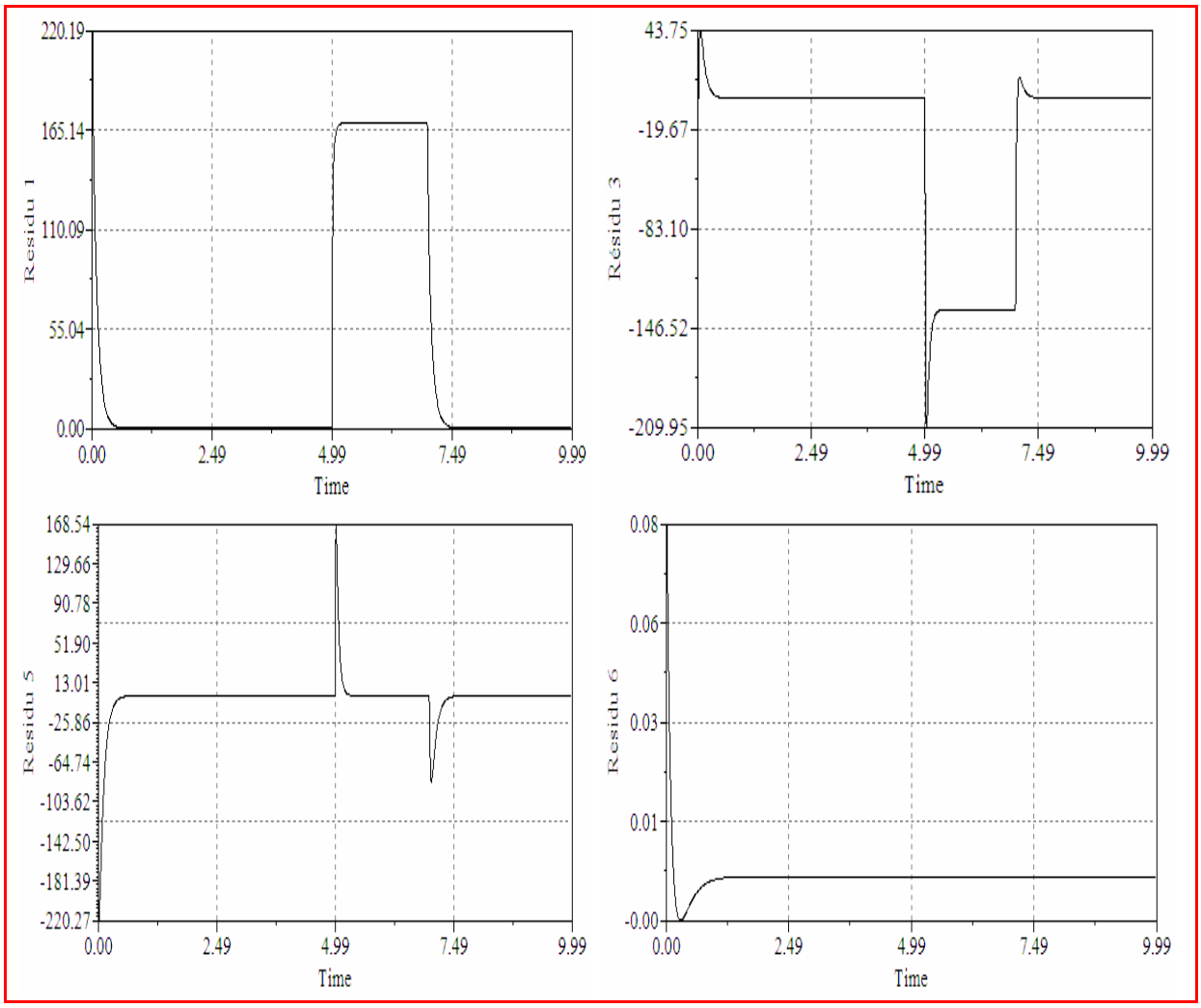


Figure III.10 : Réponses des résidus au défaut de Re.

III.6.1.2. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Ie »

La réponse des résidus à ce défaut est montrée par la (**fig.III.11)**. On constate que le résidu r_1 répond clairement au défaut produit par l'élément « *Ie* », 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_3 répond faiblement à ce défaut à cause de la présence de « Df_1 » dans l'équation de ce résidu, par contre les résidus r_5 et r_6 ne répondent pas à ce défaut. Si on se réfère à la signature du composant « *Ie* » donnée au (**Tab.III.3**), on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu où seul le résidu r_1 sera sensible à la défaillance du composant « *Ie* ».

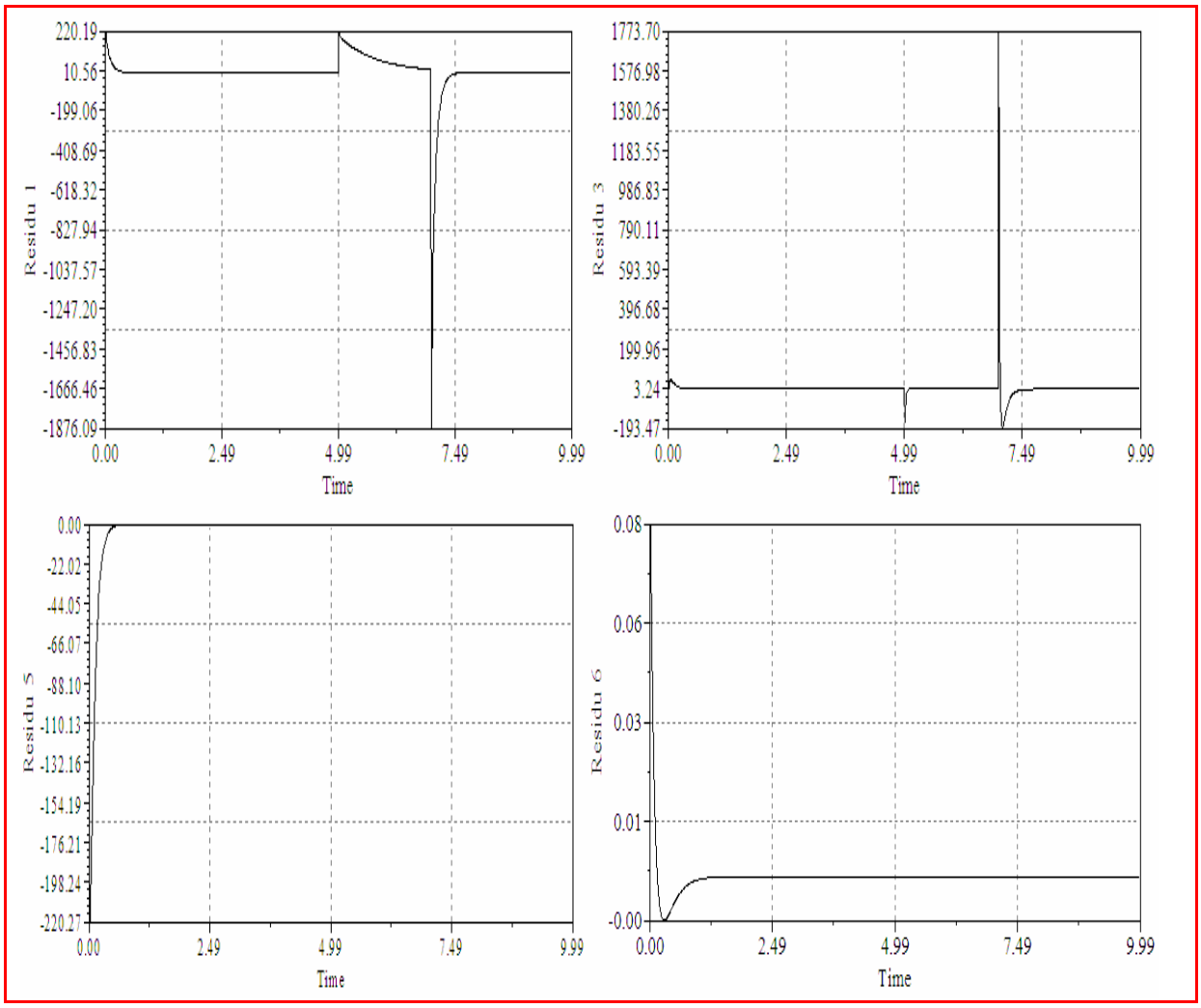


Figure III.11 : Réponses des résidus au défaut de Ie.

III.6.1.3. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Ra »

Les résultats de la (**fig.III.12**) montre la réponse des résidus au défaut de l'élément « *Ra* ». On voie clairement que les résidus r_1 et r_6 ne répondent pas à la défaillance de l'élément « *Ra* », par contre ce qui est évident est que r_3 et r_5 sont sensibles à cette défaillance « *Ra* apparaît dans les équations de ces deux résidus » et manifeste par une déviation inversée l'un de l'autre par rapport à son état initial entre les instants t = 5s et t = 7s « *temps de présence du défaut* » et puis retournent à leur état initial ce qui signifie la fin du défaut. En se référant à la signature du composant « *Ra* » donnée au (**Tab.III.3**). On peut affirmer que ces résultats (**fig.III.12**) sont conformes au cahier des charges. En cas de défaillance de l'élément « *Ra* » seul les résidus r_3 et r_5 seront sensibles.

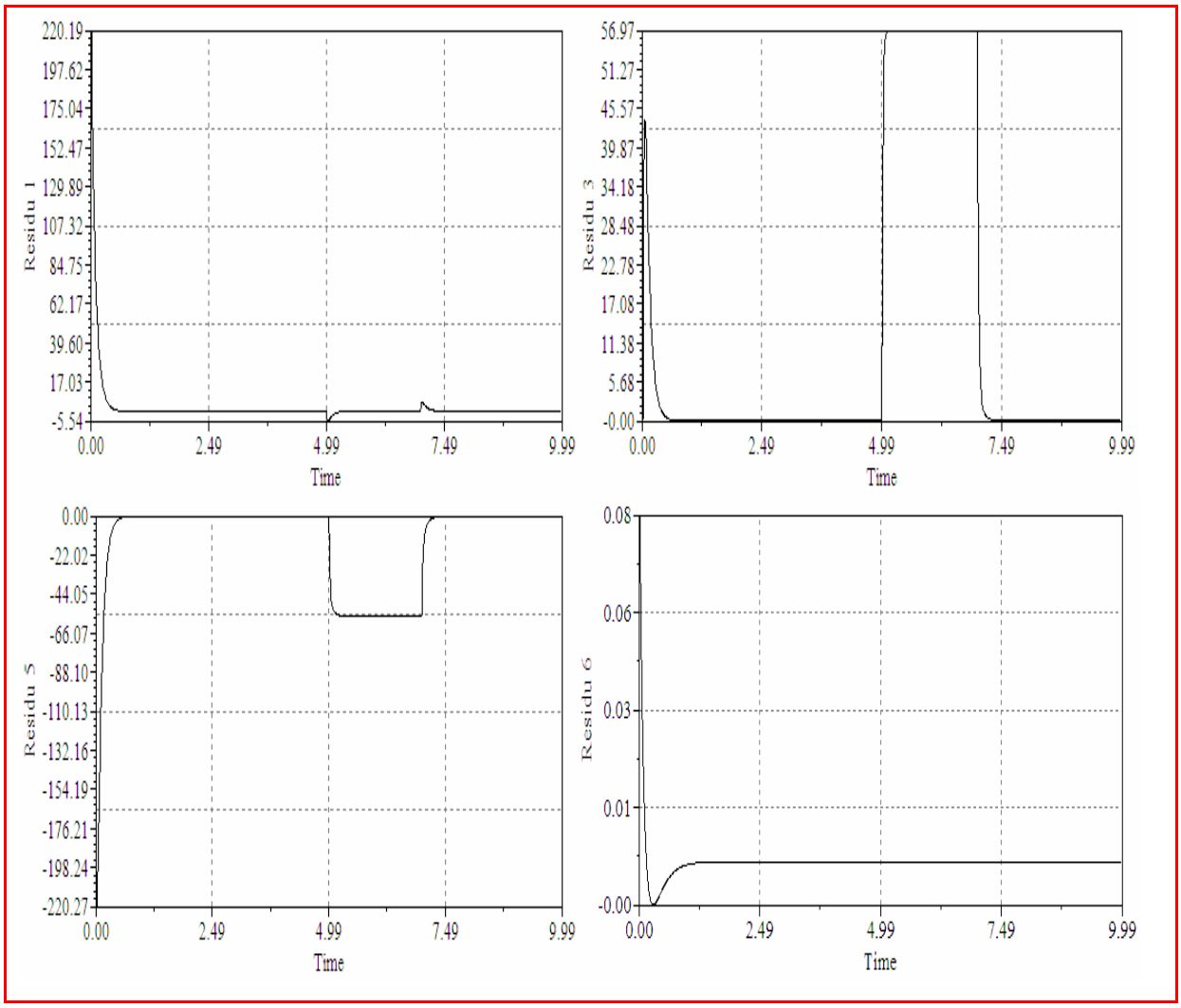


Figure III.12 : Réponses des résidus au défaut de Ra.

III.6.1.4. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Ia »

La (**fig.III.13**) montre la réponse des résidus à ce défaut. On remarque que là où il y a le « Df_2 » dans les équations des résidus dans le système (**III.32**) ce résidu répond à la défaillance de l'élément « *Ia* », donc r_1, r_3 et r_5 répondent au défaut produit par l'élément « *Ia* », et présentent deux pics entre les instants t = 5s et t = 7s et retournent à leur état initial après un court changement, le résidu r_6 ne répond pas à ce défaut. Si on se réfère à la signature du composant « *Ia* » donnée au (**Tab.III.3**) et les équations des résidus, on constate que ce résultat est conforme à ce qui est prévu.

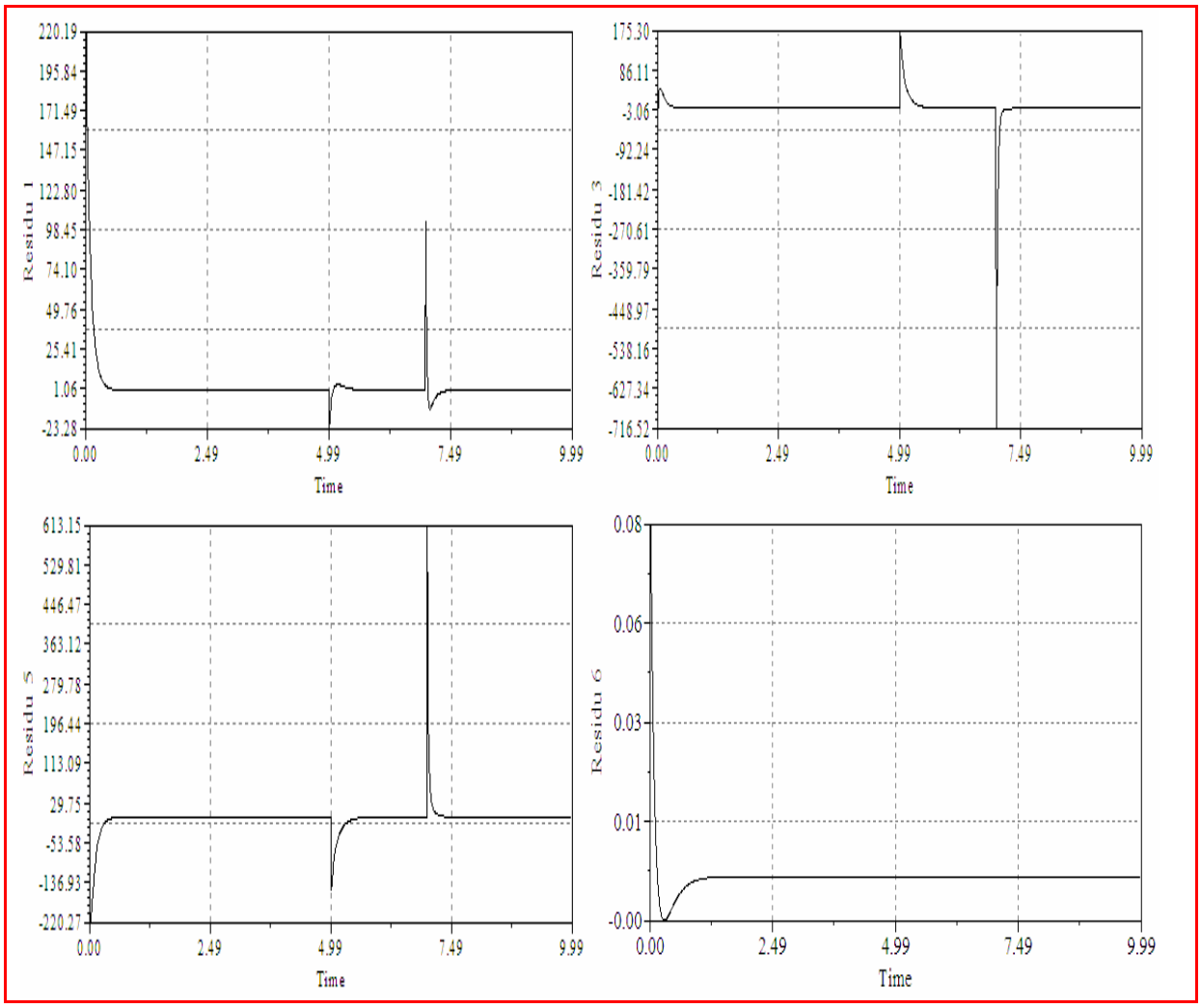


Figure III.13 : Réponses des résidus au défaut de Ia.

III.6.1.5. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « f »

On remarque que les résidus r_3 et r_5 répondent clairement au défaut produit par l'élément « *f* », et présente une déviation par rapport à son état initial entre les instants t = 5s et t = 7s et retournent à leur état initial après un court changement, les résidus r_1 et r_6 ne répondent pas à ce défaut. Si on se réfère à la signature du composant « *f* » donnée au (**Tab.III.3**) et le système d'équations des résidus (**III.32**), on affirme que les résultats donnés sur la (**fig.III.14**) sont conformes à ce qui est prévu; autrement dit, qu'en cas de défaillance du composant « *f* » les résidus r_1 et r_6 ne seront pas sensibles contrairement aux résidu r_5 et r_3 qui répondent clairement à ce défaut.

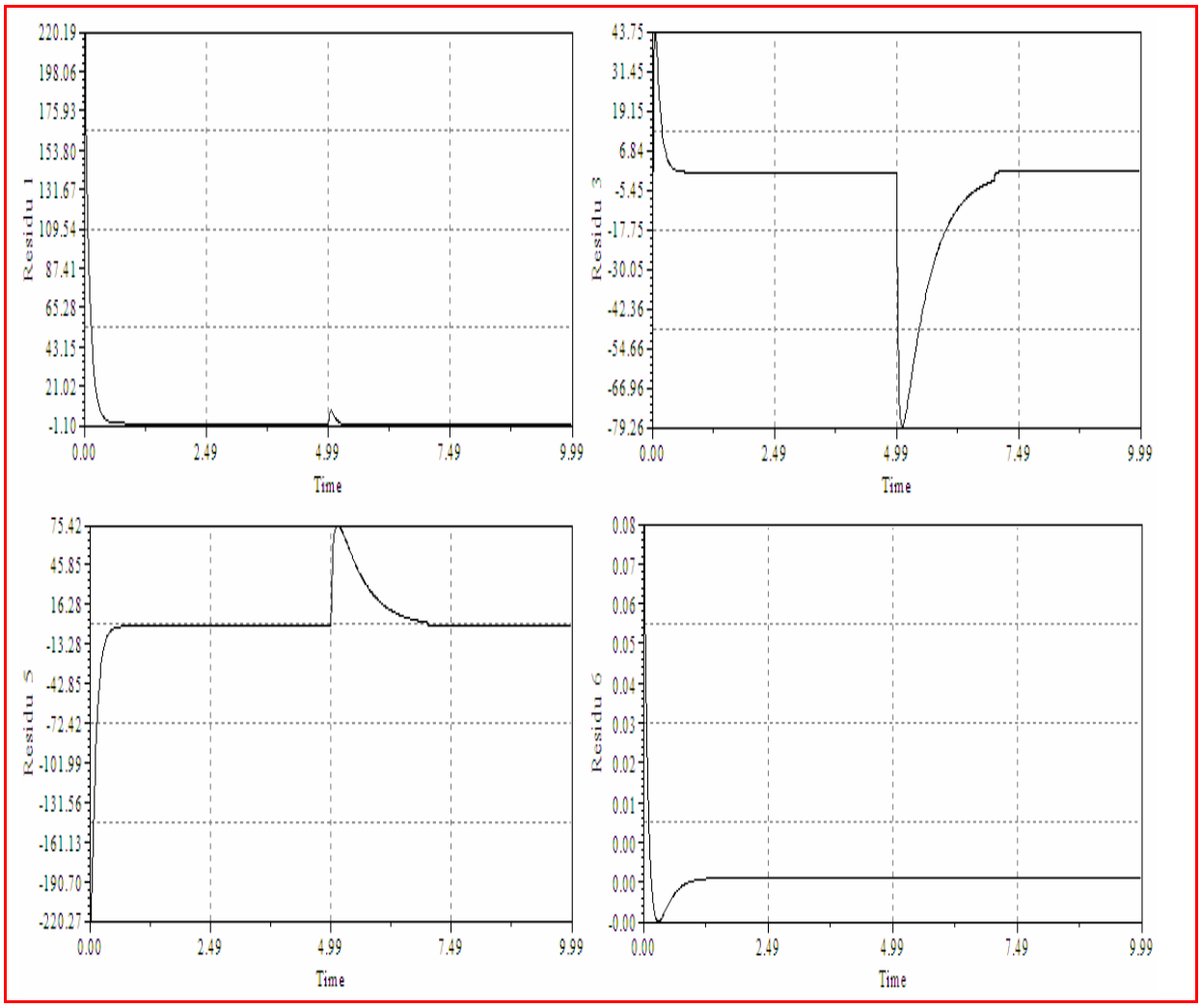


Figure III.14 : Réponses des résidus au défaut de f.

III.6.1.6. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « J »

Dans le système d'équations (**III.32**) des résidus, on remarque que seul le résidu r_6 contient l'élément « *J* », ce qui est remarqué sur le tableau de signature des défaillances (**Tab.III.3**) où on trouve seulement r_6 qui est sensible à la défaillance de « *J* ».

