



République Algérienne
Démocratique et Populaire
Ministère d'Enseignement Supérieure
et de la Recherche Scientifique

Université de Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique et
Électronique
Laboratoire d'Automatique de
Tlemcen



MEMOIRE

Pour l'obtention du :
Diplôme de MASTER en :
Automatique

Option :
Automatique et informatique industrielle

présenté par :
BELOUFA Anes
DAHMANE Sami Riad

Thème :

Analyse d'un système physique par l'approche bond-graphs

Soutenu le 28/06/2021, devant la commission d'examen :

Mr BENYAHIA Boumediene
Mme BENALLEL Mounira
Mr MELIANI Mohammed

Président
Encadrante
examinateur



DEDICATION

*Je dédie ce travail
A ma chère Maman Louiza
A mon chère Papa Mabrouk
Et a ma Tante Ouardia
Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre
ce jour
A mon frère et mes sœurs
Alae Eddin, Sara et Selma
Et a tous les gens qui m'aiment
Rashid, Bouji, Mustapha, Anes, Hamid ...*

DAHMANE Sami Riad



DEDICATION

A tous qui de près et de loin m'ont accordé leur soutien moral et physique
pour la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail

*A mes chers parents jamais je ne saurais m'exprimé quant aux sacrifices et
aux dévouements que vous consacrés à mon éducation et mes études.*

Que Dieu vous garde afin que votre regard puisse suivre ma destinée.

*Mes chers frères : Zakaria, Mustapha et Ismail pour leur grand amour et
leur soutien qu'ils trouvent ici l'expression de ma haute gratitude.*

*À mes amis : Messirdi mohamed , Tabti Nadir avec qui j'ai partagé des
moments des plus agréables.*

*A tous qui de près et de loin m'ont accordé leur soutien moral et physique
pour la réalisation de ce travail.*

BELOUFA Anes



REMERCIEMENT

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

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

Au Terme de ce travail, nous voudrions aussi adresser nos sincères remerciements à Mme M. Benallel pour son encadrement et son encouragement et surtout sa gentillesse au long de ce projet. Nous tenons, également à remercier les membres du jury.

Beloufa Anes

Dahmane Sami Riad



TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 Diagnostic des défauts dans un système automatisé	2
1.1 Introduction	3
1.2 Le Système automatique	4
1.2.1 Présentation générale	4
1.2.2 Chaîne d'information	5
1.3 Diagnostic	5
1.3.1 La problématique du diagnostic dans les systèmes	5
1.3.2 Terminologie du diagnostic	6
1.3.3 Surveillance et diagnostic	7
1.3.3.1 Surveillance	8
1.3.3.2 Détection	8
1.3.3.3 Diagnostic	8
1.3.3.4 Localisation de défauts	9
1.3.3.5 Types défauts	9
1.3.3.6 Mode de fonctionnement	11
1.4 Classification des méthodes de diagnostic	12
1.4.1 Méthodes sans modèles	13
1.4.1.1 La méthode du seuillage	13
1.4.1.2 Les méthodes statistiques	13
1.4.1.3 La reconnaissance des formes	13
1.4.1.4 Les systèmes experts	14
1.4.2 Méthodes à base de modèles	14
1.4.2.1 Critères des méthodes de diagnostic à base de modèles	16
1.4.2.2 Approches de diagnostic centralisés, décentralisés et distribués	16
1.4.2.3 Diagnostic hors-ligne/en-ligne	16
1.4.2.4 L'analyse diagnostic avec modèle	17
1.5 Conclusion	18
2 Bond graph	19
2.1 Introduction	20