Sur la (**fig.III.15**) on voie clairement que les trois résidus r_1, r_3 et r_5 ne présentent aucun changement pour la défaillance de « *J* », contrairement à r_6 qui présente une déviation par rapport à son état initial lors de la présence du défaut entre les instants t = 5s et t = 7s et retournent à son état initial à la fin du défaut.

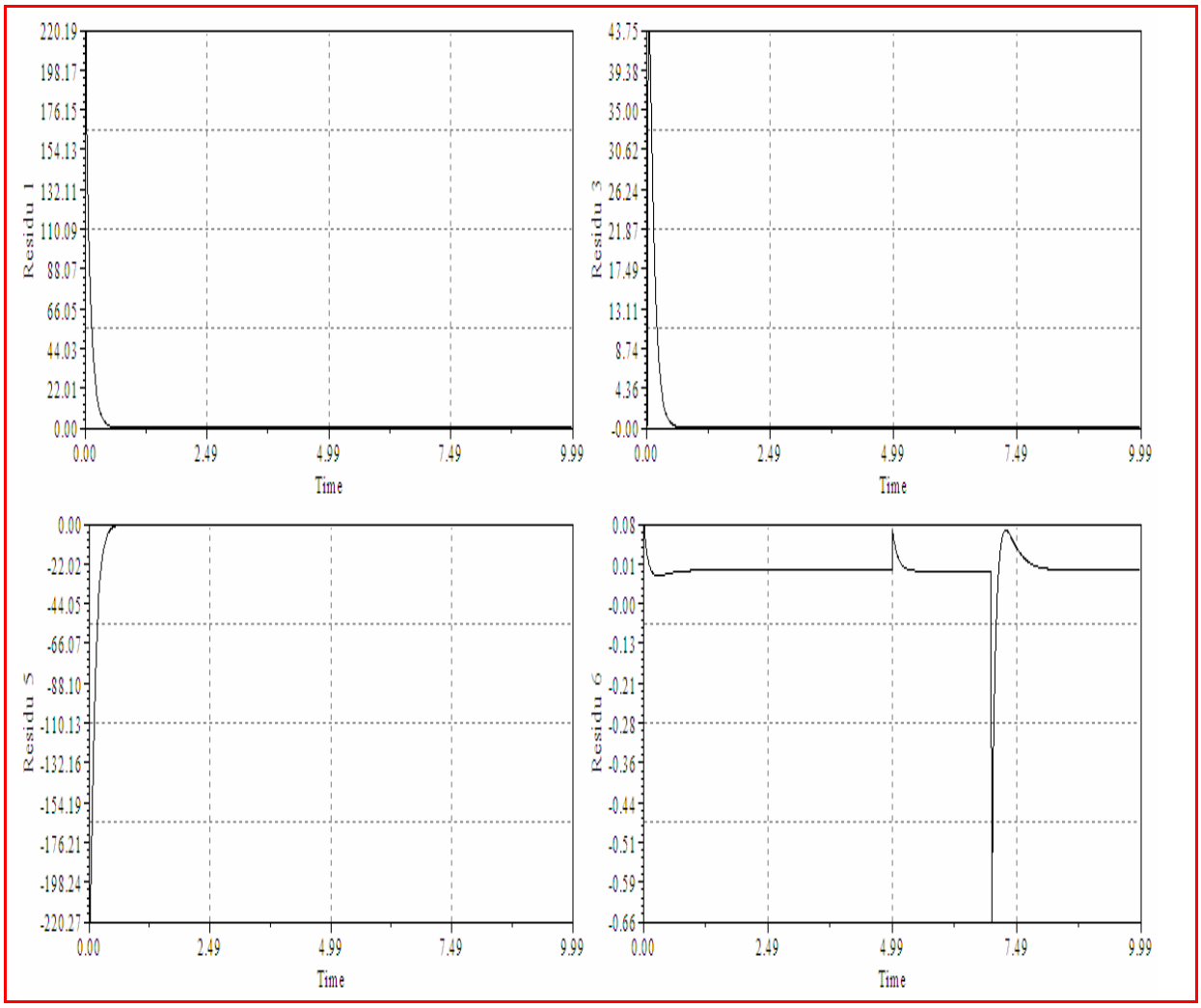


Figure III.15 : Réponses des résidus au défaut de J

III.6.2. Excitation shunte et séparée

On a vue dans le chapitre précédent que le modèle du moteur à courant continu à excitation shunte donne les mêmes résultats que l'excitation séparée, donc pour la raison d'éviter la répétition, on a opté à la représentation d'un seul modèle celui du moteur shunt.

Ce modèle est composé de quatre jonctions 0 « 0_{Re}, 0_{Ra}, 0_f *et 0 pour le shunt* », quatre jonctions 1 « 1_R, 1_{Ie}, 1_{Ia} *et* 1_J », six principaux composants « I_e, R_e, I_a, R_a, J *et* f » et l'élément « R » (voire chapitre précédent), deux sources d'efforts **«** *Se* **».** Le but est d'assurer la surveillance des composants avec le minimum de capteurs. On suppose un placement virtuel des détecteurs « *De et Df* » sur toutes les jonctions et que les capteurs et les sources ne sont pas défaillants. Le modèle bond graph de surveillance du moteur shunt avec des détecteurs virtuels est donné sur la figure suivante :

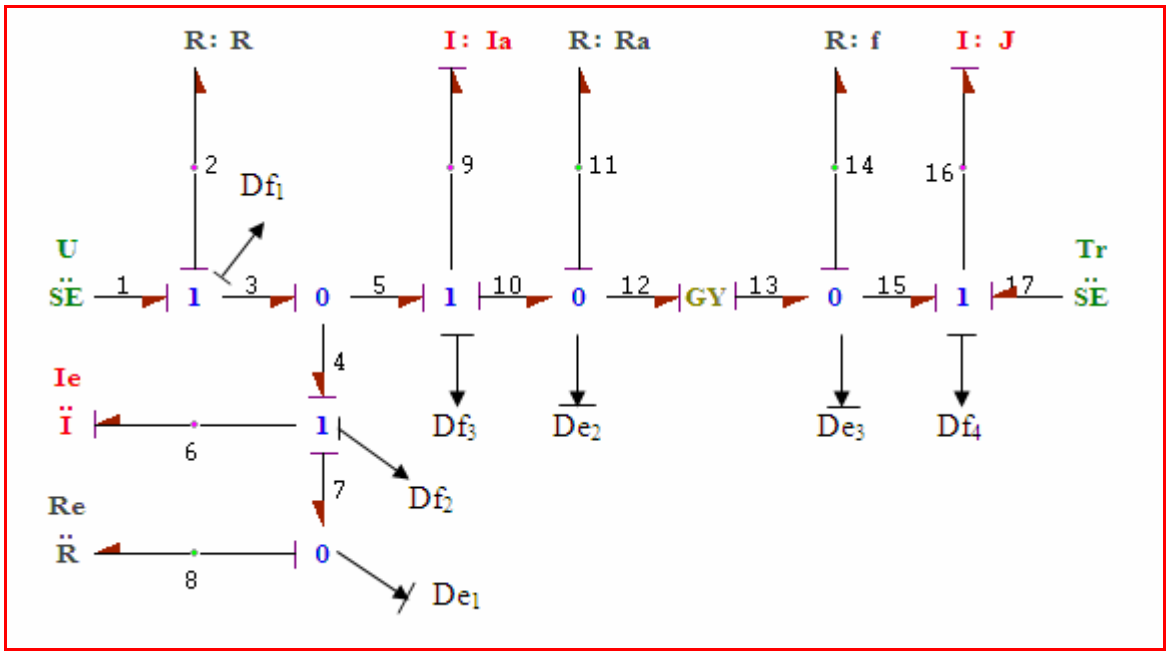


Figure III.16 : Modèle bond graph du MCC Shunt avec des détecteurs virtuels.

L'ensemble des variables connues est :

$$K=\left\{Se_{(U)},Se_{(Tr)},Df_1,De_1,Df_2,De_2,Df_3,De_3,Df_4\right\}$$

L'ensemble des variables inconnues est :

$$X=\left\{e_2,f_2,e_6,f_6,e_8,f_8,e_9,f_9,e_{11},f_{11},e_{14},f_{14},e_{16},f_{16}\right\}.$$

Du modèle de la (**fig.III.16**), on peut écrire les équations suivantes :

Lois de structure		**Equations constitutives des éléments**	
Jonction 1 : R		Elément R_2 : R	
$\begin{cases} f_3=f_1;f_3=f_2 \\ e_1-e_2-e_3=0 \\ e_1=Se_1 \end{cases}$	**(III.35)**	$\begin{cases} e_2=\Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2+z_1*Df_1\right] \\ f_2=(1-z_1)*\Phi_{R_2}^{-1}*(e_2)+z_1*Df_1 \end{cases}$	**(III.36)**
Jonction 1 : Ie		Elément I_6 : Ie	
$\begin{cases} f_6=f_4;f_6=f_7 \\ e_4-e_6-e_7=0 \end{cases}$	**(III.37)**	$\begin{cases} e_6=\Phi_{I_6}\left[s\left\{(1-z_2)*f_6+z_2*Df_2\right\}\right] \\ f_6=\frac{1}{s}*(1-z_2)\Phi_{I_6}^{-1}*(e_6)+z_2*Df_2 \end{cases}$	**(III.38)**

Jonction 0 : Re

$$\begin{cases} e_7 = e_8 \\ f_7 - f_8 = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.39)}$$

Elément R_8 : Re

$$\begin{cases} e_8 = \Phi_{R_8} * (1 - y_1) * f_8 + y_1 * D_{e_1} \\ f_8 = (1 - y_1) * \Phi_{R_8}^{-1} * (e_8) + \Phi_{R_8}^{-1} * y_1 * D_{e_1} \end{cases} \quad \textbf{(III.40)}$$

Jonction 1 : Ia

$$\begin{cases} f_9 = f_5 ; f_9 = f_{10} \\ e_5 - e_9 - e_{10} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.41)}$$

Elément I_9 : Ia

$$\begin{cases} e_9 = \Phi_{I_9} \left[s \left\{ (1 - z_3) * f_9 + z_3 * D_{f_3} \right\} \right] \\ f_9 = \frac{1}{s} * (1 - z_3) * \Phi_{I_9}^{-1} * (e_9) + z_3 * D_{f_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.42)}$$

Jonction 0 : Ra

$$\begin{cases} e_{11} = e_{10} ; e_{11} = e_{12} \\ f_{10} - f_{11} - f_{12} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.43)}$$

Elément R_{11} : Ra

$$\begin{cases} e_{11} = \Phi_{R_{11}} * (1 - y_2) * f_{11} + y_2 * D_{e_2} \\ f_{11} = (1 - y_2) * \Phi_{R_{11}}^{-1} * (e_{11}) + \Phi_{R_{11}}^{-1} * y_2 * D_{e_2} \end{cases} \quad \textbf{(III.44)}$$

Jonction 0 : f

$$\begin{cases} e_{14} = e_{13} ; e_{14} = e_{15} \\ f_{13} - f_{14} - f_{15} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.45)}$$

Elément R_{14} : f

$$\begin{cases} e_{14} = \Phi_{R_{14}} * (1 - y_3) * f_{14} + y_3 * D_{e_3} \\ f_{14} = (1 - y_3) * \Phi_{R_{14}}^{-1} * (e_{14}) + \Phi_{R_{14}}^{-1} * y_3 * D_{e_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.46)}$$

Jonction 1 : J

$$\begin{cases} f_{16} = f_{15} ; f_{16} = f_{17} \\ e_{15} + e_{17} - e_{16} = 0 \\ e_{17} = S e_2 \end{cases} \quad \textbf{(III.47)}$$

Elément I_{16} : J

$$\begin{cases} e_{16} = \Phi_{I_{16}} \left[s \left\{ (1 - z_4) * f_{16} + z_4 * D_{f_4} \right\} \right] \\ f_{16} = \frac{1}{s} * (1 - z_4) * \Phi_{I_{16}}^{-1} * (e_{16}) + z_4 * D_{f_4} \end{cases} \quad \textbf{(III.48)}$$

Gyrateur GY : r

$$\begin{cases} f_{13} = r^{-1} * e_{12} \\ f_{12} = r^{-1} * e_{13} \end{cases} \quad \textbf{(III.49)}$$

A partir des lois de structure des jonctions et des équations constitutives des éléments on écrit :

$$\begin{cases} r_1 : e_1 - e_2 - e_3 = 0 \\ r_1 : s_{e_1} - \Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2 + z_1*D_{f_1}\right] - \Phi_{I_6}\left[s\left\{(1-z_2)*f_6 + z_2*D_{f_2}\right\}\right] - \Phi_{R_8}*(1-y_1)*f_8 - y_1*D_{e_1} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.50)**

$$\begin{cases} r_2 : e_4 - e_6 - e_7 = 0 \\ r_2 : s_{e_1} - \Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2 + z_1*D_{f_1}\right] - \Phi_{I_6}\left[s\left\{(1-z_2)*f_6 + z_2*D_{f_2}\right\}\right] - \Phi_{R_8}*(1-y_1)*f_8 - y_1*D_{e_1} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.51)**

$$\begin{cases} r_3 : f_7 - f_8 = 0 \\ r_3 : \frac{1}{s}*(1-z_2)\Phi^{-1}_{I_6}*(e_6) + z_2*D_{f_2} - (1-y_1)*\Phi^{-1}_{R_8}*(e_8) - \Phi^{-1}_{R_8}*y_1*D_{e_1} = 0 \end{cases}$$ ..... **(III.52)**

$$\begin{cases} r_4 : e_5 - e_9 - e_{10} = 0 \\ r_4 : s_{e_1} - \Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2 + z_1*D_{f_1}\right] - \Phi_{I_9}\left[s\left\{(1-z_3)*f_9 + z_3*D_{f_3}\right\}\right] - \Phi_{R_{11}}*(1-y_2)*f_{11} - y_2*D_{e_2} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.53)**

$$\begin{cases} r_5 : f_{10} - f_{11} - f_{12} = 0 \\ r_5 : \frac{1}{s}*(1-z_3)*\Phi^{-1}_{I_9}*(e_9) + z_3*D_{f_3} - (1-y_2)*\Phi^{-1}_{R_{11}}*(e_{11}) - \Phi^{-1}_{R_{11}}*y_2*D_{e_2} - r^{-1}*\Phi_{R_{14}}*(1-y_3)*f_{14} - r^{-1}*y_3*D_{e_3} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.54)**

$$\begin{cases} r_6 : f_{13} - f_{14} - f_{15} = 0 \\ r_6 : r^{-1}*\Phi_{R_{11}}*(1-y_2)*f_{11} + r^{-1}*y_2*D_{e_2} - (1-y_3)*\Phi^{-1}_{R_{14}}*(e_{14}) + \Phi^{-1}_{R_{14}}*y_3*D_{e_3} - \frac{1}{s}*(1-z_4)*\Phi^{-1}_{I_{16}}*(e_{16}) + z_4*D_{f_4} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.55)**

$$\begin{cases} r_7 : e_{15} + e_{17} - e_{16} = 0 \\ r_7 : s_{e_2} + \Phi_{R_{14}}*(1-y_3)*f_{14} + y_3*D_{e_3} - \Phi_{I_{16}}\left[s\left\{(1-z_4)*f_{16} + z_4*D_{f_4}\right\}\right] = 0 \end{cases}$$ ..... **(III.56)**

On suppose qu'un capteur est placé sur chaque jonction, donc on aura:

$$\left.\begin{array}{l} r_1 : s_{e_1} - \Phi_R * D_{f_1} - \Phi_{I_e} * s * D_{f_2} - D_{e_1} = 0 \\ r_2 : s_{e_1} - \Phi_R * D_{f_1} - \Phi_{I_e} * s * D_{f_2} - D_{e_1} = 0 \\ r_3 : D_{f_2} - \Phi_{R_e}^{-1} * D_{e_1} = 0 \\ r_4 : s_{e_1} - \Phi_R * D_{f_1} - \Phi_{I_a} * s * D_{f_3} - D_{e_2} = 0 \\ r_5 : D_{f_3} - \Phi_{R_a}^{-1} * D_{e_2} - r^{-1} * D_{e_3} = 0 \\ r_6 : r^{-1} * D_{e_2} - \Phi_f^{-1} * D_{e_3} - D_{f_4} = 0 \\ r_7 : s_{e_1} + D_{e_3} - \Phi_J * s * D_{f_4} = 0 \end{array}\right\} \quad \text{..... (III.57)}$$

La matrice de signature des défaillances correspondante au système d'équations (**III.57**) obtenu de la combinaison $\left[z_1 z_2 y_1 z_3 y_2 y_3 z_4\right] = [1111111]$ est représentée par le (**Tab.III.6**):

	ϕ_R	$\phi_{I\,e}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Ia}	$\phi_{R\,a}$	ϕ_f	ϕ_J
r_1	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
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 III.6 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[1111111]$.

On voie nettement que chaque composant est détectable et localisable ce qui nous permet de dire que tout le système est surveillable par ce placement de capteurs.

Comme dans le cas du moteur à excitation série, on a traité cas par cas toutes les combinaisons possibles, et les résultats obtenus sont représentés dans le (**Tab.III.7**).

Nombre de capteurs	**Combinaisons possibles**	**Composants surveillés**	**Composants détectables et non localisables**
7	[1111111]	Tous	ϕ
6	[0111111]	Tous	ϕ

6	[1011111]	Tous	ϕ
En plaçant le capteur « Df » sur la jonction « 1_R ou 1_{Ie} » donne le même résultat, donc on élimine un cas «pas de capteur sur la jonction 1_R ou $y_1=0$» dans le reste des calculs.			
5	[0101111]	R, Ra, Ia, f, J	{Re, Ie}
5	[0110111]	Re, Ra, Ia	{R, Ie}, {f, J}
5	[0111011]	Tous	ϕ
5	[0111101]	Tous	ϕ
5	[0111110]	R, Re, Ie, Ra, Ia	{f, J}
4	[0101011]	R, Ie, Ia, f, J	{Re, Ra} *indétectables*
Un élément est indétectable lorsque sa colonne entière est nulle dans la table de signature.			
4	[0101101]	R, Ie, Ra, Ia, J	{Re, f} *indétectables*
4	[0101110]	R, Ie, Ra, Ia, f	{Re, J} *indétectables*
4	[0110101]	Re, Ra, J	{R, Ie}non localisables {Ia, f} *indétectables*
4	[0110110]	Re	{R, Ie}, {Ra, f} {Ia, J} *indétectables*
4	[0111010]	R, Re, Ie, Ia, f	{Ra, J} *indétectables*

Tableau III.7 : Signature des différentes combinaisons.

On remarque sur le tableau précédent, qu'on ne peut surveiller le modèle représenté par la (**fig.III.16**) qu'avec cinq détecteurs, mais deux placements sont possibles $[0111011]$et $[0111101]$. Puisque il n'y a pas une loi qui oblige le choix de combinaison, on a opté pour la combinaison$[0111011]$. Voici dans ce qui suit le système d'équations correspondant :

$$\left.\begin{aligned}
&r_2: s_{e_1} - \Phi_R * (D_{f_2} + D_{f_3}) - \Phi_{I_e} * s * D_{f_2} - D_{e_1} = 0 \\
&r_3: D_{f_2} - \Phi_{R_e}^{-1} * D_{e_1} = 0 \\
&r_4: s_{e_1} - \Phi_R * (D_{f_2} + D_{f_3}) - \Phi_{I_a} * s * D_{f_3} - \Phi_{R_a} * (D_{f_3} - r^{-1} * D_{e_3}) = 0 \\
&r_6: r^{-1} * \Phi_{R_a} * (D_{f_3} - r^{-1} * D_{e_3}) - \Phi_f^{-1} * D_{e_3} - D_{f_4} = 0 \\
&r_7: s_{e_2} + D_{e_3} - \Phi_J * s * D_{f_4} = 0
\end{aligned}\right\} \quad \text{..... (III.58)}$$

La matrice de signature des défaillances des éléments est la suivante :

	ϕ_R	$\phi_{I\,e}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Ia}	$\phi_{\mathrm{R}\,a}$	ϕ_f	ϕ_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 III.8 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[0111011]$

Dans le module « *BondPad* » du logiciel *SYMBOLS2000*, on a traduit les équations mathématiques des résidus en diagramme bloc, notons que les résidus sont représentés séparément.

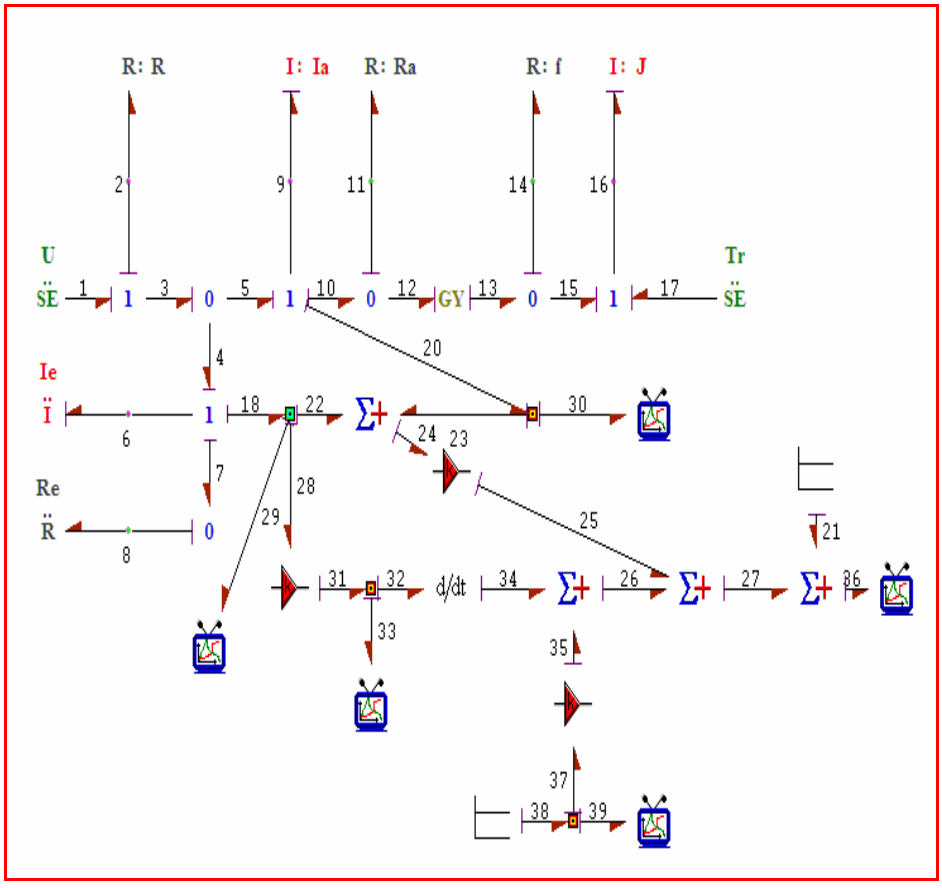


Figure III.17 : Modèle bond graph du résidu « r_2 ».

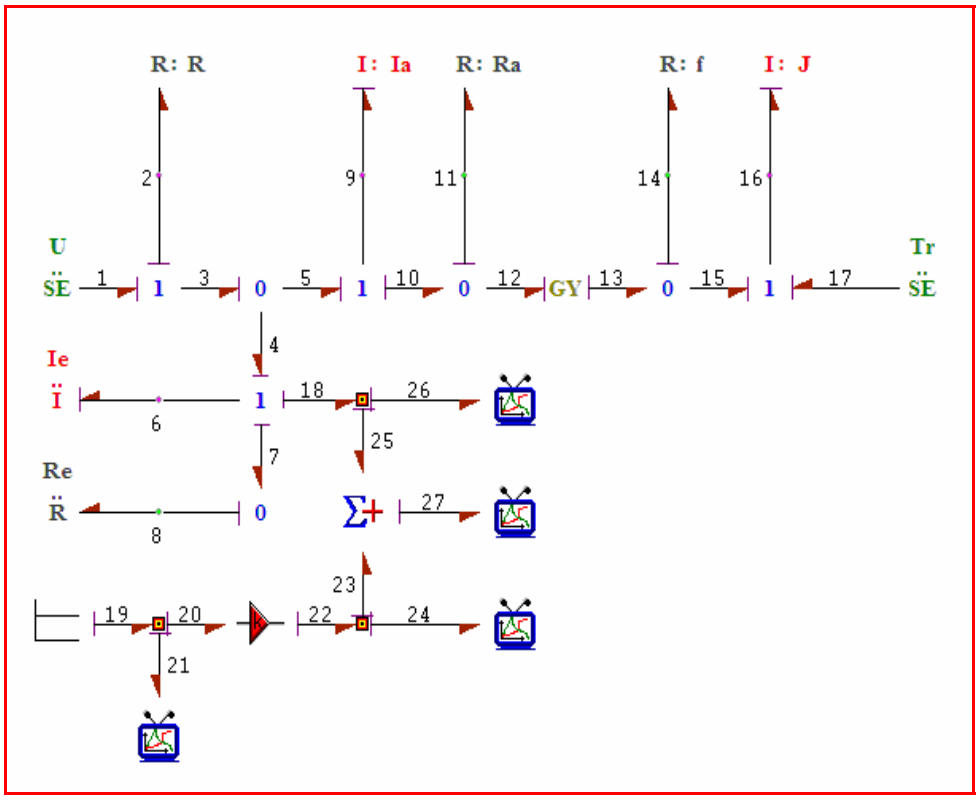


Figure III.18 : Modèle bond graph du résidu « r_3 »

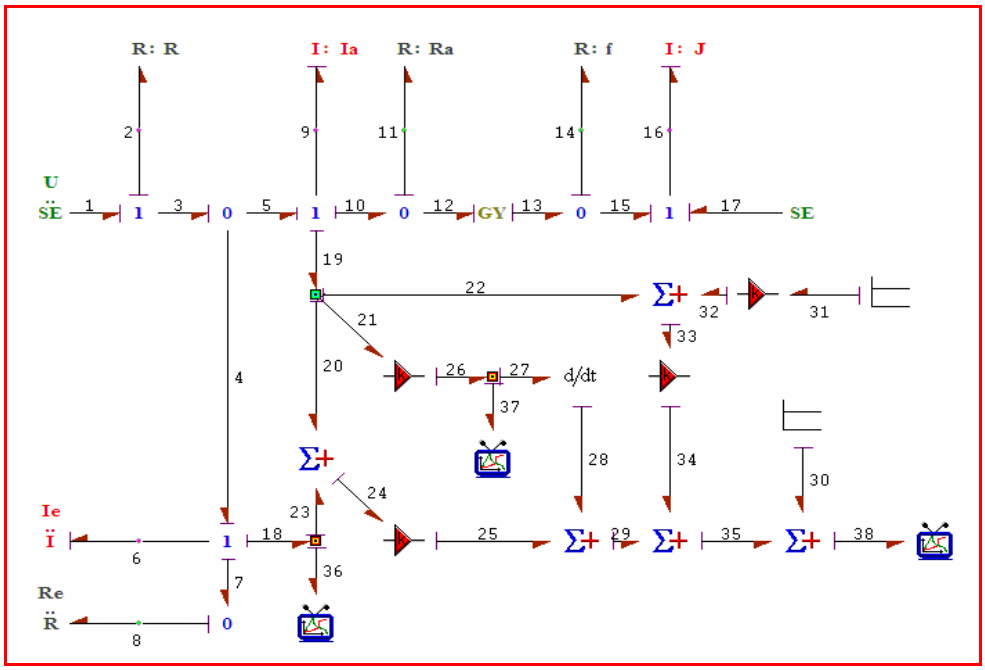


Figure III.19 : Modèle bond graph du résidu « r_4 ».

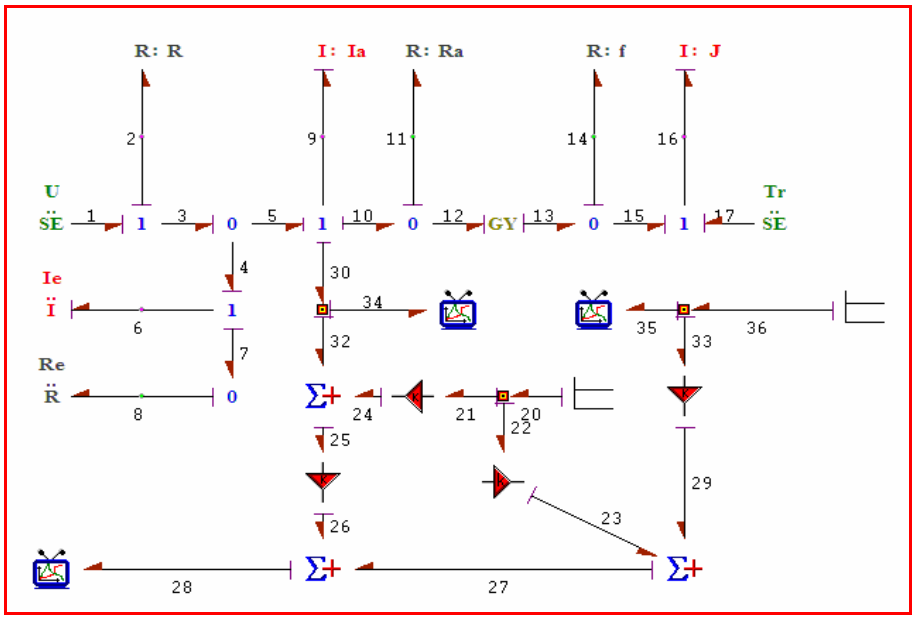


Figure III.20 : Modèle bond graph du résidu « r_6 »

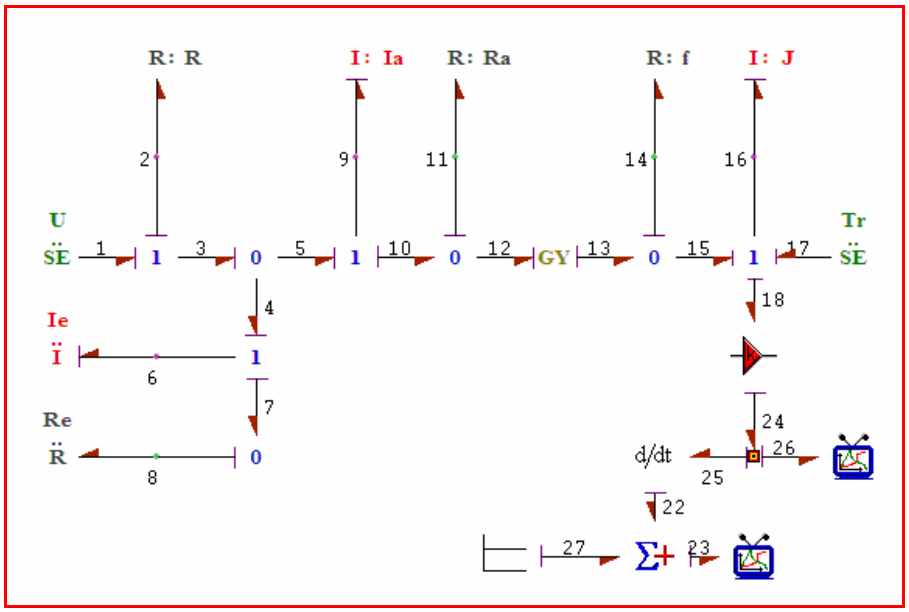


Figure III.21 : Modèle bond graph du résidu « r_7 »

Après la construction des modèles de résidus, on passe à la simulation de ces modèles pour la vérification de la table de signature de défaillances, et cela en utilisant les paramètres du moteur shunt donnés dans le chapitre précédent.

On considère au premier cas, que le moteur est en fonctionnement normal « *sans aucune défaillance* ».

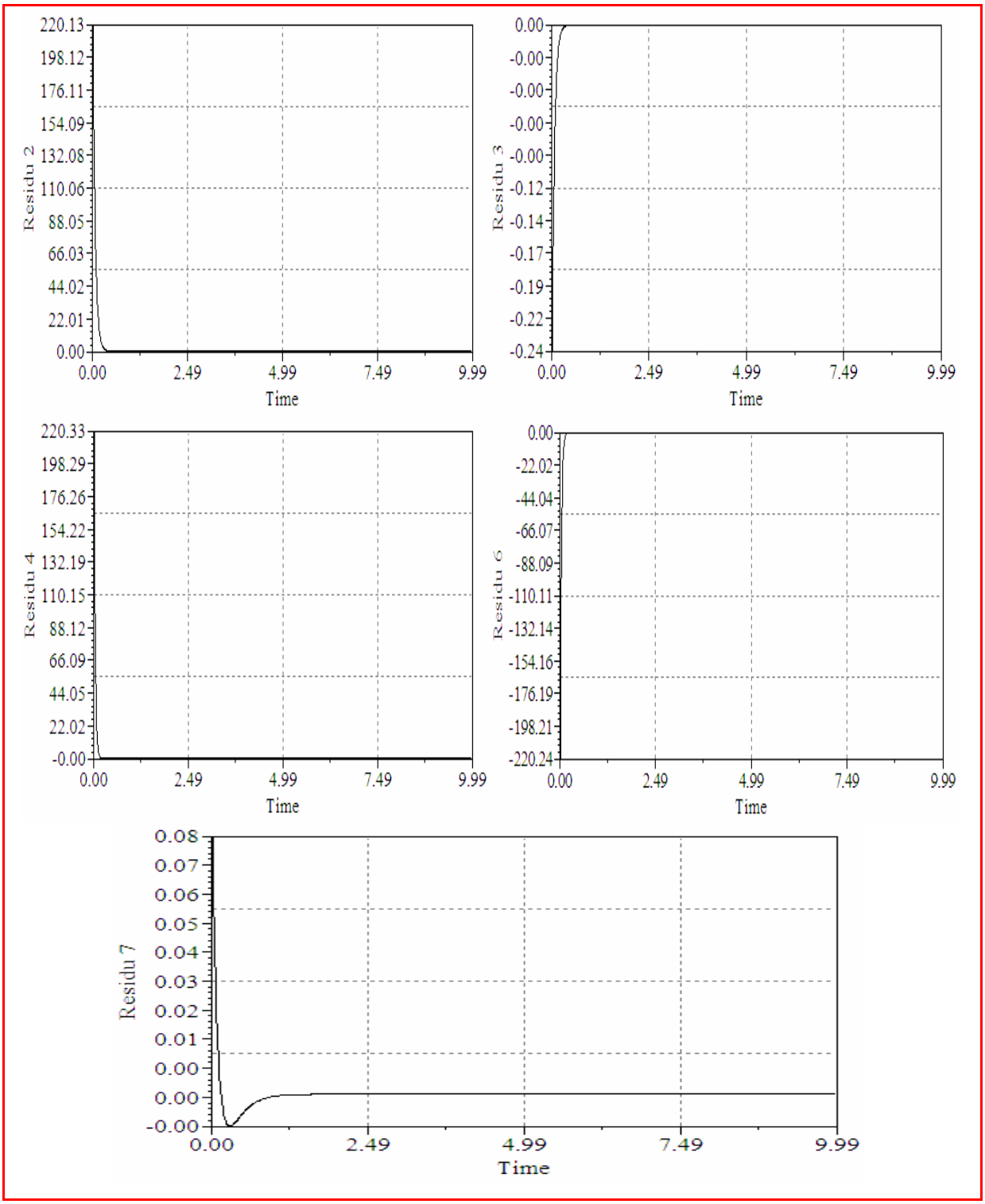


Figure III.22 : Réponses des résidus sans défauts

Tous les résidus tendent vers zéro à la fin, ce qui justifie notre étude théorique.

Pour ne pas trop encombrer le manuscrit par des répétitions inutiles, on ne va pas représenter les défauts de tous les éléments comme dans le cas du moteur série.

III.6.2.1. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Re »

La (**fig.III.23)** montre la réponse des résidus à la défaillance de « *Re* ».

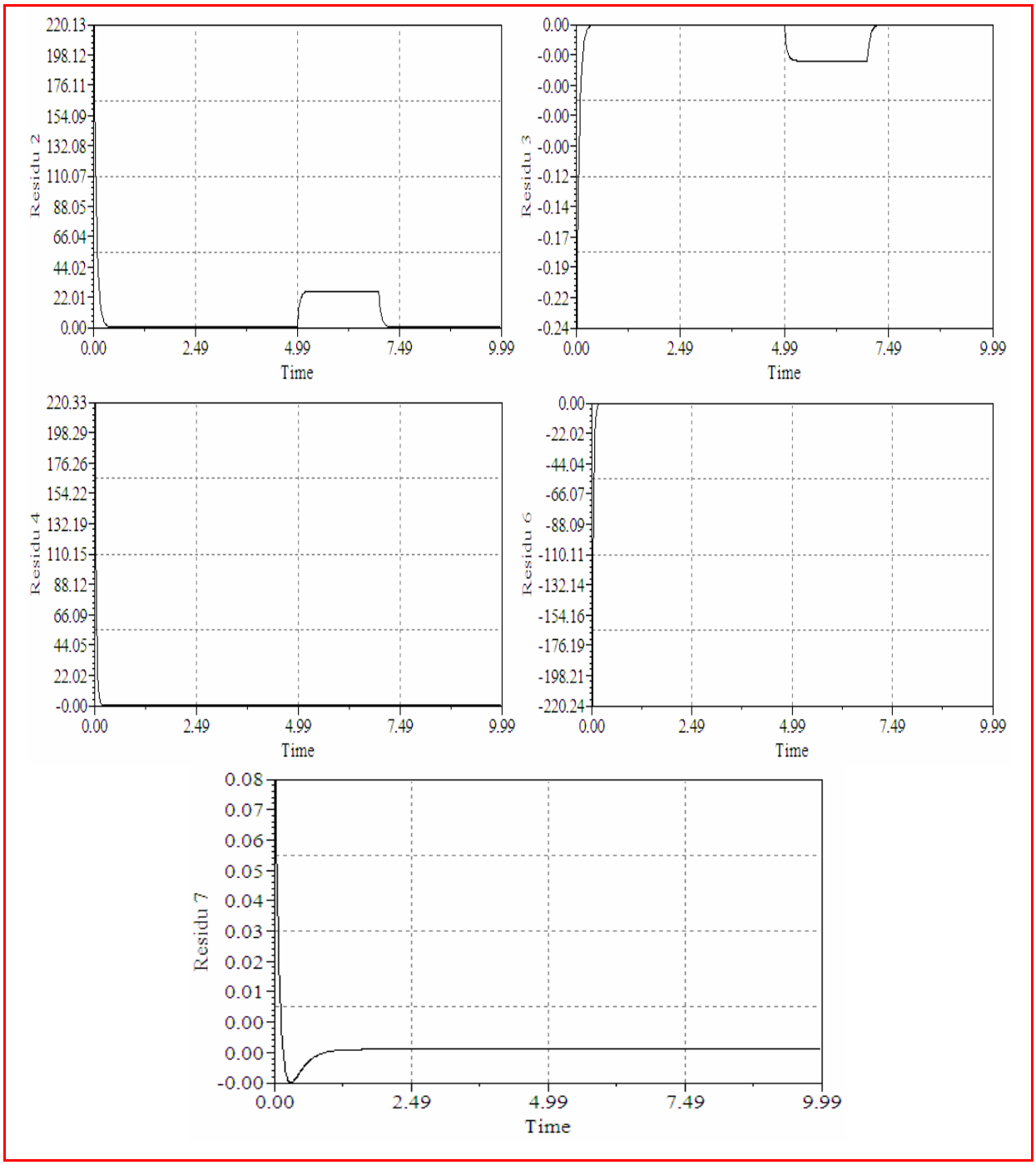


Figure III.23 : Réponses des résidus au défaut de Re.

En remarquant la matrice de signature de défaillances des éléments (**Tab.III.7**), précisément la colonne de « *Re* » on peut prévoir que le résidu r_3 est sensible à la défaillance de cet élément, on le voie nettement sur la figure précédente. Mais sur cette dernière, on voie aussi la réponse du résidu r_2, et cela on peut le justifier par la présence du détecteur « De_1 »

dans l'équation de r_2 du système (**III.58**). Les trois autres résidus ne sont pas sensibles à la défaillance de cet élément et ceci confirme les signatures du tableau (**Tab.III.7**).

III.6.2.2. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Ra »

Sur la (**fig.III.24)** sont groupées les réponses des cinq résidus à la défaillance de « *Ra* ».

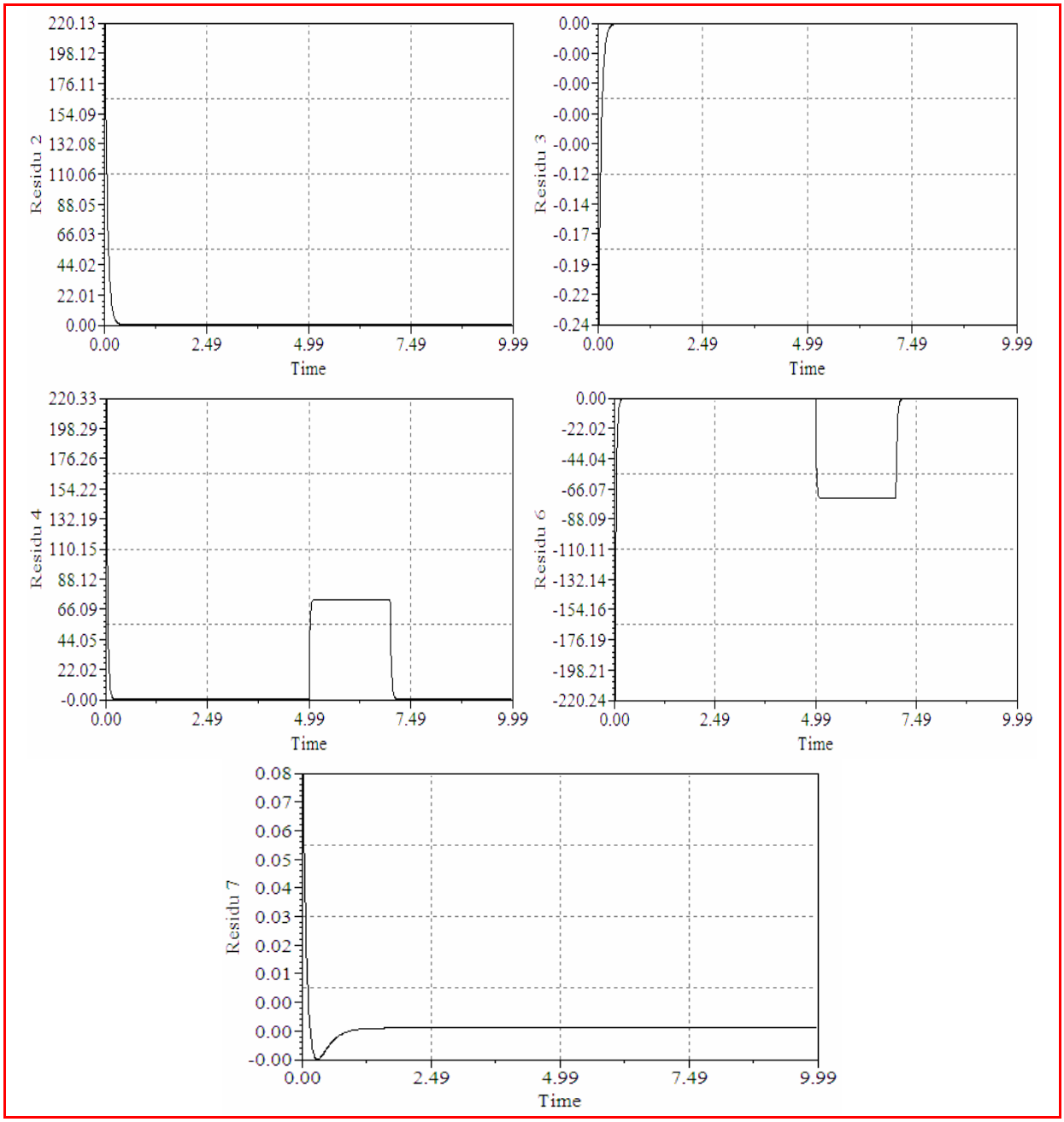


Figure III.24 : Réponses des résidus au défaut de Ra.