TABLE DES MATIÈRES

2.2	Bond graph	20
2.3	Eléments de base du langage Bond graph	21
2.3.1	Eléments passifs	23
2.3.1.1	Résistance R	23
2.3.1.2	Capacité C	24
2.3.1.3	L'élément I	25
2.3.2	Eléments actifs	26
2.3.3	Jonctions	26
2.3.3.1	Jonction 0	27
2.3.3.2	Jonction 1	28
2.4	La causalité	29
2.4.1	Notion de causalité	29
2.4.2	Règles d'affectation de la causalité	30
2.4.3	Chemin causal	32
2.5	Conclusion	34
3	Analyse d'un moteur à courant continu	35
3.1	Introduction	36
3.2	moteur à courant continu	38
3.2.1	Introduction	38
3.2.2	Les Composants de MCC	38
3.2.2.1	Le rotor/induit	38
3.2.2.2	Le collecteur	39
3.2.2.3	Balais	39
3.2.2.4	Stator/L'inducteur	40
3.2.3	Principe de fonctionnement	40
3.2.4	Les types d'excitation	42
3.2.4.1	Moteur à excitation indépendante	42
3.2.4.2	Moteur à excitation en dérivation ou shunt	42
3.2.4.3	Moteur à excitation en série	43
3.2.4.4	Moteur à excitation composée	43
3.2.4.5	Moteur à aimants permanents	44
3.2.5	Résumé sur les types de moteur à courant continu	44
3.3	Application MATLAB	46
3.3.1	Introduction	46
3.3.2	Les moteurs à courant continu à excitation séparée	46
3.3.2.1	Fonctionnement	46
3.3.2.2	Le bilan de puissance	47
3.3.3	Application	48
3.3.3.1	Equations mécaniques	49
3.3.3.2	Paramètre moteur	49
3.3.4	Simulation simulink	49
3.4	Application SYMBOLS SHAKTI	53

TABLE DES MATIÈRES

3.4.1	Modalisation par Bond graph	53
3.4.2	Symbols shakti	53
3.5	Comparaison	61
3.6	Génération des indicateurs de fautes	62
3.6.1	Algorithme	62
3.6.1.1	La génération des RRAs	63
3.6.1.2	Matrice de signature des défaillances	64
3.6.1.3	Les RRA's du Moteur mce série model bond graph	66
3.6.1.4	Les capsules	67
3.7	Conclusion	78
	CONCLUSION GÉNÉRALE	79
	ANNEXES	81
	BIBLIOGRAPHIE	83

LISTE DES FIGURES

1.1	Système automatique	4
1.2	Chaîne automatisé	5
1.3	Localisation de défauts	9
1.4	L'effet de différents types de défauts capteur sur les mesures.	10
1.5	Représentation graphique des défauts actionneur les plus répandues	11
1.6	Une classification des méthodes de diagnostic	12
1.7	Principe des méthodes de diagnostic avec modèles	14
2.1	Représentation graphique de R	23
2.2	Représentation graphique de C	25
2.3	Représentation graphique de I	26
2.4	éléments actifs : a-source d'effort et de flux , b- sources	27
2.5	Jonction parallèle ou jonction 0	27
2.6	jonction 0 système électrique	28
2.7	jonction série ou jonction 1	28
2.8	Jonction 1 : a- sys mécanique. b- sys électrique. c- sys hydraulique.	29
2.9	Causalité	30
2.10	Causalité en bond graph	30
2.11	Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.	32
2.12	Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.	32
2.13	Chemin causal mixte indirect.	32
2.14	chaîne d'actions	33
2.15	Boucle causal en suivant l'effort ou le flux	33
2.16	Maille	33
3.1	Schéma de principe de la supervision	37
3.2	Représentation bond graph d'un système de surveillance	37
3.3	L'induit	38
3.4	Collecteur	39
3.5	Collecteur	39
3.6	L'inducteur	40
3.7	Le champ magnétique rotatif qui entraîne l'induit en rotation	41
3.8	La bobine	41
3.9	Schéma électrique excitation séparée	46
3.10	Le bilan de puissance	48

3.11	Modèle Matlab du MCC à excitation séparée	50
3.12	Simulation du MCC à excitation séparée (a vide).	51
3.13	Simulation du MCC à excitation séparée (a charge)	52
3.14	Modèle bond graph du MCC à excitation séparée	54
3.15	programme pour générer des équations de notre modèle une simple clique	54
3.16	SYmbols shakti	55
3.17	étape 1 - simulation	56
3.18	étape 2 - simulation	56
3.19	étape 3 - simulation	57
3.20	étape 4 - simulation	57
3.21	étape 5- simulation	58
3.22	Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (à vide)	59
3.23	Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (en charge)	60
3.24	Moteur mcc série model bond graph	64
3.25	Capsule de la source	67
3.26	Capsule d'inducteur	67
3.27	Capsule d'induit	68
3.28	Capsule de gyrateur	68
3.29	Capsule pour la partie mecanique	68
3.30	Capsule de la charge	69
3.31	Le model du moteur MCC par Fdipad	69
3.32	la matrice de signature default	70
3.33	Modèle bond graph du résidu R1	70
3.34	Modèle bond graph du résidu R2	71
3.35	Modèle bond graph du résidu R3	71
3.36	Modèle bond graph du résidu R4	72
3.37	Réponses des résidus sans défauts	72
3.38	la réponse des résidus à la défaillance de « GY »	73
3.39	La réponse des résidus à la défaillance de « Le »	74
3.40	La réponse des résidus à la défaillance de « La »	74
3.41	La réponse des résidus à la défaillance de « J »	75
3.42	La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de couple»	76
3.43	La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de courant d'induit»	76
3.44	La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de courant de l'inducteur»	77
3.45	La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de vitesse»	77