Les deux résidus r_4 et r_6 sont seul qui ont répondu à la défaillance de « *Ra* », lors de la présence du défaut les deux résidus tendent vers les valeurs r4= 66.07 et r_6=-66.07, on voie

que la valeur est la même mais de signe opposé. Ce signe provient des équations des résidus $\begin{cases} r_4 : s_{e_1} - \Phi_R * (D_{f_2} + D_{f_3}) - \Phi_{I_a} * s * D_{f_3} - \Phi_{R_a} * (D_{f_3} - r^{-1} * D_{e_3}) = 0 \\ r_6 : r^{-1} * \Phi_{R_a} * (D_{f_3} - r^{-1} * D_{e_3}) - \Phi f^{-1} * D_{e_3} - D_{f_4} = 0 \end{cases}$ où *Ra* est devancée par un signe moins dans l'expression de r_4, par contre dans celle de r_6 *Ra* est devancée par un signe plus.

A la fin de l'injection du défaut, les résidus r4 et r6 reviennent à leurs états initiaux. Les résidus r_2, r_3 et r_7 ne sont pas sensibles à la défaillance de cet élément, en comparent les résultats obtenus (**fig.III.24**) avec la matrice de signature des éléments (**Tab.III.7**) on constate qu'ils sont conformes avec ce qui a été prévu.

III.6.2.3. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « J »

Sur la (**fig.III.25)** est représenté la réponse du r_7 à la défaillance de « J ».

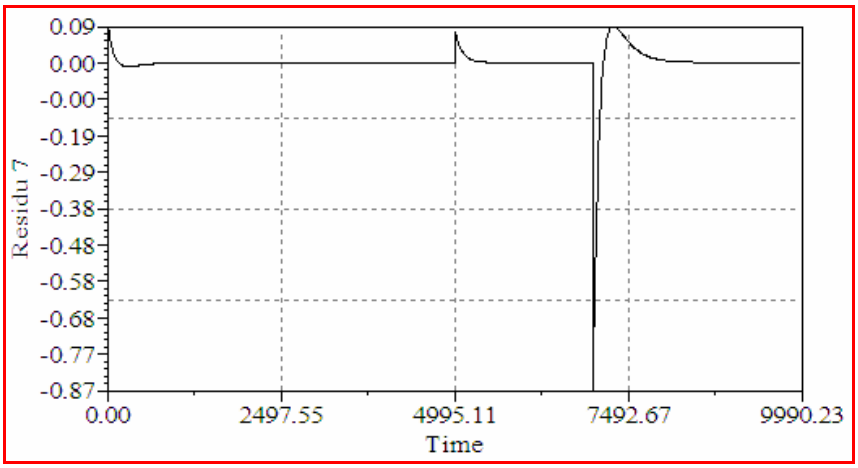


Figure III.25 : Réponses des résidus au défaut de J

On a pas représenté les réponses des autres résidus par ce qu'il ne présente aucune sensibilité en vers la defaillance de « *J* », car l'expression « *J* » n'entre pas dans la construction des équations de ces résidus. D'ailleurs en prenant le tableau (**Tab.III.7**), on peut prévoir ce résultat.

Finalement, on peut affirmer que notre modèle de surveillance, l'application de l'algorithme de surveillance et la combinaison choisie nous a permis la surveillance du moteur à courant continu à excitation shunte ou séparée.

III.6.3. Excitation composée

Pour le cas du moteur à excitation composée, on va vous présenter le modèle de surveillance, les lois de structures des jonctions et les équations constitutives des éléments, les signatures des defaillance de toutes les combinaisons ainsi que les modèles des résidus et à la fin on traitera un seul défaut.

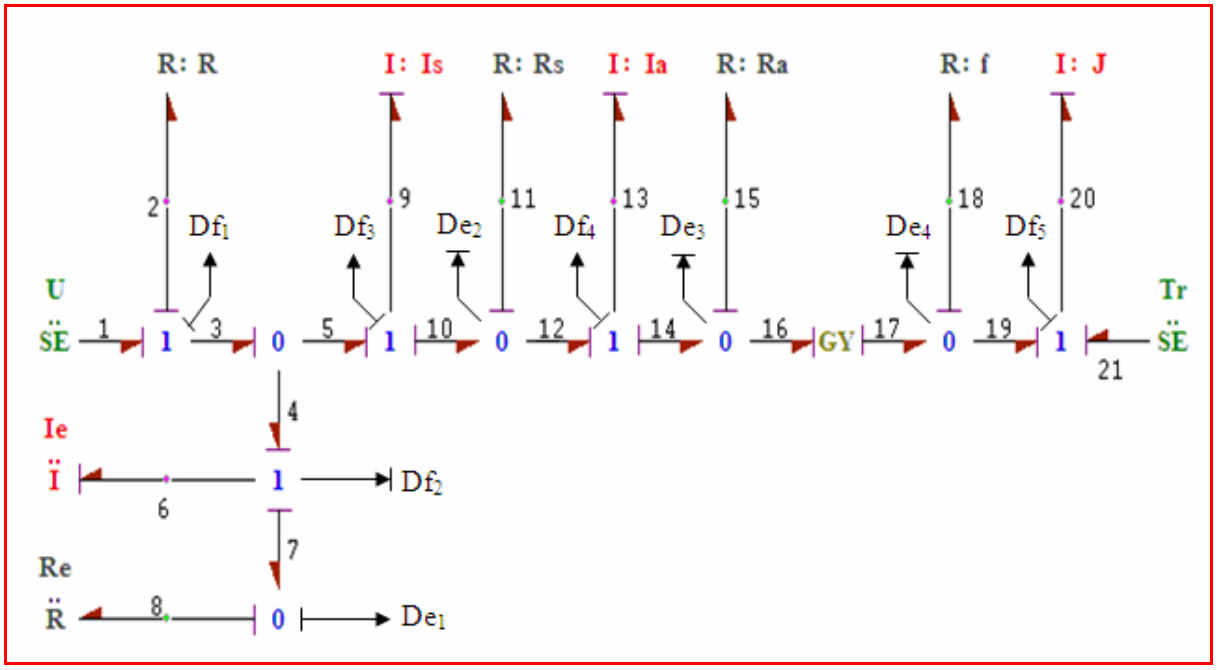


Figure III.26 : Modèle bond graph du MCC Composé avec des détecteurs virtuels.

L'ensemble des variables connues est :

$$K=\left\{Se_{(U)},Se_{(Tr)},Df_1,De_1,Df_2,De_2,Df_3,De_3,Df_4,De_4,Df_5\right\}$$

L'ensemble des variables inconnues est

$$X=\left\{e_2,f_2,e_6,f_6,e_8,f_8,e_9,f_9,e_{11},f_{11},e_{13},f_{13},e_{15},f_{15},e_{18},f_{18},e_{20},f_{20}\right\}.$$

Du modèle de la (**fig.III.16**), on peut écrire les équations suivantes :

Lois de structure		**Lois constitutives des éléments**	
Jonction 1 : R		Elément R_2 : R	
$\begin{cases} f_3=f_1; f_3=f_2 \\ e_1-e_2-e_3=0 \\ e_1=Se_1 \end{cases}$	**(III.59)**	$\begin{cases} e_2=\Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2+z_1*D_{f_1}\right] \\ f_2=(1-z_1)*\Phi_{R_2}^{-1}*(e_2)+z_1*D_{f_1} \end{cases}$	**(III.60)**

Jonction 1 : Ie

$$\begin{cases} f_6 = f_4 ; f_6 = f_7 \\ e_4 - e_6 - e_7 = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.61)}$$

Elément I_6 : Ie

$$\begin{cases} e_6 = \Phi_{I_6}\left[s\left\{ (1-z_2) * f_6 + z_2 * D_{f_2} \right\} \right] \\ f_6 = \frac{1}{s} * (1-z_2) \Phi_{I_6}^{-1} * (e_6) + z_2 * D_{f_2} \end{cases} \quad \textbf{(III.62)}$$

Jonction 0 : Re

$$\begin{cases} e_7 = e_8 \\ f_7 - f_8 = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.63)}$$

Elément R_8 : Re

$$\begin{cases} e_8 = \Phi_{R_8} * (1-y_1) * f_8 + y_1 * D_{e_1} \\ f_8 = (1-y_1) * \Phi_{R_8}^{-1} * (e_8) + \Phi_{R_8}^{-1} * y_1 * D_{e_1} \end{cases} \quad \textbf{(III.64)}$$

Jonction 1 : Is

$$\begin{cases} f_9 = f_5 ; f_9 = f_{10} \\ e_5 - e_9 - e_{10} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.65)}$$

Elément I_9 : Is

$$\begin{cases} e_9 = \Phi_{I_9}\left[s\left\{ (1-z_3) * f_9 + z_3 * D_{f_3} \right\} \right] \\ f_9 = \frac{1}{s} * (1-z_3) * \Phi_{I_9}^{-1} * (e_9) + z_3 * D_{f_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.66)}$$

Jonction 0 : Rs

$$\begin{cases} e_{11} = e_{10} ; e_{11} = e_{12} \\ f_{10} - f_{11} - f_{12} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.67)}$$

Elément R_{11} : Rs

$$\begin{cases} e_{11} = \Phi_{R_{11}} * (1-y_2) * f_{11} + y_2 * D_{e_2} \\ f_{11} = (1-y_2) * \Phi_{R_{11}}^{-1} * (e_{11}) + \Phi_{R_{11}}^{-1} * y_2 * D_{e_2} \end{cases} \quad \textbf{(III.68)}$$

Jonction 1 : Ia

$$\begin{cases} f_{13} = f_{12} ; f_{13} = f_{14} \\ e_{12} - e_{13} - e_{14} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.69)}$$

Elément I_{13} : Ia

$$\begin{cases} e_{13} = \Phi_{I_{13}}\left[s\left\{ (1-z_4) * f_{13} + z_4 * D_{f_4} \right\} \right] \\ f_{13} = \frac{1}{s} * (1-z_4) * \Phi_{I_{13}}^{-1} * (e_{13}) + z_4 * D_{f_4} \end{cases} \quad \textbf{(III.70)}$$

Jonction 0 : Ra

$$\begin{cases} e_{15} = e_{14} ; e_{15} = e_{16} \\ f_{14} - f_{15} - f_{16} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.71)}$$

Elément R_{15} : Ra

$$\begin{cases} e_{15} = \Phi_{R_{15}} * (1-y_3) * f_{15} + y_3 * D_{e_3} \\ f_{11} = (1-y_3) * \Phi_{R_{15}}^{-1} * (e_{15}) + \Phi_{R_{15}}^{-1} * y_3 * D_{e_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.72)}$$

Jonction 0 : f

$$\begin{cases} e_{18} = e_{17} ; e_{18} = e_{19} \\ f_{17} - f_{18} - f_{19} = 0 \end{cases} \quad \textbf{(III.73)}$$

Elément R_{18} : f

$$\begin{cases} e_{18} = \Phi_{R_{18}} * (1-y_4) * f_{18} + y_4 * D_{e_4} \\ f_{18} = (1-y_4) * \Phi_{R_{18}}^{-1} * (e_{18}) + \Phi_{R_{18}}^{-1} * y_4 * D_{e_4} \end{cases} \quad \textbf{(III.74)}$$

Jonction 1 : J

$$\begin{cases} f_{20}=f_{19};f_{20}=f_{21} \\ e_{21}+e_{19}-e_{20}=0 \\ e_{21}=Se_2 \end{cases} \quad \textbf{(III.75)}$$

Elément I_{19} : J

$$\begin{cases} e_{20}=\Phi I_{20}\left[s\left\{ \left(1-z_5\right)* f_{20}+z_5*D f_5 \right\} \right] \\ f_{20}=\frac{1}{s}*\left(1-z_5\right)*\Phi_{I_{20}}^{-1}*\left(e_{20}\right)+z_5*D f_5 \end{cases} \quad \textbf{(III.76)}$$

Gyrateur GY : r

$$\begin{cases} f_{17}=r^{-1}*e_{16} \\ f_{16}=r^{-1}*e_{17} \end{cases} \quad \textbf{(III.77)}$$

A partir des lois de structure des jonctions et des équations constitutives des éléments on aboutis aux équations des résidus :

$$\begin{cases} r_1: e_1-e_2-e_3=0 \\ r_1: s e_1-\Phi R_2\left[\left(1-z_1\right)* f_2+z_1*D f_1\right]-\Phi I_6\left[s\left\{\left(1-z_2\right)* f_6+z_2*D f_2\right\}\right]-\Phi R_8*\left(1-y_1\right)* f_8-y_1*D e_1=0 \end{cases}$$

..... **(III.78)**

$$\begin{cases} r_2: e_4-e_6-e_7=0 \\ r_2: s e_1-\Phi R_2\left[\left(1-z_1\right)* f_2+z_1*D f_1\right]-\Phi I_6\left[s\left\{\left(1-z_2\right)* f_6+z_2*D f_2\right\}\right]-\Phi R_8*\left(1-y_1\right)* f_8-y_1*D e_1=0 \end{cases}$$

..... **(III.79)**

$$\begin{cases} r_3: f_7-f_8=0 \\ r_3: \frac{1}{s}*\left(1-z_2\right)\Phi_{I_6}^{-1}*\left(e_6\right)+z_2*D f_2-\left(1-y_1\right)*\Phi_{R_8}^{-1}*\left(e_8\right)-\Phi_{R_8}^{-1}*y_1*D e_1=0 \end{cases}$$

..... **(III.80)**

$$\begin{cases} r_4: e_5-e_9-e_{10}=0 \\ r_4: s e_1-\Phi R_2\left[\left(1-z_1\right)* f_2+z_1*D f_1\right]-\Phi I_9\left[s\left\{\left(1-z_3\right)* f_9+z_3*D f_3\right\}\right]-\Phi R_{11}*\left(1-y_2\right)* f_{11}-y_2*D e_2=0 \end{cases}$$

..... **(III.81)**

$$\begin{cases} r_5: f_{10}-f_{11}-f_{12}=0 \\ r_5: \frac{1}{s}*\left(1-z_3\right)*\Phi_{I_9}^{-1}*\left(e_9\right)+z_3*D f_3-\left(1-y_2\right)*\Phi_{R_{11}}^{-1}*\left(e_{11}\right)-\Phi_{R_{11}}^{-1}*y_2*D e_2-\frac{1}{s}*\left(1-z_4\right)*\Phi_{I_{13}}^{-1}*\left(e_{13}\right)-z_4*D f_4=0 \end{cases}$$

..... **(III.82)**

$$\begin{cases} r_6: e_{12}-e_{13}-e_{14}=0 \\ r_6: \Phi R_{11}*\left(1-y_2\right)* f_{11}+y_2*D e_2-\Phi I_{13}\left[s\left\{\left(1-z_4\right)* f_{13}+z_4*D f_4\right\}\right]-\Phi R_{15}*\left(1-y_3\right)* f_{15}-y_3*D e_3=0 \end{cases}$$

..... **(III.83)**

$$\begin{cases} r_7 : f_{14} - f_{15} - f_{16} = 0 \\ r_7 : \frac{1}{s} * (1 - z_4) * \Phi_{I_{13}}^{-1} * (e_{13}) + z_4 * D_{f_4} - (1 - y_3) * \Phi_{R_{15}}^{-1} * (e_{15}) - \Phi_{R_{15}}^{-1} * y_3 * D_{e_3} - r^{-1} * \Phi_{R_{18}} * (1 - y_4) * f_{18} - r^{-1} * y_4 * D_{e_4} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.84)**

$$\begin{cases} r_8 : f_{17} - f_{18} - f_{19} = 0 \\ r_8 : r^{-1} * \Phi_{R_{15}} * (1 - y_3) * f_{15} + r^{-1} * y_3 * D_{e_3} - (1 - y_4) * \Phi_{R_{18}}^{-1} * (e_{18}) - \Phi_{R_{18}}^{-1} * y_4 * D_{e_4} - \frac{1}{s} * (1 - z_5) \Phi_{I_{20}}^{-1} * (e_{20}) - z_5 * D_{f_5} = 0 \end{cases}$$

..... **(III.85)**

$$\begin{cases} r_9 : e_{21} + e_{19} - e_{20} = 0 \\ r_7 : s_{e_2} + \Phi_{R_{19}} * (1 - y_4) * f_{19} + y_4 * D_{e4} - \Phi_{I_{20}} \left[s \left\{ (1 - z_5) * f_{20} + z_5 * D_{f_5} \right\} \right] = 0 \end{cases}$$ ..... **(III.86)**

Comme dans les cas précédents, on a présenté le modèle de surveillance du MCC à excitation composée, les lois de structures et les équations constitutives des éléments qui nous ont permis d'écrire les équations des résidus précédentes, les combinaisons possibles du placement des capteurs sont présentées sur le tableau suivant :

Nombre de capteurs	**Combinaisons possibles**	**Composants surveillés**	**Composants détectables et non localisables**
9	[111111111]	Tous	ϕ
8	[011111111]	Tous	ϕ
8	[101111111]	Tous	ϕ
Le placement du capteur « Df » sur la jonction « 1_R ou 1_{Ie} » donne le même résultat que le shunt, donc on élimine un cas «pas de capteur sur la jonction 1_R ou $y_1=0$» dans le reste des calculs.			
7	[010111111]	R, Ra, Ia, Rs, Is, f, J	{Re, Ie}
7	[011011111]	Re, Ra, Ia, f, J	{R, Ie}, {Rs, Is}
7	[011101111]	Tous	ϕ
Si une combinaison est satisfaisante on ne continue pas le calcul pour le même nombre de capteurs, car l'intérêt est de trouvé le cas optimal.			
6	[010101111]	R, Ra, Ia, Rs, Is, f, J	{Re, Ie}
6	[011010111]	Re, Ra, Ia, f, J	{R, Ie}, {Rs, Is}
6	[011101011]	Tous	ϕ
5	[011101010]	R, Ra, Ia, Rs, Is, Re, Ie	{f, J}

Tableau III.9 : Signature des différentes combinaisons.

Ce qui est clair à voir sur le tableau, c'est qu'on peut surveillé le modèle de la (fig.III.26) avec six capteurs seulement, Les capteurs sont placés selon la combinaison [011101011]. Cette dernière nous permet d'écrire les équations des résidus comme suit :

$$\left.\begin{aligned}
&r_2 : s e_1 - \Phi_R * (D f_2 + D f_3) - \Phi_{I_e} * s * D f_2 - D e_1 = 0 \\
&r_3 : D f_2 - \Phi_{R_e}^{-1} * D e_1 = 0 \\
&r_4 : s e_1 - \Phi_R * (D f_2 + D f_3) - \Phi_{I_s} * s * D f_3 - \Phi_{R_s} * (D f_3 - D f_4) = 0 \\
&r_6 : \Phi_{R_s} * (D f_3 - D f_4) - \Phi_{I_a} * s * D f_4 - \Phi_{R_a} * (D f_4 - r^{-1} * D e_4) = 0 \\
&r_8 : r^{-1} * \Phi_{R_a} * (D f_4 - r^{-1} * D e_4) - \Phi_f^{-1} * D e_4 - D f_5 = 0 \\
&r9 : s e_2 + D e_4 - \Phi_J * s * D f_5
\end{aligned}\right\} \quad \text{..... (III.87)}$$

La matrice de signature des défaillances des éléments est la suivante :

	ϕ_R	$\phi_{I\,e}$	ϕ_{Re}	ϕ_{Is}	$\phi_{\mathrm{R}\,s}$	ϕ_{Ia}	$\phi_{\mathrm{R}\,a}$	ϕ_f	ϕ_J
r_2	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_3	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_4	**1**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**
r_6	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**1**	**0**	**0**
r_8	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**
r_9	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**

Tableau III.10 : Matrice de signature des défaillances de la combinaison $[011101011]$.

Les schémas bloc des résidus sont représentés si dessous :

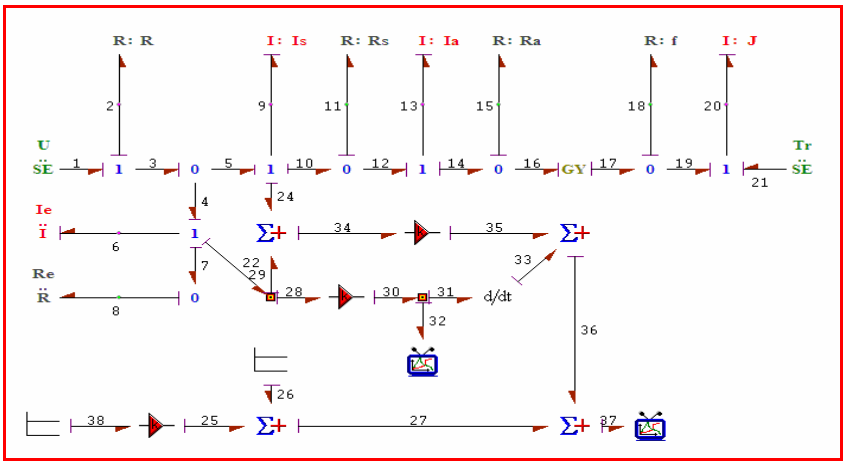


Figure III.27 : Modèle bond graph du résidu « r_2 ».

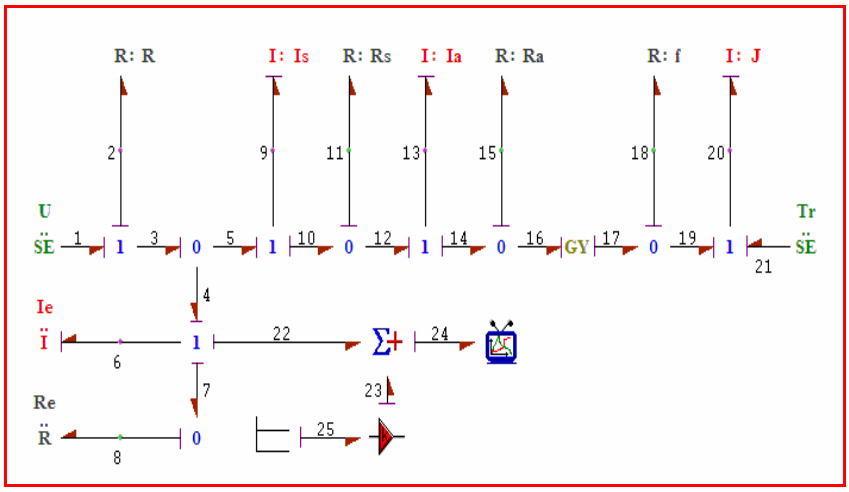


Figure III.28 : Modèle bond graph du résidu « r_3 ».

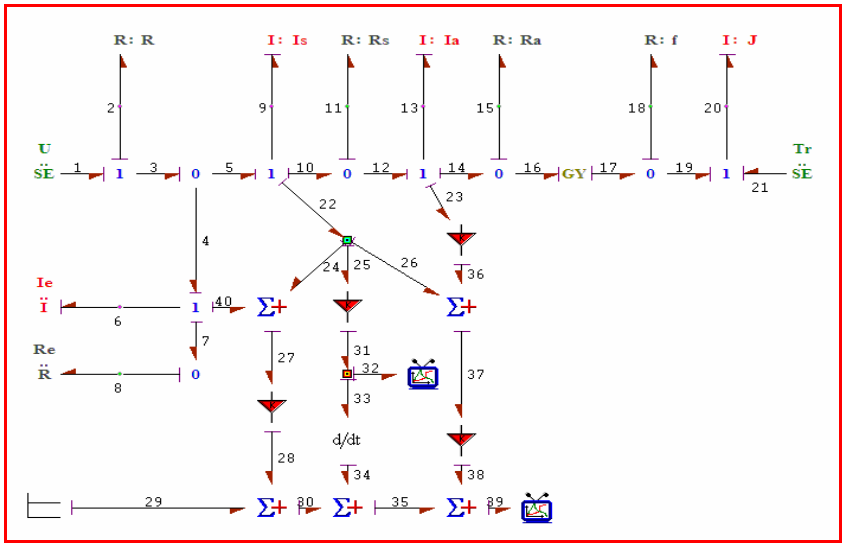


Figure III.29 : Modèle bond graph du résidu « r_4 ».

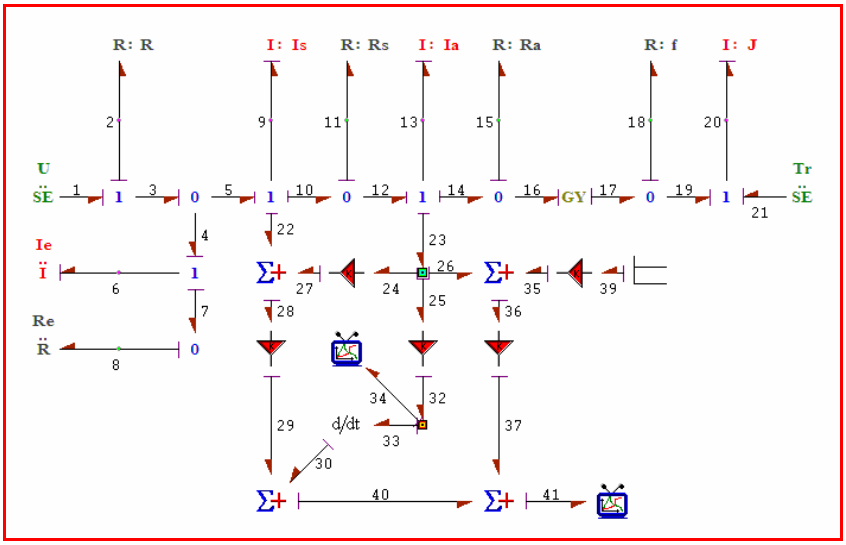


Figure III.30 : Modèle bond graph du résidu « r_6 ».

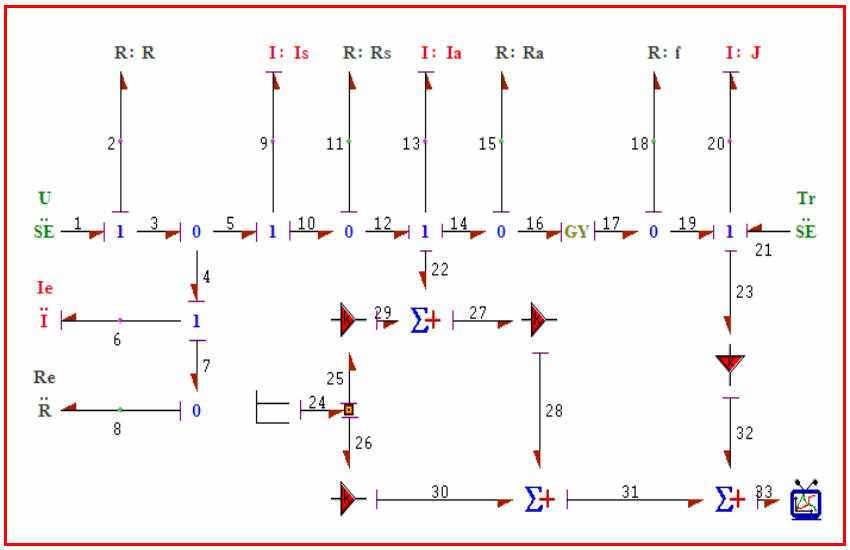


Figure III.31 : Modèle bond graph du résidu « r_8 ».

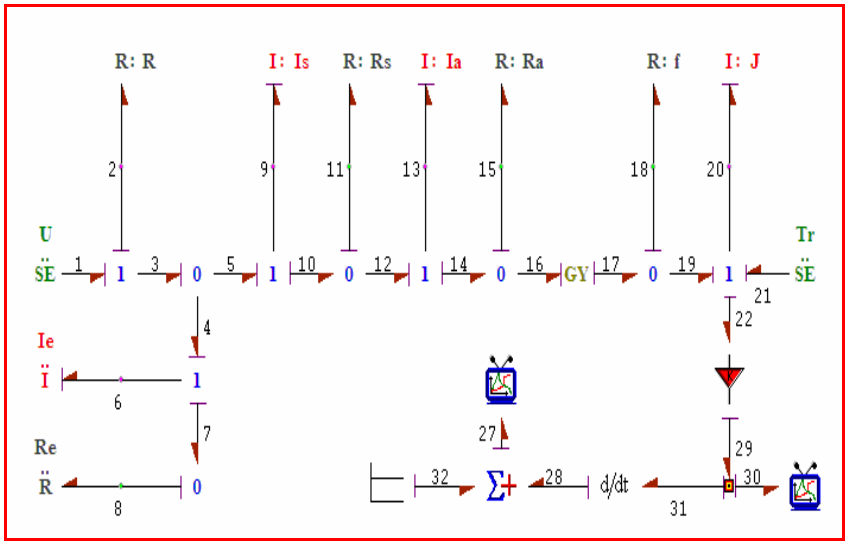


Figure III.32 : Modèle bond graph du résidu « r_9 ».

III.6.3.1. Réponse des résidus à un défaut de l'élément « Re »

En analysant la matrice de signature de défaillances des éléments (**Tab.III.8**), précisément la colonne de « *Re* » on peut prévoir que le résidu r_3 est sensible à la défaillance de cet élément, d'ailleurs ça apparaît nettement sur la (**fig.III.33)**. Mais sur cette dernière on voie que r_2 est aussi sensible à la défaillance de « *Re* », et cela on peut le justifier par la forte présence du « De_1 » dans l'équation de r_2 du système (**III.87**). Le reste des résidus ne sont pas sensibles à la défaillance de cet élément.

On compare les résultats de simulation donnés par la (**fig.III.33)**, avec les résultats théoriques du (**Tab.III.8**). On peut affirmer que ces résultats sont identiques, ce qui nous

permet de dire que notre modèle du moteur à courant continu à excitation composée est valide.

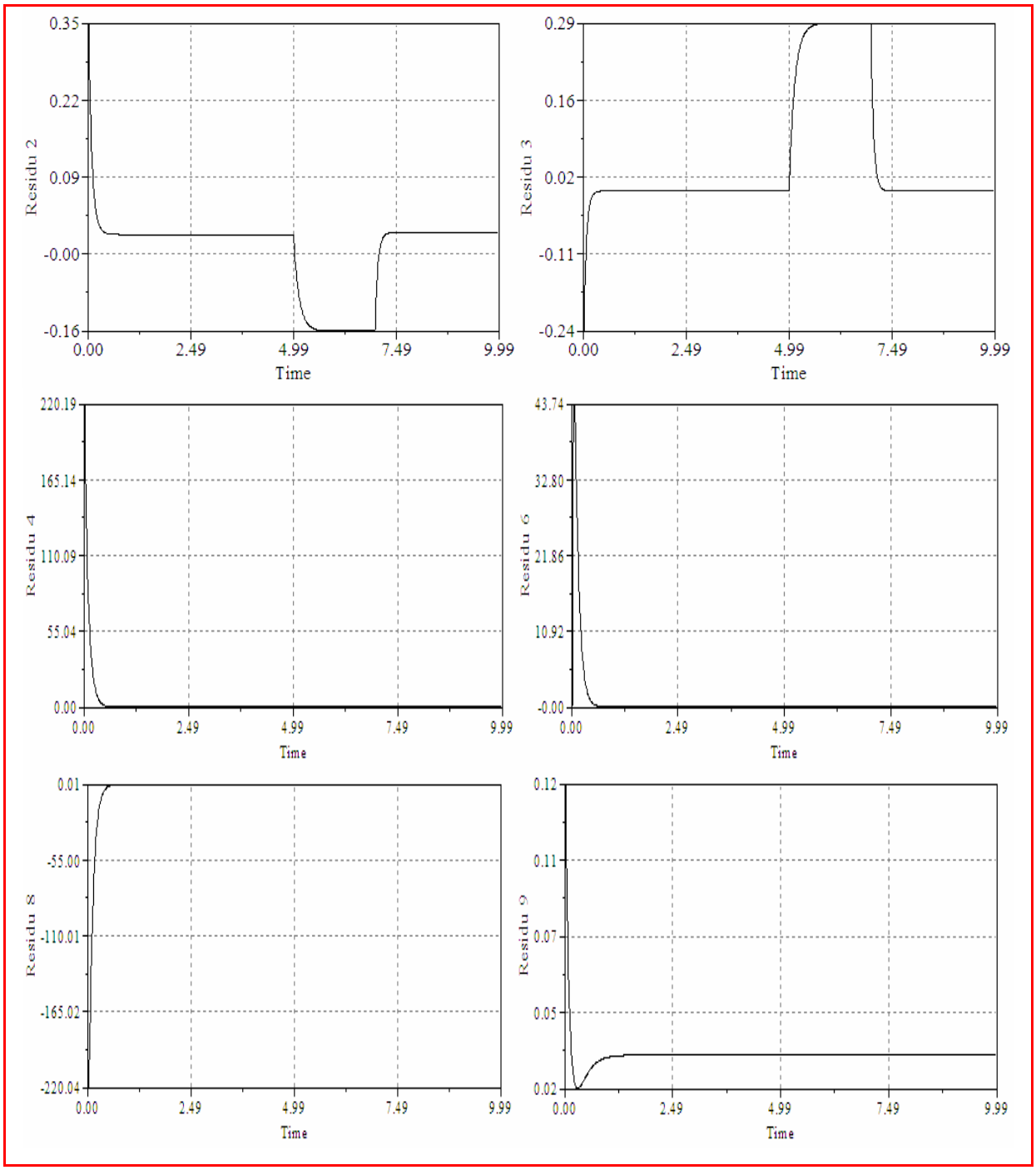


Figure III.33 : Réponses des résidus au défaut de Re.

III.7. CONCLUSION

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et causales d'une part et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre

part, est introduit en génie électrique pour l'analyse et la surveillance des systèmes électrique et mécanique.

Dans ce chapitre nous avons utilisé les propriétés structurelles et causales du formalisme bond graph pour la génération des relations de redondance analytique. Pour la tache du placement de capteurs en vue de la surveillance des composants, l'algorithme utilisé s'est avéré efficace. C'est une technique qui assure la surveillance avec le minimum de capteurs.

Nous avons enfin introduit des défaillances pour tester la sensibilité des résidus. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'approche utilisée.

Conclusion Générale

L'utilisation de l'outil bond graph en vue de la modélisation, de la détection et de la localisation des défauts dans les systèmes électriques vient de paraître très efficace du fait de sa simplicité et de ses supports de modélisation et de simulation.

Notre contribution concerne les méthodes à base de modèle. Nous avons utilisé Matlab pour l'élaboration du modèle analytique et l'outil pour la modélisation graphique, la génération des relations de redondance analytiques (résidus), 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.

Les résultats obtenus ont fait l'objet de deux articles, l'un sur la partie modélisation soumis à la conférence internationale de Batna CEE'2008, et le deuxième qui porte sur la surveillance est soumis à la conférence internationale de Guelma CISGM-5.

Comme perspectives et durant ce travail nous avons relevé quelques points que nous souhaitons développer plus tard: Dans ce travail, nous avons modélisé les deux phénomènes électrique et mécanique qui forment le moteur à courant continu. Nous projetons alors étendre notre travail à la modélisation du phénomène magnétique. Les RRAs générées dans le présent travail sont déterministes ne tenant pas compte des incertitudes des paramètres. L'outil bond graph permet de rajouter graphiquement ces incertitudes et de générer ainsi des RRAs robustes par rapport aux incertitudes paramétriques.

ANNEXE A

Généralités sur les Bond Graphs

A.1. INTRODUCTION

La méthodologie de la modélisation par bond graph est basée sur la caractérisation des phénomènes d'échange de puissance (par un lien) au sein d'un système. L'idée de la modélisation par bond graph est la représentation des puissances dissipées comme le produit (flux x effort) lié par les différentes jonctions pour reproduire les échanges au sein du système.

Il existe aussi quelques bond-graphs, que nous verrons plus loin, où le produit effort par le flux n'est pas une puissance. Ils sont appelés pseudo bond-graphs, et sont utilisés principalement pour la modélisation des phénomènes rencontrés en génie des procédés (thermiques, chimiques).

Les bond-graphs permettent, à partir d'un système physique quelconque, d'obtenir une représentation graphique indépendante du domaine physique étudié. La construction d'un modèle bond graph est réalisée en trois étapes.

La première étape consiste à décomposer le système à modéliser en sous-systèmes, associés aux différents composants technologiques. L'interconnexion des composants est assurée par des variables de liaison. Cette représentation est appelée bond graph à mot ou word bond graph. On peut dire que c'est l'étape technologique de la modélisation.

La deuxième étape consiste à reproduire graphiquement tous les phénomènes physiques pris en compte dans les hypothèses de modélisation. A ce niveau l'outil bond graph à vocation pluridisciplinaire, permet par sa nature graphique à l'aide d'un langage unique de mettre en évidence la nature des échanges de puissance dans le système, tels que les phénomènes de stockage, de transformation et de dissipation d'énergie. L'ordre et le type de dynamique du système sont directement déduits du modèle bond graph. Enfin, grâce à son caractère évolutif, la structure du modèle graphique obtenu, peut être modifiée par simple ajout d'éléments (de frottement, d'inerte, compressibilité,...etc.). Ce niveau constitue une étape physique.

La troisième étape consiste à écrire les lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées, c'est la représentation mathématique

A.2. ELEMENTS BOND GRAPHS A UN PORT

A.2.1. Représentation

Dans chaque système fermé, il y a non seulement conservation de l'énergie, mais aussi continuité de puissance. On représente le flux d'énergie entre deux systèmes (A et B) en liaison, par un lien de puissance, désigné par le symbole visible (fig.A.1) qui caractérise le « *bond* » (ou lien) du bond graph. Le sens de la demi flèche correspond à la direction de la puissance « *P* » échangée.

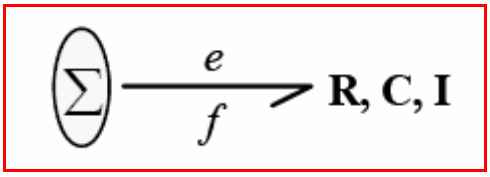


Figure A.1 : Représentation d'un élément bond graph 1 port.

A.2.2. Variables bond graph

Les variables mises en jeu dans la modélisation bond graph sont :

- Variables de puissance :

La puissance échangée « P » s'exprime par le produit de deux variables dites de puissance, l'effort « e » et l' flux « f » :

$$P = e.f \quad \text{.....(A.1)}$$

- Variables d'énergie :

Elles sont définies par les relations intégrales suivantes : « $p\ (t)$ » l'impulsion ou la quantité de mouvement généralisé,

$$p(t) = \int_0^t e(\tau)d\tau \quad \text{.....(A.2)}$$

Et « $q\ (t)$ » le déplacement généralisé,

$$q(t) = \int_0^t f(\tau)d\tau \quad \text{.....(A.3)}$$

La signification des variables citées pour les principaux domaines est indiquée par le (**Tab.A.1**).

Domaine	**Effort**	**Flux**	**Impulsion**	**Déplacement**
	[Unités]	[Unités]	[Unités]	[Unités]
	e (t)	f (t)	p (t)	q (t)
Electrique	Tension	Courant	flux magnétique	Charge Electrique
	[Volt]	[Ampere]	[Weber]	[Coulomb]
Mécanique de rotation	Couple	Vitesse angulaire	Impulsion angulaire	Angle
	[N.m]	[Rad/s]	[N.s]	[Rad]
Mécanique de translation	Force	vitesse linéaire	impulsion	Distance
	[N]	[m/s]	[N.s]	[m]
hydraulique	Pression	débit volumique	impulsion de pression	Volume
	[P a]	[m3/s]	[Pa.s]	[m3]

Thermique	Température	Flux de chaleur	// //	Energie calorifique
	[K]	[J/s]		[J]
Thermodynamique	Température	Flux d'entropie	// //	Entropie
	[K]	[J/(K.S)]		[J/K]
Chimique	Potentiel chimique	Débit molaire	// //	Nombre de moles
	[J/mole]	[Mole/s]		[Mole]
Economique	Prix unitaire des marchandises	Taux de flux des marchandises	Impulsion économique	Inventaire

Tableau A.1 : Variables utilisées dans la modélisation bond graph.

On distingue les éléments bond graphs suivants : passifs, actifs, et de jonction.

A.2.3. Eléments passifs

Ils dissipent de la puissance. La demi flèche est normalement représentée entrant dans ces éléments. Ces éléments sont désignés par « *R, C et I* ».

- Elément R:

Modélise tout phénomène physique liant l'effort et le flux. Citons à titre d'exemple résistance électrique, diode, restriction hydraulique, frottement, résistance thermique. La loi linéaire ou non linéaire est sous la forme suivante :

$$\phi_R(e, f) = 0 \quad \text{.....(A.4)}$$

❖ Exemple 1 : *La loi d'ohm* $U = R.i$ *en électricité, ou de Bernoulli* $P = K.D.V^2$ *en hydraulique, ou de Fourier en thermique* $\Delta T = K.C.Q$.

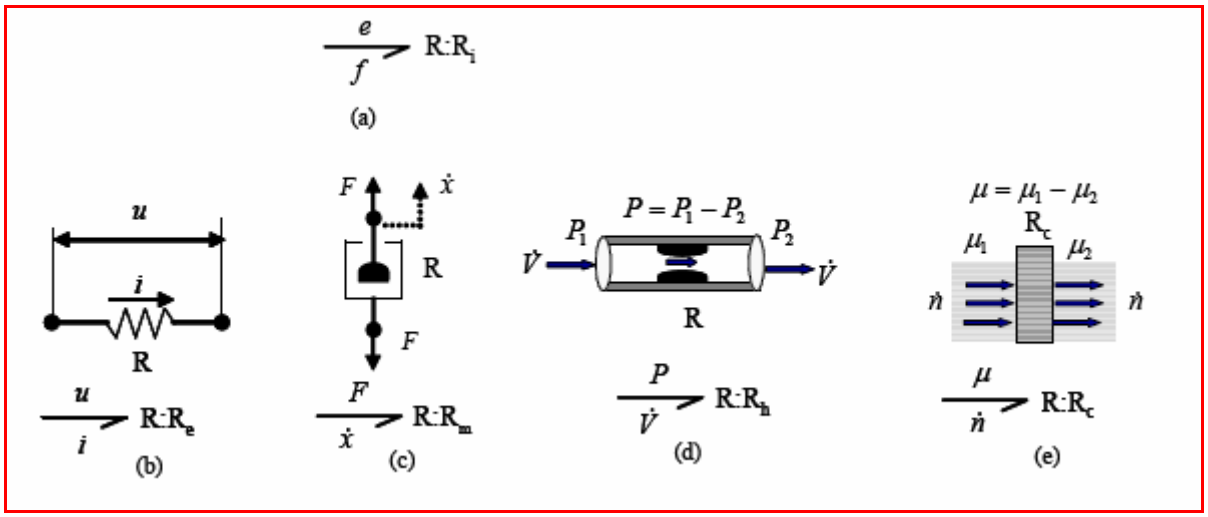


Figure A.2 : Représentations graphiques d'un élément R.

Elément C:

Modélise tout phénomène physique liant l'effort au déplacement; exemple : ressort, condensateur, accumulateur, réservoir de stockage, phénomène de compressibilité. « *C* » est un élément de stockage d'énergie.

$\phi_c(e,q)=0$ Où $\phi_c(e,\int_o^t f(\tau)d\tau)=0$ ..... **(A.5)**

❖ Exemple 2 : $u=\frac{1}{c}\int i.dt$ *ou* $u=\frac{q}{c}$ *en électricité,* $P=\frac{V}{C}$ *ou* $P=\frac{1}{C}\int V.dt$ *en hydraulique et* $T=\frac{1}{C}\int Q.dt$ *en thermique.*

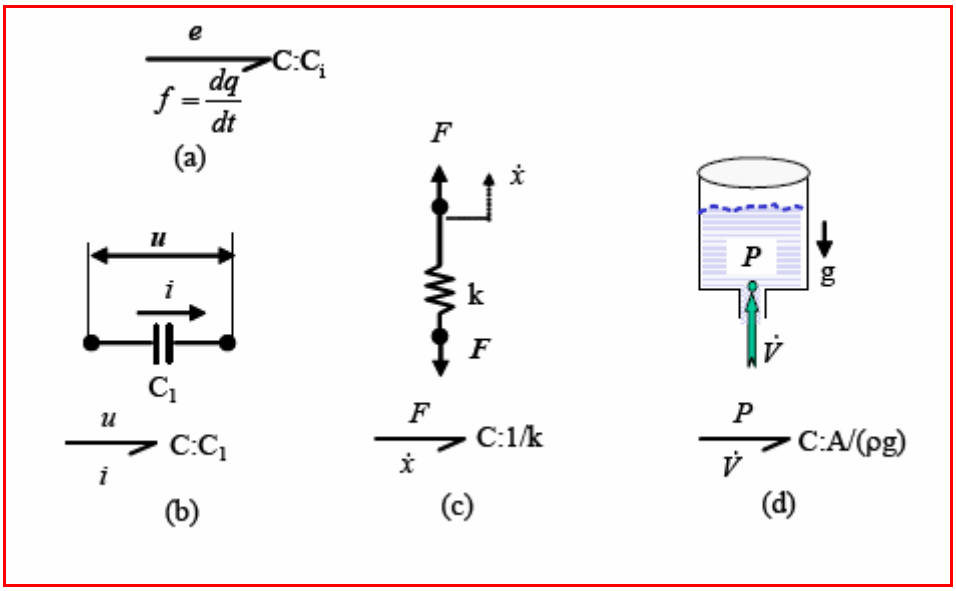


Figure A.3 : Représentations graphiques d'un élément C.