LISTE DES TABLEAUX

2.1	variables généralisées pour différents domaines physiques	21
2.2	éléments bond graph	22
2.3	Résistance linéaire de l'élément R	24
2.4	Conformité de l'élément C linéaire	24
2.5	Inertance linéaire de l'élément I	25
2.6	Causalité des éléments bond graph	31
3.1	Paramètres utiliser pour la simulation du MCC à excitation séparée	49

TABLEAU DES ABREVIATIONS

<i>SA</i>	Système automatique
<i>PC</i>	Partie commande
<i>PO</i>	Partie opérative
<i>SH</i>	Système hybride
<i>I</i>	Élément inertiel
<i>C</i>	Élément de capacité
<i>R</i>	Élément résistif
<i>TF</i>	Transformateur
<i>MTF</i>	Transformateur modulé
<i>GY</i>	Gyrateur
<i>MGY</i>	Gyrateur modulé
<i>MSF</i>	Matrice de signature des fautes
<i>BG</i>	Bond Graph
<i>IA</i>	Intelligence Artificielle
<i>FDI</i>	Fault Detection and Isolation
<i>FTC</i>	Fault Tolerant Control
<i>RRA</i>	Relation de Redondance Analytique
D_e	Détecteur d'effort
D_f	Détecteur de flux
S_e	Source d'effort
S_f	Source de flux
$e(t)$	l'effort
$f(t)$	le flux
D_b	DéTECTABILITÉ
I_b	ISOLABILITÉ
<i>f.c.e.m</i>	force contre-électromotrice

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 d'un système par l'approche BG, que nous avons appliquée sur un moteur à courant continu. 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). 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.

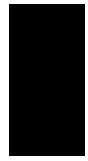
Mots clés : Conception, Placement de capteurs, Modélisation, Simulation, Surveillance, Bond Graph.

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.



INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

Les systèmes modernes d'ingénierie des processus sont multidisciplinaires. Les processus sont composés de sous-systèmes ou de parties en interaction provenant de différentes disciplines, ces interactions d'un processus sont souvent complexes, l'amélioration de la sûreté de fonctionnement de ces systèmes repose essentiellement sur les algorithmes de détection et d'isolation des défauts, connus sous l'expression anglaise FDI « Fault Detection and Isolation », qui consistent principalement à comparer le comportement réel du système avec des comportements de référence décrivant le fonctionnement normal (pour la détection des défauts), ou décrivant différents genres de défauts (pour l'analyse et l'isolation des pannes), tout en minimisant les fausses alarmes, les non détections ainsi que les retards dans la détection des défauts.

La dégradation des performances des algorithmes de surveillance est principalement due à la connaissance imparfaite des valeurs paramétriques des modèles et à leurs variations aléatoires.

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

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

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

D'abord, Le premier chapitre présente les principes de base du diagnostic et les différentes étapes de diagnostic pour un système, Les classification des méthodes

de diagnostic (quantitative et qualitative) notamment le diagnostic à base de bond graph. Puis, le deuxième chapitre présente la modélisation par bond graph, Ces concepts et définitions, Les différents éléments et composants. Enfin le dernier chapitre présente une théorie sur la machine à courant continu qui est l'application de notre travail, Ensuite la simulations du modèle du moteur à courant continu à excitation séparée par Matlab Simulink, la modélisation bond graph du moteur à courant continu avec excitations séparée ainsi que leur simulation, en plus la surveillance de ces moteur notamment placement de capteur ,génération des RRAs, et la matrice de signature de fautes en utilisant le logiciel Symbols Shakti, Et enfin une comparaison entre les deux simulations.