Elément I :

Modélise tout phénomène d'inertie liant le flux à l'impulsion. I est un élément de stockage d'énergie. Exemple : masse en translation, inductance, inerrance d'un liquide. La relation est de la forme:

$$\phi_I(p, f) = 0 \quad \text{Où} \quad \phi_I(f, \int_o^t e(\tau)d\tau) = 0 \quad \text{..... (A.6)}$$

❖ Exemple 3 : $U = L\frac{di}{dt}$ *et* $P = \frac{\rho.l}{A}.V$ *en hydraulique.*

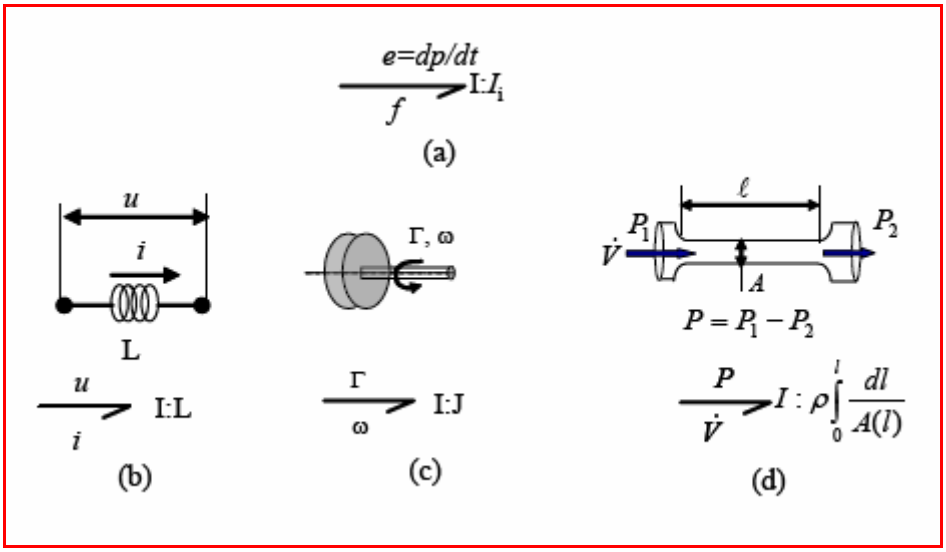


Figure A.4 : Représentations graphiques d'un élément I.

(a): Modèle bond graph. (b): Exemple électrique, (c): Exemple mécanique, (d): Exemple hydraulique.

Les éléments « *I* » et « *C* » sont tous les deux associés à un stockage d'énergie. Mais contrairement à « *C* », dans l'élément « *I* », l'énergie ne se conserve pas lorsque la variable du flux disparaît : l'énergie est stockée grâce à la dynamique du système.

A.2.4. Eléments actifs

Les éléments actifs sont des sources qui fournissent de la puissance au système. On distingue les sources d'effort « *Se* » (tel que générateur de tension) et les sources de flux « *Sf* » (générateur de courant, vitesse appliquée). On les désigne par la (**Fig.A.4)**.

L'orientation de la demi flèche est fixée et supposée toujours sortant de la source.

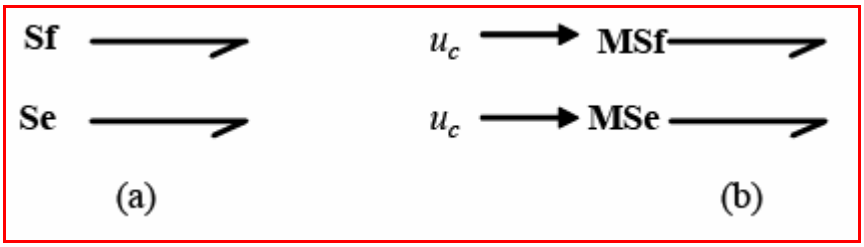


Figure A.5 : Eléments actifs. (a): Sources d'effort et de flux. (b): Sources modulées d'effort et de flux

A.2.5. Eléments de jonction

Ils servent à coupler les éléments « *R, C et I* » et composent la structure du modèle. Ils sont conservatifs de puissance.

- Jonction 0 :

Elle associe les éléments soumis au même effort, ce qui correspond à des éléments en série en mécanique (même force) et en parallèle en hydraulique et électricité (même tension, même pression). La jonction et la loi constitutive sont données par la (**Fig. A.6**).

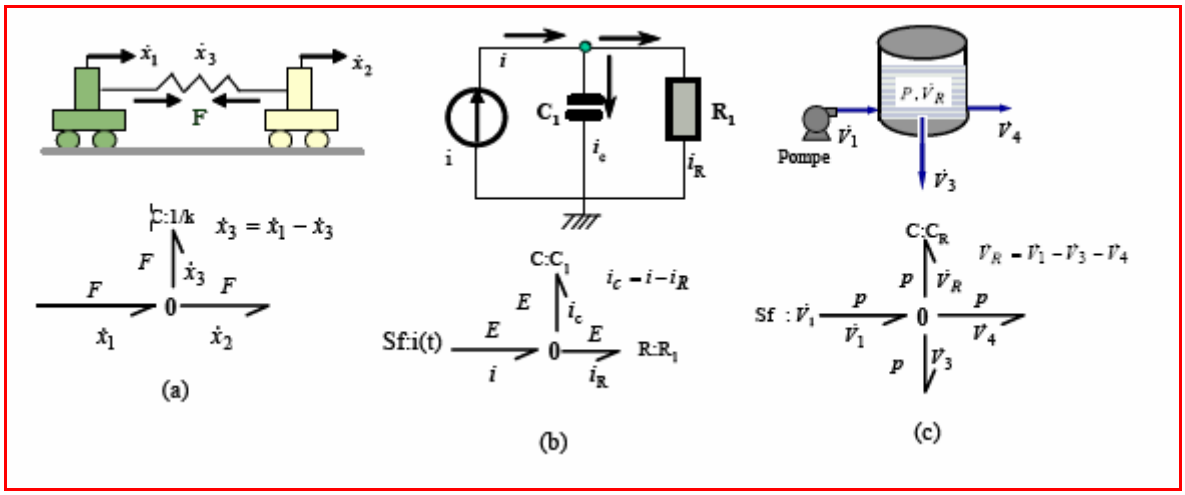


Figure A.6 : Jonction 0. (a): Système mécanique. (b): Système électrique. (c): Système hydraulique.

- Jonction 1:

Elle associe les éléments soumis à un même flux. Elle représente des éléments en parallèle en mécanique (même vitesse) et en série en électricité et en hydraulique (même courant ou même débit volumique).

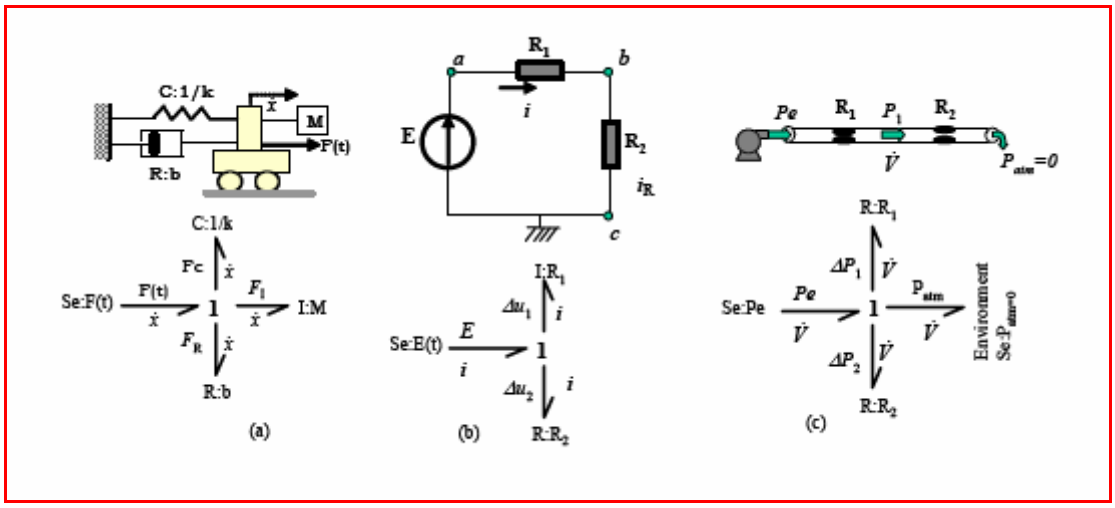


Figure A.7 : Jonction1. (a): Système mécanique. (b): Système électrique.
(c): Système hydraulique.

Dans les deux jonctions, nous avons une conservation de puissance qui est exprimée par le bilan des puissances:

$$\sum_{i=1}^{n} a_i . e_i . f_i = 0 \quad \text{.....(A.7)}$$

Avec ai = ±1 souvent que la demi flèche est entrante ou sortante de la jonction.

A.3. ELEMENTS BOND GRAPHS 2 PORTS

A.3.1. Transformateur TF

L'élément « *TF* » est un élément à deux ports qui modélise les éléments transformateurs de puissance tels qu'un transformateur électrique, un système d'engrenage ou un bras de levier (**Fig.A.8**). Si le module « *m* » n'est pas constant, le transformateur est dit modulé et est noté par « *mTF* » , la variable « *m* » peut alors être continue ou booléenne (0,1).

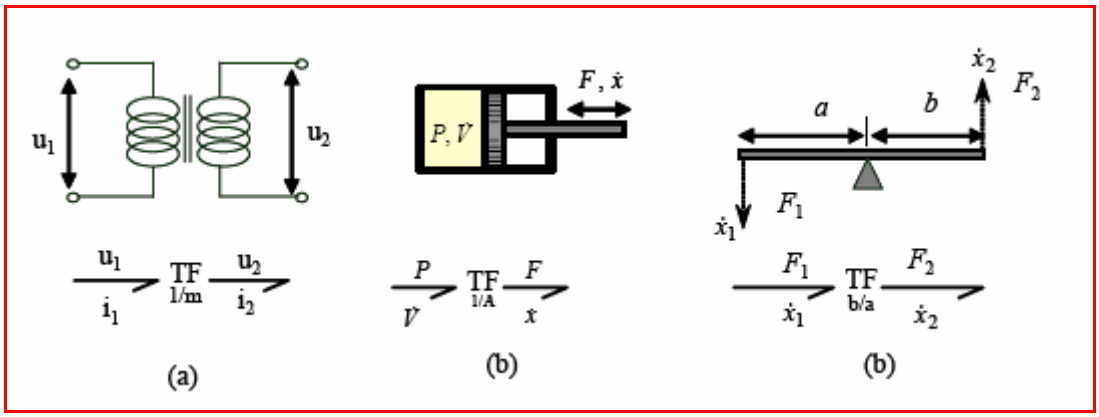


Figure A.8 : Elément TF. (a): Transformateur électrique. (b): Piston hydraulique. (c): Levier.

A.3.2. Gyrateur GY

Cet élément est un 2-ports représenté par la (**Fig.A.9**).

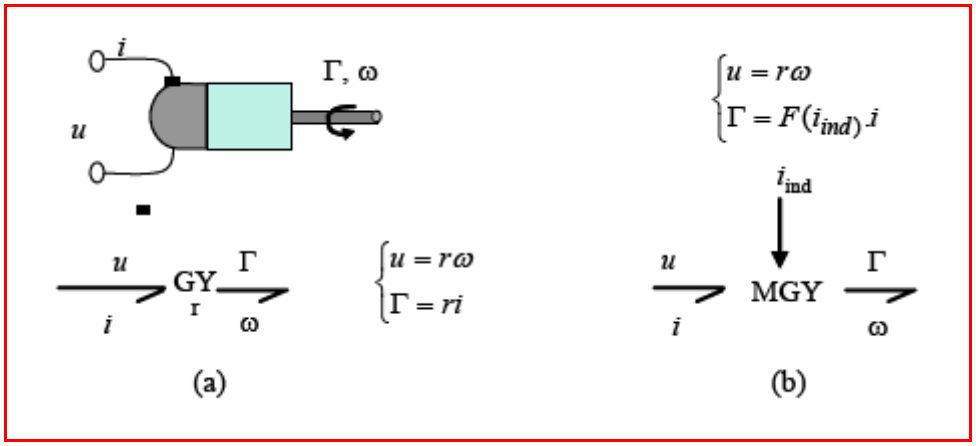


Figure A.9 : (a): Gyrateur. (b): Gyrateur modulé.

A.3.3. Liens d'information

Lorsqu'une des variables effort ou flux est très faible, la puissance transmise est négligeable, on représente alors le signal transmis (par un capteur, un intégrateur, un sommer) par un lien d'information (**Fig.A.10-(c)**). Les capteurs d'effort « *D : De* » et de flux « *D : Df* » sont représentés par la (**Fig.A.10-(a) et (b)**).

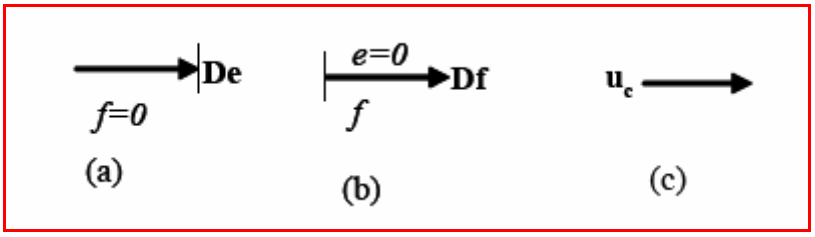


Figure A.9 : (a): détecteur d'effort et (b): détecteur de flux. (c): lien d'information.

A.4. NOTION DE CAUSALITE

Une propriété importante du bond graph par rapport aux représentations graphiques est la possibilité de mettre en évidence les relations de cause à effet au sein du système. Celles-ci sont mises en évidence par le trait causal placé perpendiculairement au lien. Le trait indique par convention le sens dans lequel l'effort est connu, le flux étant toujours considéré comme connu dans le sens opposé au trait causal.

Dans notre cas (**Fig.A.11-(a)**), « *A* » applique à « *B* » un effort « *e* », qui réagit en envoyant à « *A* » un flux « *f* ». L'effort imposé par « *A* » est une donnée pour « *B* ». La notion de causalité en bond graph permet de résoudre le niveau algorithmique de la modélisation en choisissant par exemple des causalités intégrales (la résolution numérique d'une intégration étant plus simple que la dérivation).

Soulignons que la position du trait causal est indépendante du sens de la demi flèche.

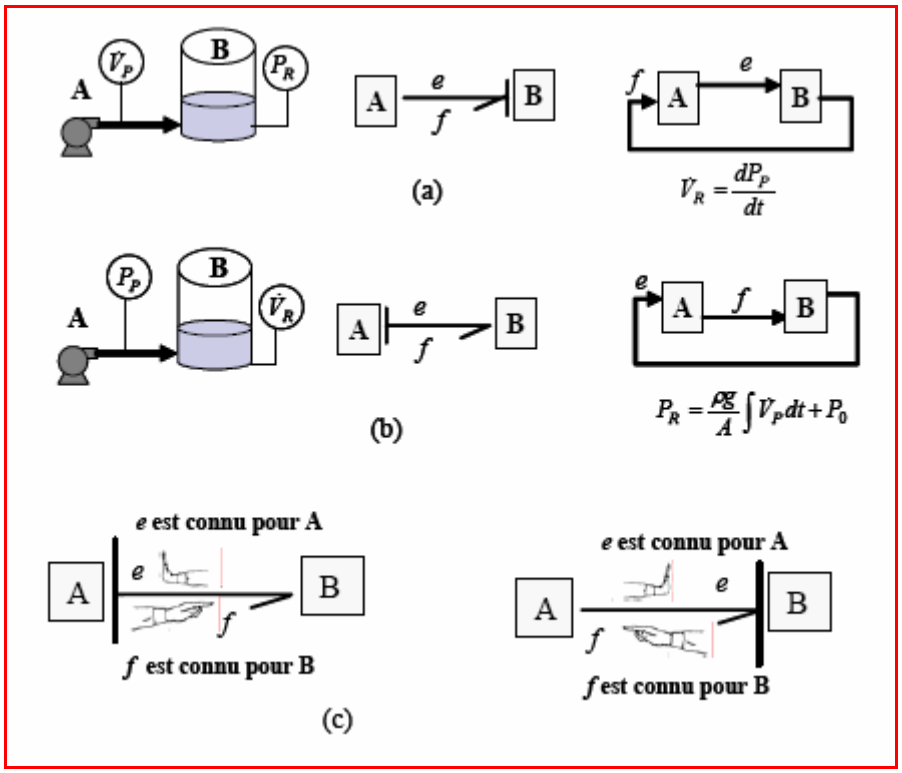


Figure A.11 : Causalités en bond graph. (a) Effort connu pour B. (b) Flux connu pour B. (c) Règle de causalité

A.4.1. Règle d'affectation de la causalité

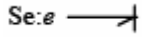
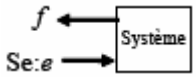
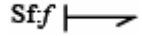
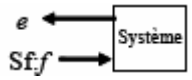
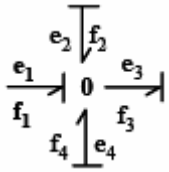
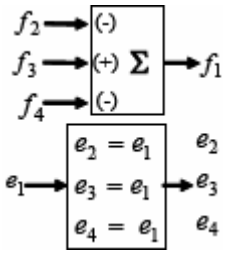
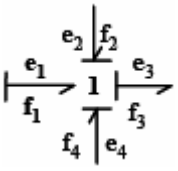
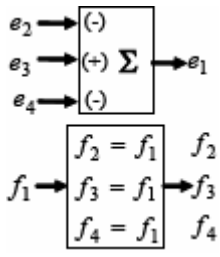
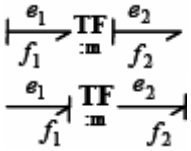
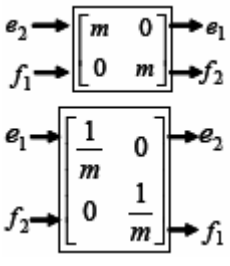
Les relations de cause à effet associées à leurs schémas bloc ainsi que les règles d'affectation des causalités pour les éléments de bond graph sont présentées par les tableaux (**Tab.A.2**). La procédure d'affectation des causalités « *SCAP* » (Séquentiel causality application procedure) est effectuée comme suit:

1. Affecter la causalité aux sources,
2. Mettre les éléments « *I et C* » en causalité intégrale et affecter la causalité obligatoire sur les « *R* » non linéaires et répercuter sur l'environnement. On essaiera toujours d'affecter aux éléments « *C et I* » une causalité associée à une loi de type intégrale car il est plus aisé et plus robuste d'intégrer que de dériver.

3. Affecter les causalités aux jonctions « *0,1, TF, GY* ».

4. Affecter les causalités aux éléments « *R* » linéaires en fonction des possibilités restantes.

5. Rechercher les conflits de causalité. En cas de conflit, reprendre en 2 et modifier la causalité sur l'élément « *I ou C* » origine du conflit. Quelquefois, on est contraint d'ajouter des éléments « *C ou I* » (pouvant représenter un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale.

Element	Bond graph	Causal equation	Bloc diagrams	Rule
source d'Effort		*e* connu		L'effort (ou flux) imposé par la source d'éffort (ou de flux) est une donnée connue pur le système. *Règle : La causalité est obligatoire*
source de Flux		*f* connu		
Jonction 0		$\begin{cases} e_2 = e_3 = e_4 = \{e_1\} \\ f1 = -f_2 + f_3 - f_4 \end{cases}$		Un seul effort peut donner sa valeur aux autres, (ici e1). *Règle: Un seule trait causal près de la jonction 0.*
Jonction 1		$\begin{cases} f_2 = f_3 = f_4 = \{f_1\} \\ e_1 = -e_2 + e_3 - e_4 \end{cases}$		Un seul flux peut donner sa valeur aux autres (ici f1). *Règle: Un seul lien sans trait causal prés de la jonction 1.*
TF		$\begin{cases} e_1 = m.e_2 \\ f_2 = m.f_1 \end{cases}$ $\begin{cases} e_2 = \frac{1}{m}.e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m}.f_2 \end{cases}$		Un effort et un flux sont imposés au TF *Règle : Un seul trait prés de TF*

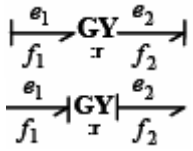
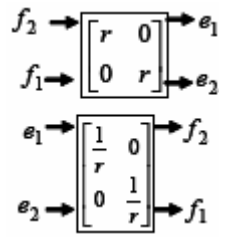
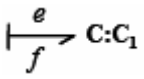
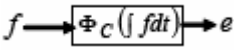
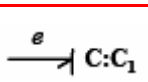
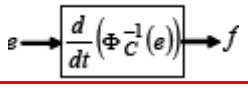
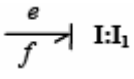
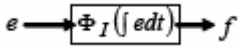
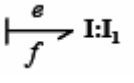
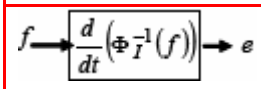
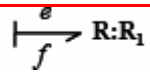
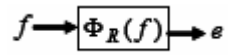
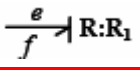
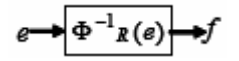
GY		$\begin{cases} e_1 = r.f_2 \\ e_2 = r.f_1 \end{cases}$ $\begin{cases} f_2 = \frac{1}{r}.e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r}.e_2 \end{cases}$		Deux flux ou deux efforts sont imposés au GY *Régle : Deux trait ou aucun trait prés de GY*
C		$\begin{cases} e = \phi_C(\int f.dt) \\ f = \frac{d}{dt}(\phi_C{}^{-1}.(e)) \end{cases}$		Causalité intégrale préférentielle
				Causalité dérivée préférentielle
I		$\begin{cases} f = \phi_I(\int e.dt) \\ e = \frac{d}{dt}(\phi_I{}^{-1}.(f)) \end{cases}$		Causalité intégrale préférentielle
				Causalité intégrale préférentielle
R		$\begin{cases} e = \phi_R.(f) \\ f = \phi_C{}^{-1}.(e) \end{cases}$		Causalité résistance
				Causalité conductance

Tableau A.2 : Causalité des éléments bond graph.

A.4.2. Chemin causal

❖ Définition 1 : Un chemin causal dans une structure de jonction « *0, 1, TF ou GY* » est une alternance de liens et d'éléments de base « *R, C ou I* », appelés noeuds telle que tous les nœuds ont une causalité complète et correcte, et deux liens du chemin causal ont en un même noeud des orientations causales opposées. Suivant la causalité, la variable traversée est l'effort ou le flux. Pour changer cette variable il faut passer par un élément de jonction « *GY* », ou par un élément passif « *I, C ou R* ».

❖ Définition 2 : Un chemin causal est dit simple s'il est parcouru en suivant toujours la même variable.

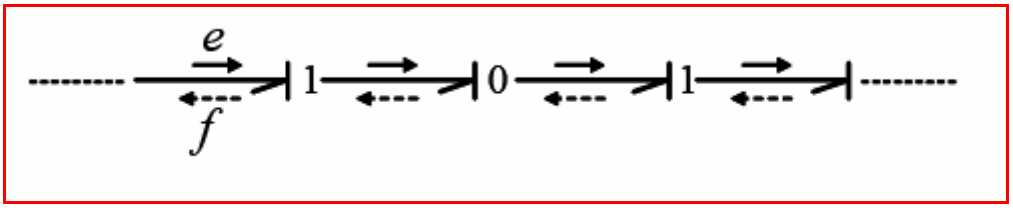


Figure A.12 : Chemin causal simple en suivant l'information « *e* » ou l'information « *f* ».

Il existe donc pour une même séquence de liens et de noeuds, deux chemins en suivant soit l'effort soit le flux (**Fig.A.12**).

❖ Définition 3 : Un chemin causal est mixte s'il faut changer de variable lors du parcours. C'est le cas en présence d'un GY, où le chemin est appelé mixte direct (**Fig.A.13**).

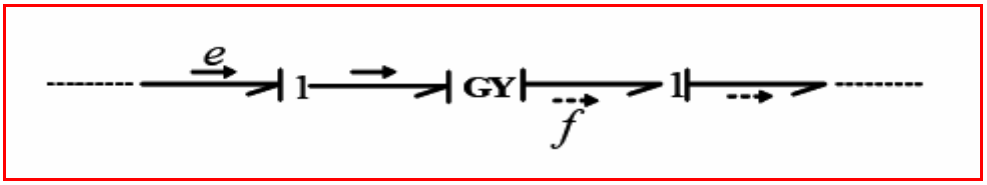


Figure A.13 : Chemin causal mixte direct

Ou lorsqu'il faut traverser un élément R, C ou I, ce qui correspond à un chemin mixte indirect (**Fig.A.14**).

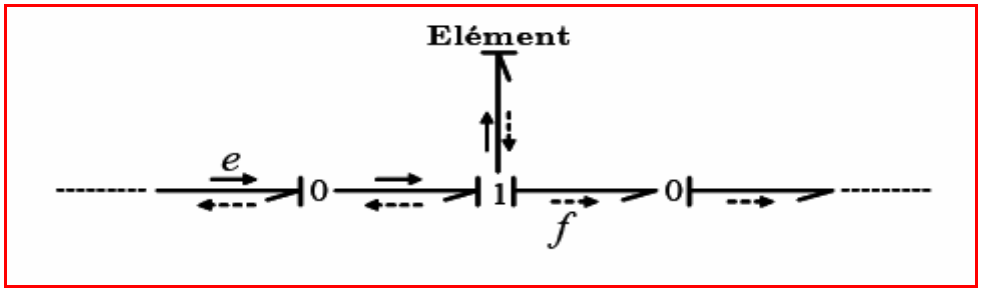


Figure A.14 : Chemin causal mixte indirect.

A.5. EQUATIONS D'ETATS ASSOCIEES AU MODELE BOND GRAPH

Le vecteur d'état, noté x, est composé des variables d'énergie p et q associées aux éléments « *I et C* ».

A.5.1. Propriétés des variables d'état

❖ Le vecteur d'état n'apparaît pas sur le bond graph, mais seulement sa dérivée:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_I \\ f_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_I \\ \dot{q}_C \end{bmatrix} \quad \text{.....(A.8)}$$

La dimension n du vecteur d'état x est égale au nombre d'éléments « *I et C* » en causalité intégrale,

❖ Si parmi les **n** éléments « *I et C* », $\mathbf{n_1}$ sont en causalité dérivée, alors l'ordre du modèle est égal à $(n - n_1)$ et le vecteur (x) se décompose en (x_i et x_d) (i pour intégrale et d pour dérivée).

A.6. OUTIL DE SIMULATION

Il existe plusieurs logiciels de modélisation et de simulation par bond graph. « *Symbols 2000, 20-Sim et Camp-G* » sont les plus connus et les plus utilisés. Parmi eux nous avons opté pour Symbols 2000 « *SYstem Modelling through BOnd graph Language and Simulation* » qui fonctionne sous l'environnement de C++ Builder.

Les caractéristiques principales du logiciel Symbols 2000 sont les suivantes :

1. Deux niveaux d'interconnexion sont pris en compte : le niveau des équations et le niveau graphique et structurel.
2. Adapte la causalité (en ajoutant ou en supprimant des capteurs, composants, etc.).
3. Traite les systèmes multi énergies et permet de créer des modèles dynamiques à partir du schémas technologique.
4. Introduit des défaillances dans le modèle.
5. Facilite le regroupement des sous modèles pour construire de nouvelles classes de composants.

Symbols 2000 contient plusieurs algorithmes d'intégration avancés, il garantit une simulation rapide et donne des résultats satisfaisants. La construction de tous les modèles dans un chemin graphique est réalisée d'une manière très facile par l'utilisation du module « *Bond Pad* », les sous modèles sont combinés dans un modèle global. Symbols 2000 contient des modèles génériques (capsules) qui permettent de construire un modèle complexe.

Symbols 2000 est composé des modules suivants :

- Le module BondPad :

C'est le premier module qu'un utilisateur doit rencontrer pour modéliser un système, la tâche entière de la modélisation est accomplie dans ce module.

Quand on ouvre BondPad, la fenêtre principale apparaît comme le montre (**Fig.A.15**). La zone d'objet contient les outils de dessin et de modification du modèle bond graph et contient aussi une bibliothèque de capsules. Les capsules et les outils disponibles dans la zone d'objet permettent de concevoir un modèle bond graph dans la zone de dessin.

La zone d'expression permet d'afficher les équations correspondantes au modèle bond graph.

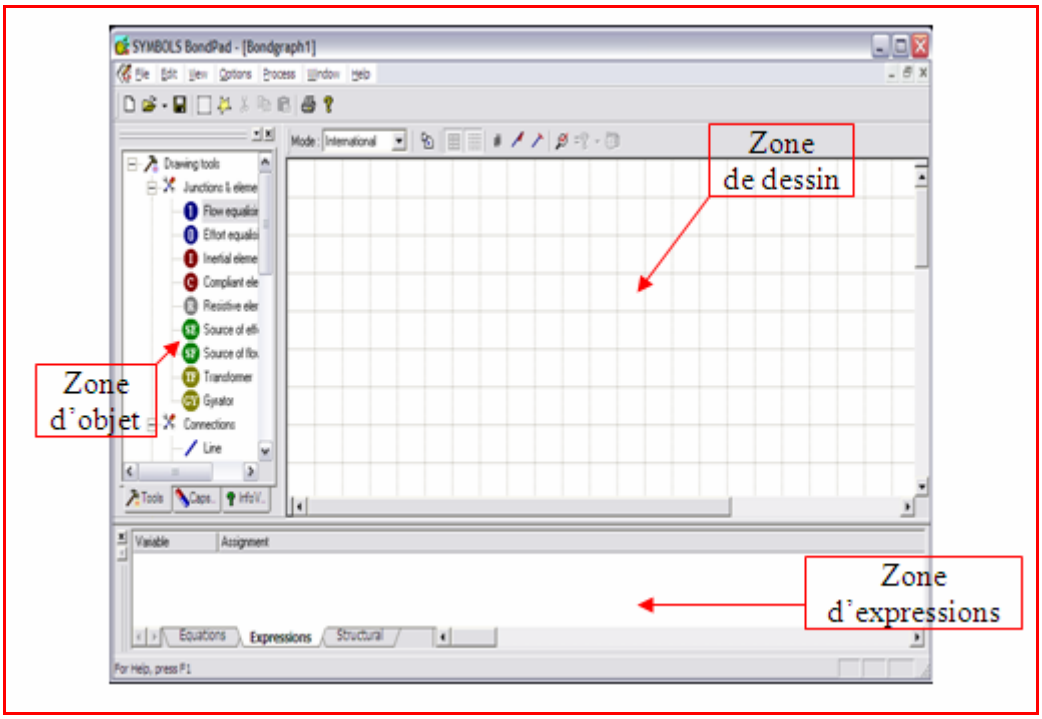


Figure A.15: Fenêtre du module « *BondPad* ».

- Le module du simulateur :

Le module du simulateur permet de résoudre les équations dynamiques dans lequel les utilisateurs peuvent intervenir pour la simulation. La fenêtre du simulateur est montrée ci-dessous:

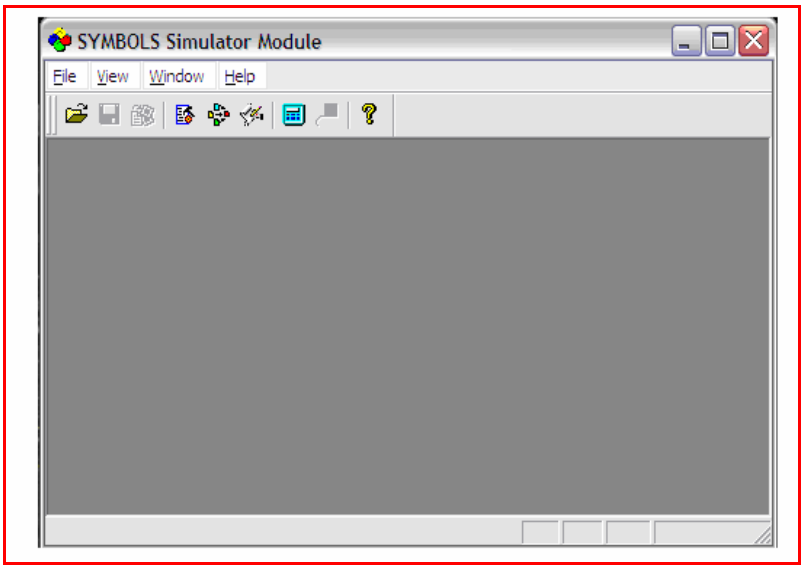


Figure A.16: Fenêtre du simulateur.

Le point d'entrée du simulateur est le fichier de définition de module « *fichier.sym* » généré à partir du module « *Bond Pad* ». Ce fichier doit être compilé pour créer un ficher

d'expérimentation du simulateur. Une fois la compilation démarrée, l'état de compilation, les messages d'erreurs et d'avertissement sont affichés par la fenêtre de compilation comme le montre la (**Fig.A.17**).

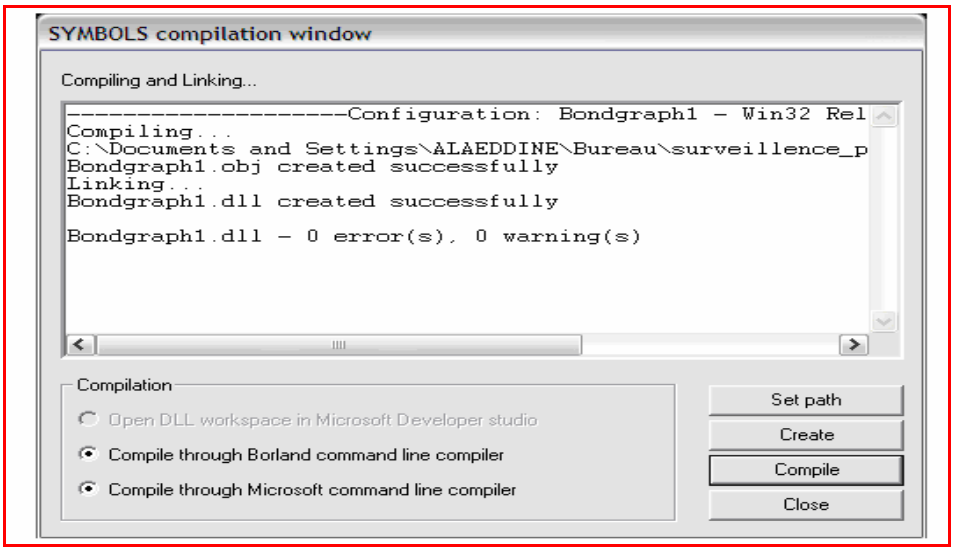


Figure A.17 : Fenêtre de compilation.

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

1. Affecter les valeurs des composants.
2. Affecter les valeurs initiales et les valeurs finales des courbes de simulation.

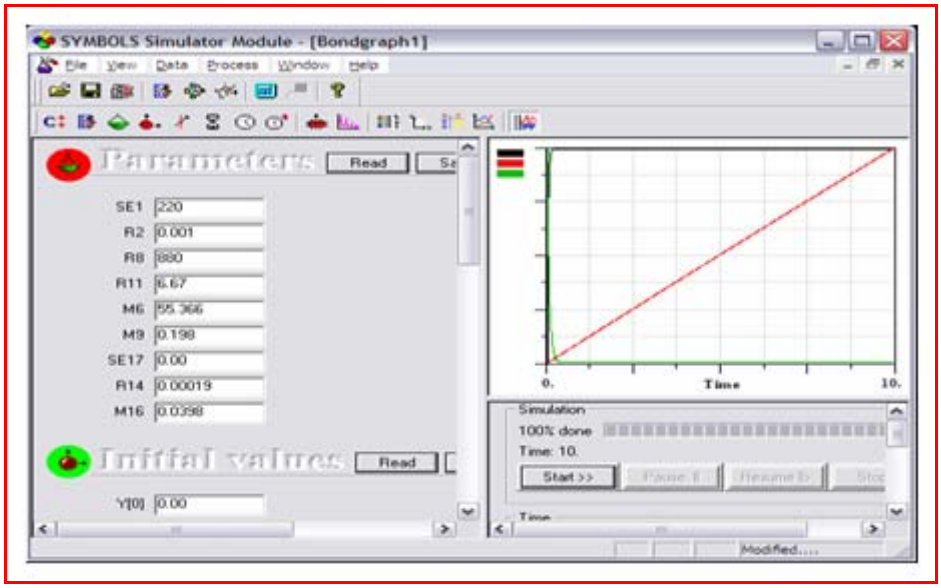


Figure A.18 : Fenêtre des courbes.

3. Appuyer sur la commande « *START* » pour faire la simulation. Les courbes tracées sont montrées dans la (**Fig.A.18**).

Notons que *SYMBOLS 2000* contient aussi un module de commande qui nous permet de faire l'analyse des systèmes linéaires continus ou discrets. Dans ce module le système étudié doit être décrit par sa fonction de transfert ou par son modèle d'état.

ANNEXE B

Matlab Simulink

B.1. INTRODUCTION

Matlab est une abréviation de « *Matrix Laboratory* ». Écrit à l'origine, en Fortran, par *C. Moler*, Matlab était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets « *LINPACK et EISPACK* ». La version actuelle, écrite en C par the MathWorks Inc., existe en version professionnelle et en version étudiant. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs plates formes: Sun, Bull, HP, IBM, compatibles PC (DOS, Unix ou Windows), Macintoch, iMac et plusieurs machines parallèles.

Matlab est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

Matlab est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de Matlab permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de Matlab, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits. L'approche ouverte de Matlab permet de construire un outil sur mesure. On peut inspecter le code source et les algorithmes des bibliothèques de fonctions « *Toolboxes* », modifier des fonctions existantes et ajouter d'autres.

Matlab comprend aussi un ensemble d'outils spécifiques à des domaines, appelés Toolboxes (Boîtes à Outils). Indispensables à la plupart des utilisateurs, les Boîtes à Outils sont des collections de fonctions qui étendent l'environnement Matlab pour résoudre des catégories spécifiques de problèmes. Les domaines couverts sont très variés et comprennent notamment le traitement du signal, l'automatique, l'identification de systèmes, les réseaux de neurones, la logique floue, le calcul de structure, les statistiques, etc.

Matlab fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal.

En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées « *Toolboxes* ».
- « *Simulink* », un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas blocs et de Simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs « *Simulink* » **«**spécialisés « *Blocksets* ».
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur,...
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le « *DSP Workshop* **».**

B.2. ESPACE DE TRAVAIL MATLAB

La figure ci-dessous représente la fenêtre principale de travail du logiciel Matlab. Elle est constituée de cinq parties essentielles qui sont :

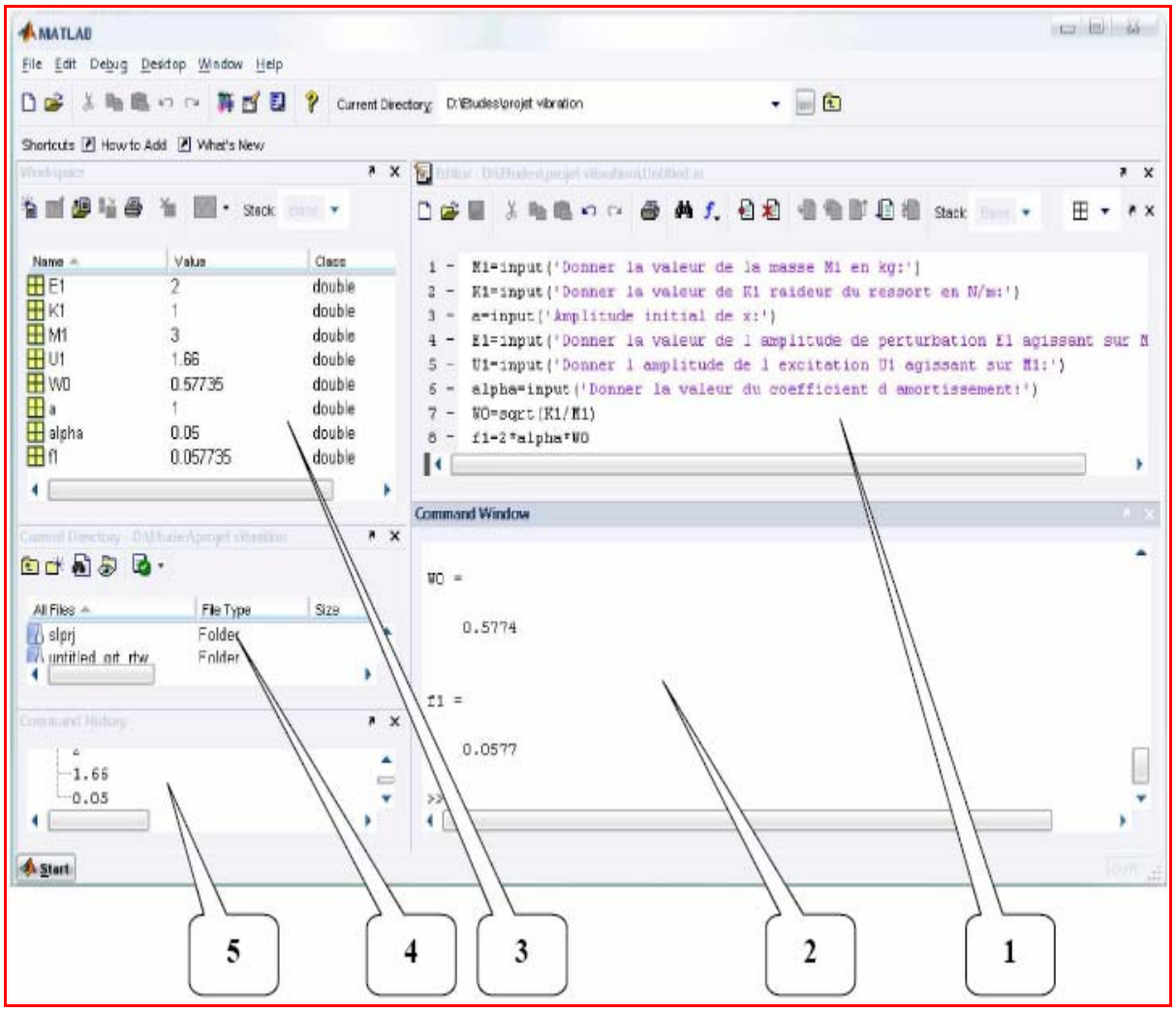


Figure B.1 : Fenêtre de travail Matlab.