Diagnostic des défauts dans un système automatisé

Sommaire

1.1	Introduction	3
1.2	Le Système automatique	4
1.2.1	Présentation générale	4
1.2.2	Chaîne d'information	5
1.3	Diagnostic	5
1.3.1	La problématique du diagnostic dans les systèmes	5
1.3.2	Terminologie du diagnostic	6
1.3.3	Surveillance et diagnostic	7
1.4	Classification des méthodes de diagnostic	12
1.4.1	Méthodes sans modèles	13
1.4.2	Méthodes à base de modèles	14
1.5	Conclusion	18

1.1 Introduction

Durant ces dernières décennies, l'automatisation des systèmes industriels vise à augmenter les performances de production ainsi que la qualité du produit à travers sa traçabilité et la diminution des coûts de sa fabrication. Dans ce contexte, les systèmes de surveillance des équipements industriels jouent un rôle important pour maintenir la disponibilité des machines et les lignes de production. Un système de surveillance observe en continu l'évolution des équipements à travers des données quantifiables et qualifiables collectées à partir du système surveillé. Ces données permettent de signaler au bon moment à l'opérateur les écarts détectés par rapport au comportement nominal prévu. Ceci permettra de mettre en œuvre les actions préventives et correctives. Plusieurs chercheurs ont abordé la thématique de la surveillance industrielle mettant ainsi en évidence l'intérêt manifesté par la communauté scientifique ainsi que les industriels par rapport à cette problématique. Les approches de surveillance sont généralement divisées en deux catégories : les approches de surveillance avec modèles et les approches de surveillance sans modèles. Les premières se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent généralement les techniques de l'automatique [10]. Dans la deuxième catégorie de méthodologies, le modèle du procédé est inexistant ou difficile à obtenir, et elles se basent ainsi sur des techniques statistiques ou issues du domaine de l'Intelligence Artificielle (IA). L'objectif de ce chapitre est de présenter les concepts fondamentaux liés au diagnostic et à la surveillance des systèmes automatisés. Dans un premier temps, dans la littérature de la surveillance et du diagnostic, on peut trouver plusieurs définitions quelquefois divergentes. C'est la raison pour laquelle nous donnons les définitions des mots clés nécessaires pour la compréhension de ce mémoire. Enfin, nous présentons une classification non exhaustive des méthodes de diagnostic des défauts rencontrées dans la littérature.

1.2 Le Système automatique

Les besoins croissants en termes de qualité et de disponibilité des systèmes industriels, durant ces dernières décennies, ont fortement participé au développement du processus d'automatisation des systèmes industriels. Cette automatisation vise à augmenter les cadences de production tout en réduisant le temps de maintenance et gardant une certaine flexibilité pour pouvoir s'adapter à la production des nouveaux produits.