1) L'éditeur ou « *debugger* » est utilisé pour créer, éditer et debugger les fichiers Matlab (fonctions ou scripts)
2) La console de commande permet de lancer les fonctions et les scripts Matlab
3) L'explorateur de l'espace de travail permet de manipuler, organiser et tracer les différentes variables utilisées
4) Le navigateur du répertoire courant permet la maintenance des fichiers
5) L'historique des commandes permet de voir ou de rejouer les commandes précédentes

B.3. PRESENTATION DE SIMULINK

Pour démarrer Simulink il suffit de taper Simulink dans l'espace de travail de Matlab ou de cliquer sur l'icône comme il est illustré ci-dessous :

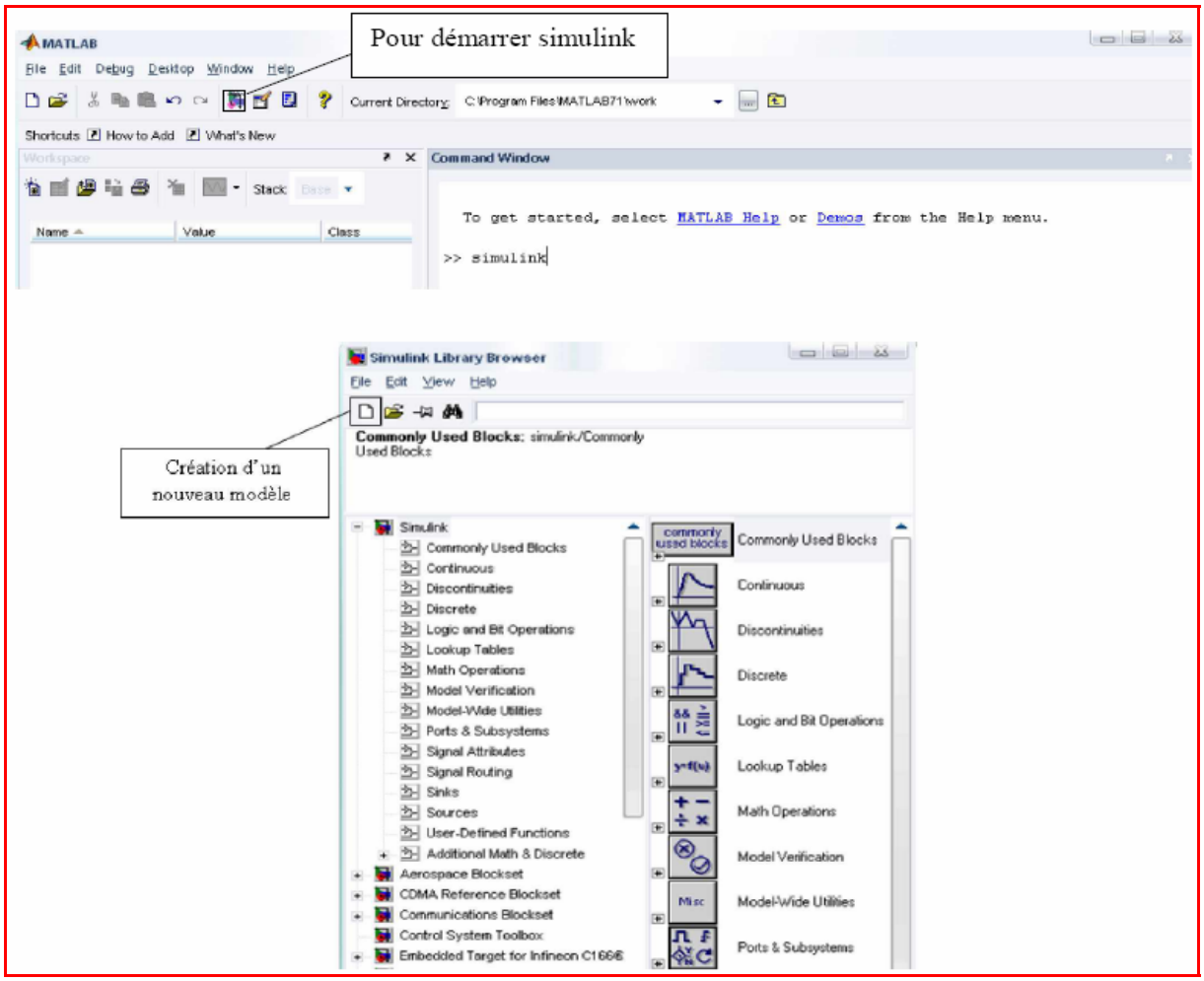


Figure B.2 : Fenêtre de travail Simulink.

En cliquant sur l'icône « *création d'un nouveau modèle* » on aura une nouvelle page modèle ou on peut glisser les blocks à partir de « *Simulink Library* »

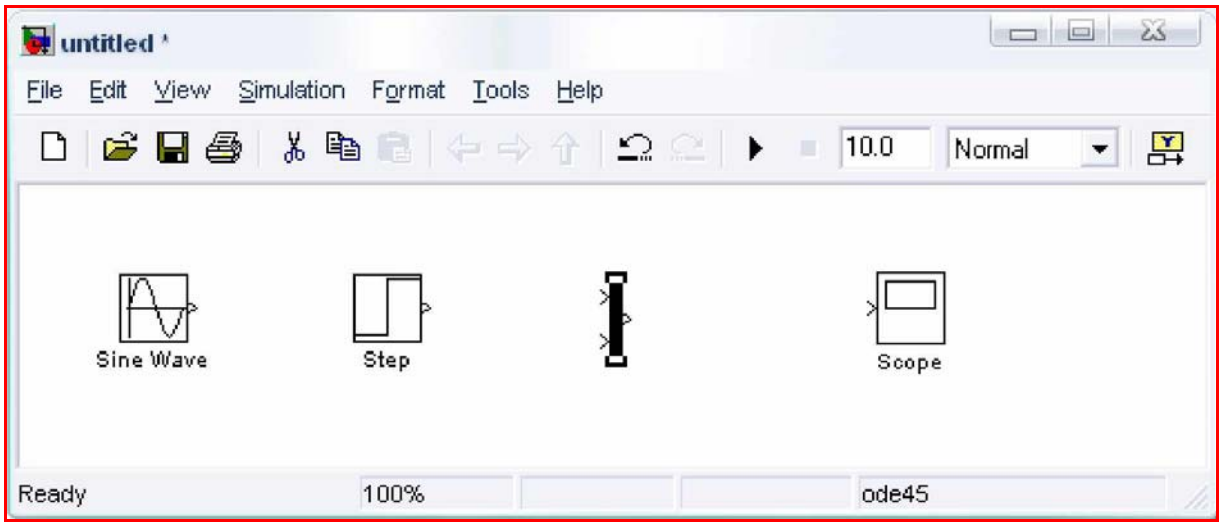


Figure B.3 : Glissement des blocs sur la fenêtre du projet Simulink.

B.3.1. Exemple simple

Après le glissement des blocks, on fait la liaison entre ces derniers à l'aide de la sourie.

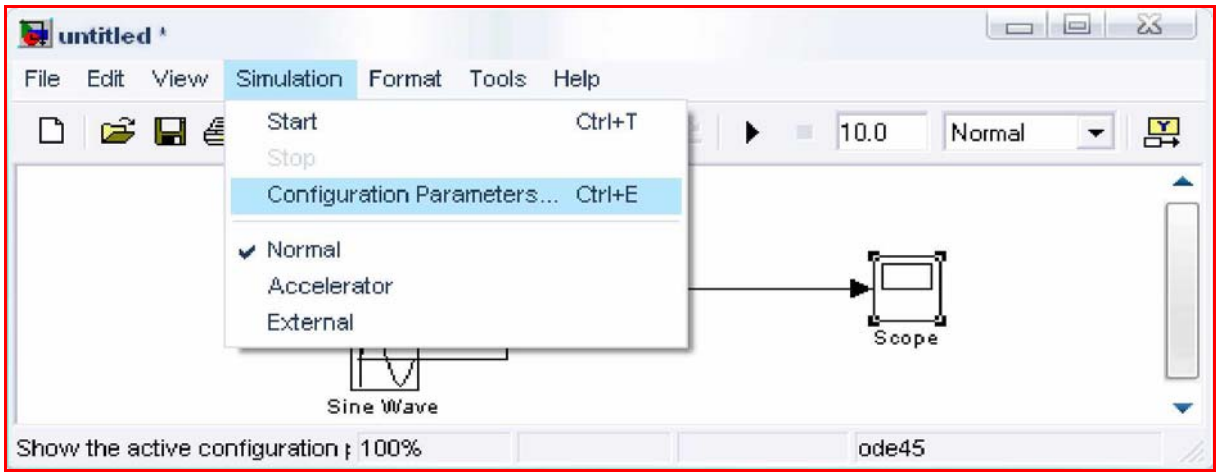


Figure B.4 : Liaison des blocs.

Remarque : *Avant de commencer la simulation, il faut régler d'abord les paramètres de la Simulation comme ce qui est expliqué ci-dessus, en cliquant sur « Simulation paramètres » on aura le block suivant :*

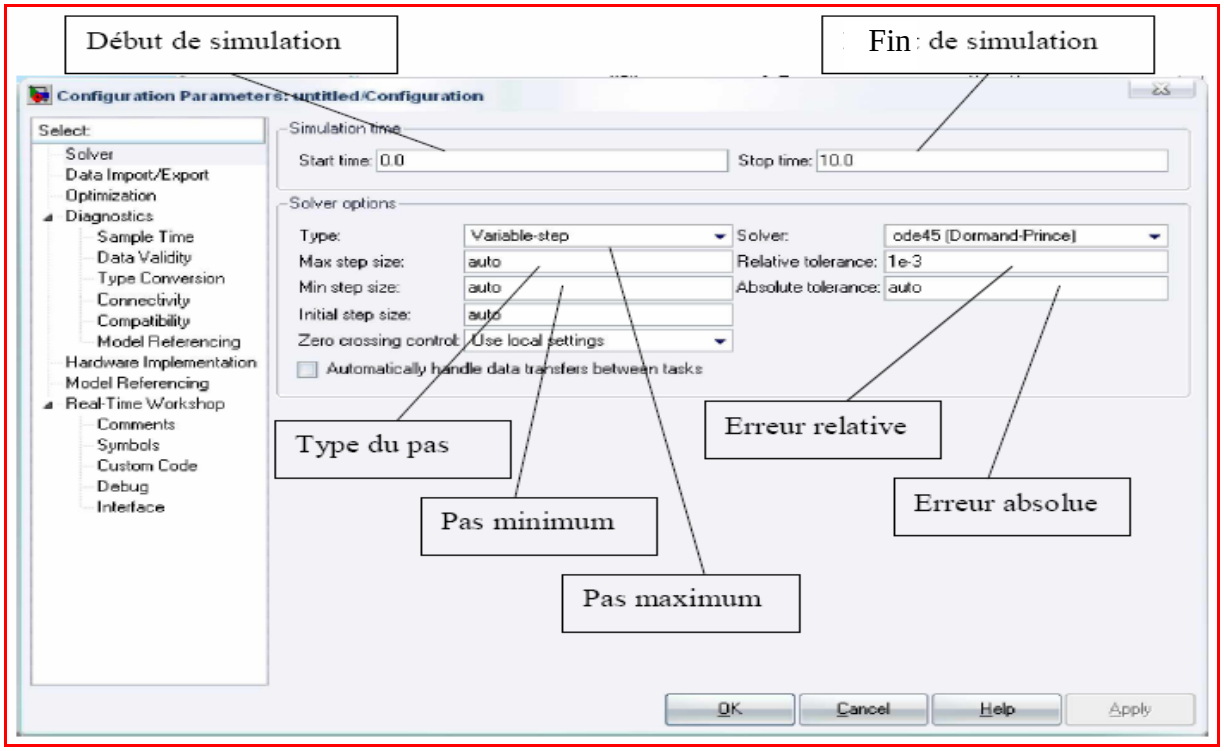


Figure B.5 : Fenêtre des paramètres généraux de simulation.

Le réglage des paramètres de chaque block est indispensable, il se fait de la manière suivante :

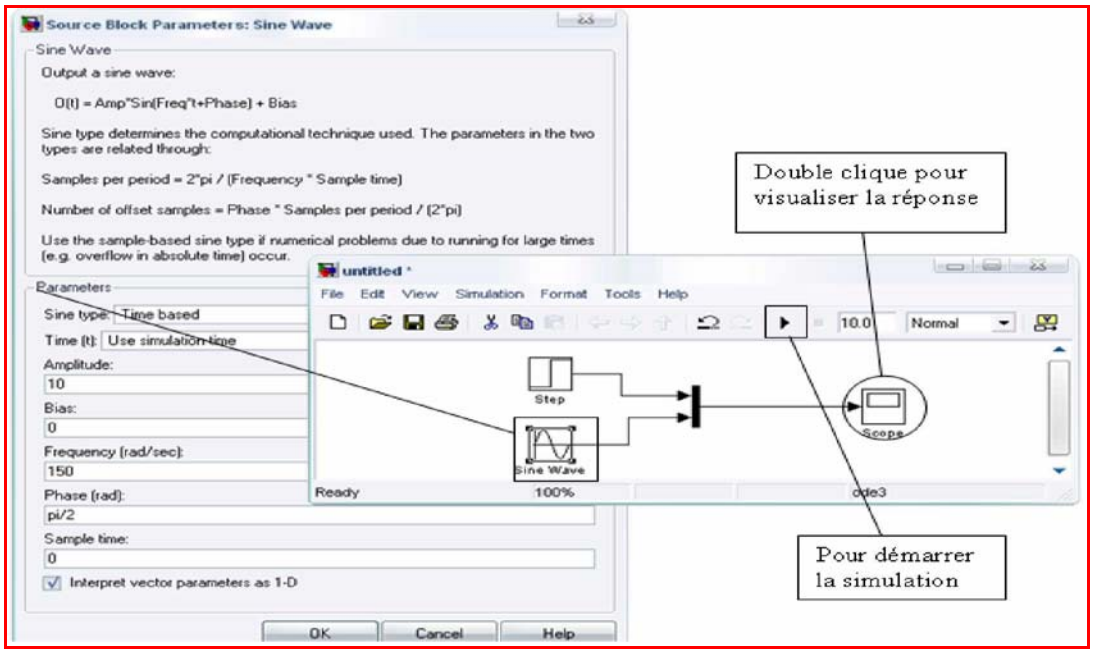


Figure B.6 : Fenêtre des paramètres propres aux blocs.

Après le réglage, on clique sur « *play* » pour visualiser la réponse du système sur le scope, comme suit :

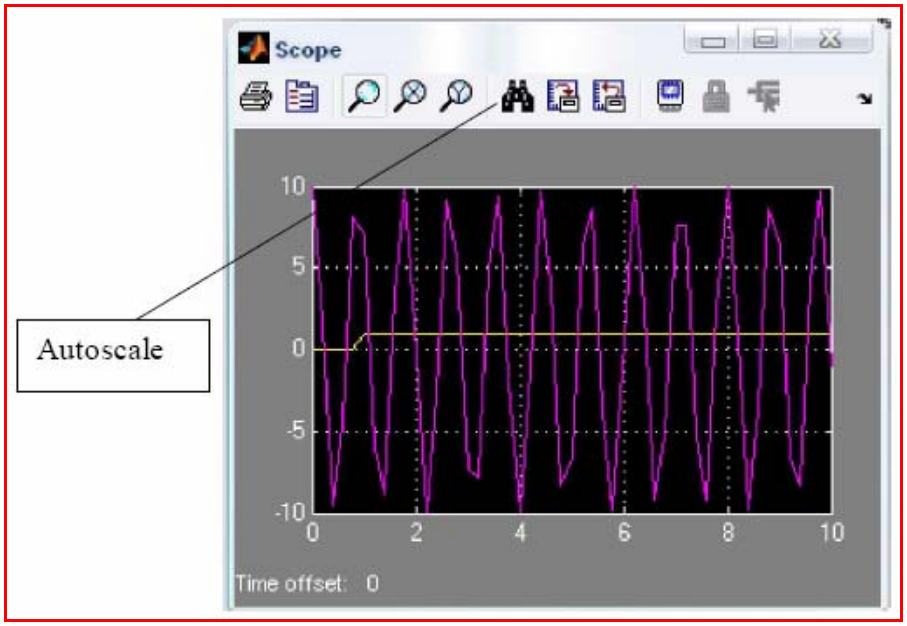


Figure B.7 : Fenêtre d'affichage du scope.

Si par exemple nous avons obtenu une réponse non claire on peut utiliser la commande « *autoscale* » en cliquant sur le scope par le bouton droit de la sourie ou utiliser l'icône autoscale sur la barre de menu comme le montre la figure (**fig. B.7**).

BIBLIOGRAPHIE

[1] P. Abati : Circuit magnétiques des machines. Académie d'Aix Marseille France 2002.

[2] A. Achir : Contribution à l'étude de la propriété de platitude sur des modèles bond graphs non linéaires. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.

[3] R. Abdessemed et al : Modélisation des machines électriques. Université de Batna, 1997.

[4] D. Arzelier : Représentation et analyse des systèmes linéaires. LAAS-CNRS, http://www.laas.fr/˜arzelier.

[5] P. Borne et al : Modélisation et identification des processus Tome 2. Technip, Paris, 1992.

[6] F. Bernot : Machine a courant continu « constitution et fonctionnement ». Technique de l'ingénieur, D3556 ; D3555.

[7] F. Busson : Les bond graphs pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2002.

[8] G. Dauphin Tanguy : Les bond graphs en mécatronique. Les Techniques de l'Ingénieur n° S7222.

[9] G. Dauphin Tanguy: Les bond graphs. Paris, Hermès Science Publication Paris, 2000.

[10] B. Decotte : Identifiabilité structurelle de modèles bond graphs. Thèse de Doctorat Université de Lille 1, 2002.

[11] L. J. De Miguel et al : 'Fuzzy logic-based decision-making for fault diagnosis in a DC motor'. Engineering Applications of Artificial Intelligence.Vol.18. pp. 423-450, 2005.

[12] I. Dif et al : Détection et localisation des défauts par l'approche bond graph. Premier congrès international sur le génie électrique, CIGE'04, 206-210, Sétif, Algérie, 10-12 Octobre, 2004.

[13] M. Djeziri : Diagnostic des systèmes incertains par l'approche bond graph. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2007.

[14] W. Elosta : Surveillabilité structurelle et platitude pour le Diagnostic des modèles bond graphs couplés. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.

[15] G. Gandanegara : Méthodologie de conception systémique en Génie Électrique à l'aide de l'outil Bond Graph. Application à une chaîne de traction ferroviaire. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 2003.

[16] C. Ghiaus: Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. ELSEVIER Energy and Buildings 30, (1999) 221–232.

[17] M. Hubin: Moteur à courant continu. CNRS France, 2003.

[18] K. Hsing-Chia et al: 'A new symbiotic evolution-based fuzzy- neural approach to fault diagnosis of marine propulsion systems.'. Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.17. pp. 919-930, 2004.

[19] M. Khemliche et al: Sensor placement for component diagnostability using bond graph. ELSEVIER Sensors and Actuators A 132, (2006) 547–556.

[20] M. Kostenko et al : Machines électriques. Edition : Moscou, 1979.

[21] P. Lautier: Modélisation des convertisseurs à découpage pour la conception et la commande : Application à l'onduleur. Thèse de Doctorat université de Lyon 1, 1998.

[22] K. Medjaher : Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels. Thèse de Doctorat. Université de Lille 1, 2005.

[23] A. Molina : Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 2005.

[24] W. Nuninger : Stratégie de diagnostic robuste à l'aide de la redondance analytique. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine, 1997.

[25] B. Ould Bouamama et al: Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. ELSEVIER Control Engineering Practice 13, (2005) 875–891.

[26] J. Richalet : Modélisation et identification des processus. Les Techniques de l'Ingénieur n° R7140.

[27] M. Rivera : Modélisation des systèmes dynamiques à topologie variable. Thèse de Doctorat. Université de Lyon 1, 2005.

[28] A. P. Rothstein et al : 'Cause and effect analysis by fuzzy relational equations and a genetic algorithm'. Reliability Engineering and System Safety, 2005.

[29] A.K. Samantaray et al: Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation. ELSEVIER Simulation Modelling Practice and Theory 14, (2006) 237–262.

[30] K. Sia et al: Bond graph: a suitabule tool for component faults diagnosis. http://www.scs.org/archives/authors.

[31] S. Taouaf : Diagnostic logique des systèmes complexes dynamiques dans un contexte multi agent. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble 1, 2005.

[32] R. Toscano : Commande et diagnostic des systèmes dynamiques. Ellipses, Paris, 2005.

[33] M. Vergé et al : Modélisation structurée des systèmes avec les bond graphs. Technip, Paris, 2004.

[34] M. Vergé : Modélisation pour l'ingénieur : Approche par bond graph. 6ème congrès européen de science des systèmes 19-22 septembre 2005.

[35] G. Zwingelistein : Diagnostic des défaillances. Hermès, Paris, 1995.

ملخص : حاليا تشخيص الأعطاب شيء أساسي لصيانة وفعالية الأنظمة و كذلك لحماية المحيط و المحافظة عليه. هذه المذكرة تهتم بكشف و حصر أعطاب المحرك ذو التيار الكهربائي المستمر باستخدام طريقة خطوط الربط, هذه الطريقة استخدمت للحصول على نموذج الظاهرتين الكهربائية و الميكانيكية للمحرك , إن استعمال الخصائص البنيوية و السببية مكننا من استخراج البواقي. لضمان مراقبة المحرك بأقل عدد ممكن من الملتقطات استعملنا خوارزمية لوضعها. الهدف من وراء استخدام طريقة خطوط الربط هو استعمال نفس المنهجية للحصول على النموذج و البواقي ووضع الملتقطات.

كلمات رئيسية: تصميم, وضع الملتقطات, عملية الحصول على النموذج, تصنع, المراقبة, خطوط الربط.

Résumé : Le diagnostic de défauts est aujourd'hui primordial pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes ainsi que pour la sécurité ou la protection de l'environnement. Ce mémoire porte sur la détection et la localisation des défaillances du moteur a courant continu par l'approche bond graph. Cette approche est utilisée pour modéliser les phénomènes électrique et mécanique du moteur. L'utilisation des propriétés structurelles et causales de l'outil bond graph nous permet la génération des relations de redondance analytique (résidus ou indicateurs de défaut). On s'intéresse aux défauts du processus, on utilise un algorithme de placement de capteurs qui assure la surveillance du processus avec le minimum de capteurs. Le but de l'utilisation de l'outil bond graph est d'utiliser le même outil pour la modélisation, la génération des RRAs et le placement de capteurs.

Mots clés : Conception, Placement de capteurs, Modélisation, Simulation, Surveillance, Bond Graph.

Abstract: The diagnosis of faults is today primordial for reliability, the availability, the maintainability and the efficiency of systems and so for the security or the environment protection. This work relates to detection and localization of the DC motor failures by bond graph approach. This approach is used for modelling the electric and mechanic phenomenons of this motor. The uses of the structural and causal properties of bond graph tool allow to the generation of the analytical redundancy relations (residuals or fault indicators). We are interested in the faults of the process; we used an algorithm of sensors placement for the monitoring of the process with optimal number of sensors. The aim of the use of the bond graph tool is from the same tool we assure the modelling, the ARR generation and the sensors placement.

Key words: Conception, Sensors placement, Modelling, Simulation, Surveillance, Bond graph.