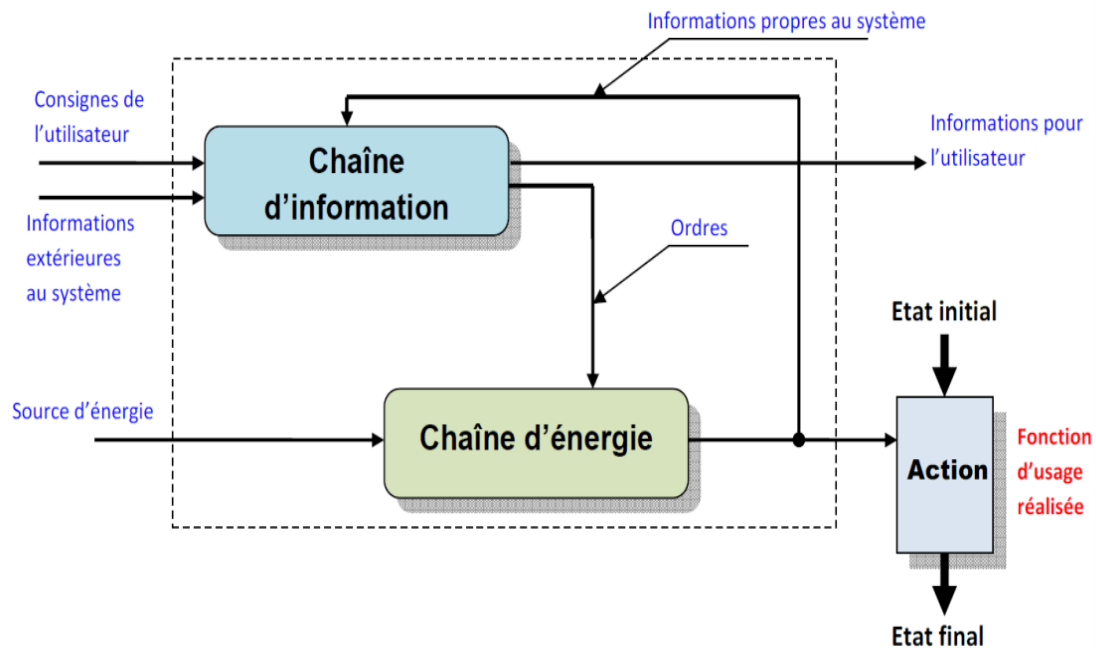


FIGURE 1.1: Système automatique

1.2.1 Présentation générale

D'une manière générale, un système est un ensemble d'éléments en interaction organisé dans un environnement avec lequel il interagit pour réaliser une fonction qui lui est attribuée. Un Système Automatisé permet de remplir, de manière automatique, des fonctions, répondant à certains besoins spécifiques, précédemment assurées par l'homme. Comme il est illustré dans la figure 2.1, inspirée de, un système automatisé est composé d'une Partie Commande (PC) et d'une Partie Opérative (PO).[1]

La partie commande n'est autre que la logique de fonctionnement du processus que l'on veut automatiser. Elle envoie des ordres à la PO et permet la communication avec l'opérateur. Les deux composantes principales de cette partie concernent la supervision (le pilotage) et la surveillance (le suivi). La fonction de surveillance permet de vérifier le bon fonctionnement d'un équipement ou le bon déroulement d'un procédé. La partie opérative exécute les ordres envoyés par la PC à l'aide d'actionneurs et lui communique les informations collectées à partir de capteurs, autrement dit les compte-rendus.

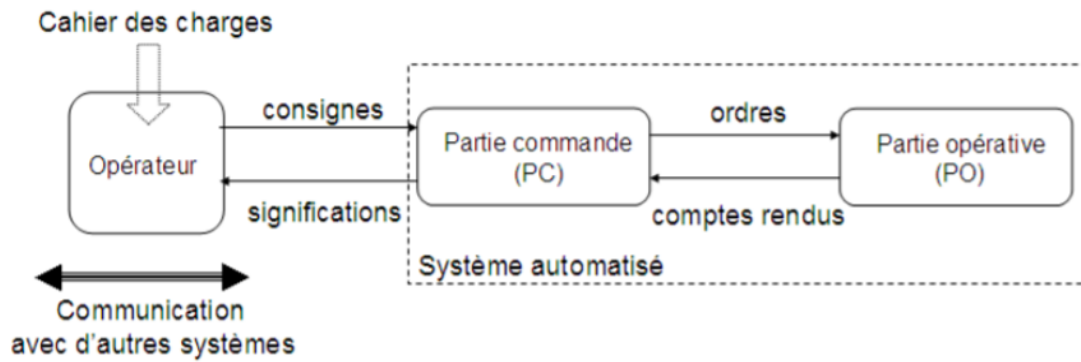


FIGURE 1.2: Chaîne automatisé

1.2.2 Chaîne d'information

— C'est la partie du système automatisé qui capte l'information et qui la traite. On peut découper cette chaîne en plusieurs blocs fonctionnels.

- **Acquérir** : Fonction qui permet de prélever des informations à l'aide de capteurs.
- **Traiter** : C'est la partie commande composée d'un automate ou d'un microcontrôleur.
- **Communiquer** : Cette fonction assure l'interface l'utilisateur et/ou d'autres systèmes.
- **Transmettre** : Cette fonction assure l'interface avec l'environnement de la partie commande.

Exemple de chaîne d'information : la porte de garage.

- **L'opérateur** : Appuie sur le bouton de la télécommande pour fermer la porte du garage (consigne de l'utilisateur). La chaîne d'informations, composée d'un boîtier électronique et de capteurs, détecte le signal et ordonne, lorsqu'elle en reçoit l'ordre, la mise en route du moteur afin d'ouvrir la porte (ordre).

1.3 Diagnostic

1.3.1 La problématique du diagnostic dans les systèmes

Suite aux récentes révolutions technologiques dans le domaine industriel, on retrouve de plus en plus d'éléments complexes intégrés dans un SA, notamment dans sa partie opérative. Cette complexité des systèmes est accompagnée par des besoins croissants en termes de sûreté de fonctionnement et de sécurité. En effet, il est indispensable de mettre en œuvre une fonction de surveillance permettant de réagir à temps, aux possibles dysfonctionnements. Une réaction immédiate aux dysfonctionnements permet d'une part, d'éviter de considérables pertes humaines et matérielles. D'autre part, elle permet d'échapper à la propagation des défaillances entraînant ces dysfonctionnements,

facilitant ainsi le pistage des causes de ces défaillances. Afin d'illustrer le principe d'une fonction surveillance, il est indispensable de présenter quelques terminologies.

1.3.2 Terminologie du diagnostic

La diversité des terminologies trouvées dans différents travaux fait que nous avons jugé important d'établir un lexique sur les termes qui seront utiles pour la compréhension du présent mémoire. Nous présentons dans la suite quelques définitions[2][3] :

— **Défaut :**

C'est une déviation du système par rapport à son comportement normal, qui ne l'empêche pas de remplir sa fonction. Un défaut est donc une anomalie qui concerne une ou plusieurs propriétés du système, pouvant aboutir à une défaillance et parfois même à une panne.

— **Dégradation :**

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

— **Défaillance/défaut :**

Une défaillance est une anomalie altérant ou empêchant l'aptitude d'une unité fonctionnelle à accomplir la fonction souhaitée.

Une défaillance correspond à un passage d'un état à un autre, par opposition à une panne qui est un état. Par abus de langage, on pourra appeler cet état de panne mode de défaillance.

Une défaillance implique l'existence d'un défaut, puisqu'elle aboutit à un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique de référence.

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

— **Panne :**

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

— **les pannes permanentes :** une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.

— **les pannes intermittentes :** le système peut retrouver son fonctionnement nominal après l'occurrence de la panne.

Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente.

— **Symptôme, Observation, Mesure :**

Un symptôme correspond à une ou plusieurs observations qui révèlent d'un dysfonctionnement. Il s'agit d'un effet qui est la conséquence d'un comportement anormal. Une observation est une information obtenue à partir du comportement ou du fonctionnement réel du système. Une mesure est une observation élémentaire du fait qu'elle reflète une et une seule grandeur physique. Elle est représentée par une variable dont le contenu est l'image d'une grandeur physique. Son obtention s'effectue par l'intermédiaire de capteurs.

1.3.3 Surveillance et diagnostic

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

1.3.3.1 Surveillance

Un système de surveillance a comme première vocation d'émettre à partir des informations générées par les capteurs, des alarmes [6] dont l'objectif est d'attirer l'attention de l'opérateur de supervision sur l'apparition d'un ou plusieurs événements susceptibles d'affecter le bon fonctionnement de l'installation, comme le dépassement d'un seuil de sécurité au niveau du remplissage d'un réservoir. Dans le cadre de notre travail, nous considérons la surveillance comme un dispositif passif, dans le sens où ce dispositif n'influence pas le comportement du système à diagnostiquer. Un système de surveillance permet de détecter les défaillances en observant l'évolution du système, puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et enfin identifier les causes premières. Nous pouvons distinguer deux fonctions principales dans la surveillance qui sont la détection et le diagnostic.

1.3.3.2 Détection

La fonction de détection permet de discerner tout écart du système par rapport à son état de fonctionnement normal. Autrement dit, elle permet de déterminer la présence de défauts dans un système. Pour assurer cette fonction, il est indispensable de pouvoir distinguer entre les situations normale et anormale. Cette fonction représente très souvent un sujet de débat concernant sa place. Dans certains travaux [4], cette fonction est considérée comme un élément distinct de la fonction de diagnostic et plutôt une entité de la surveillance. D'autres travaux [5] considèrent cette fonction comme une information primordiale et indissociable du diagnostic. Ainsi, ils définissent le diagnostic comme la détection, la localisation et l'identification de défauts.

1.3.3.3 Diagnostic

La fonction diagnostic permet de déterminer les causes et de localiser les éléments défaillants, qui ont entraîné la dégradation du système [4]. En effet, le diagnostic établit un lien de cause à effet entre un symptôme observé et la défaillance constatée. Cette fonction suit la fonction de détection et inclut les fonctions de localisation et d'identification.

1.3.3.4 Localisation de défauts

Il s'agit de localiser le sous-système affecté par le défaut détecté, responsable de la défaillance du système. La localisation consiste, en effet, à remonter les symptômes pour retrouver l'ensemble des éléments défaillants. Ce problème est difficile à résoudre. En effet, il est possible de déterminer une défaillance, ou une panne, résultant d'un défaut. Par contre, le problème inverse est plus difficile à résoudre, puisqu'une panne peut résulter d'un ou plusieurs défauts, comme il est montré dans la figure.[7]

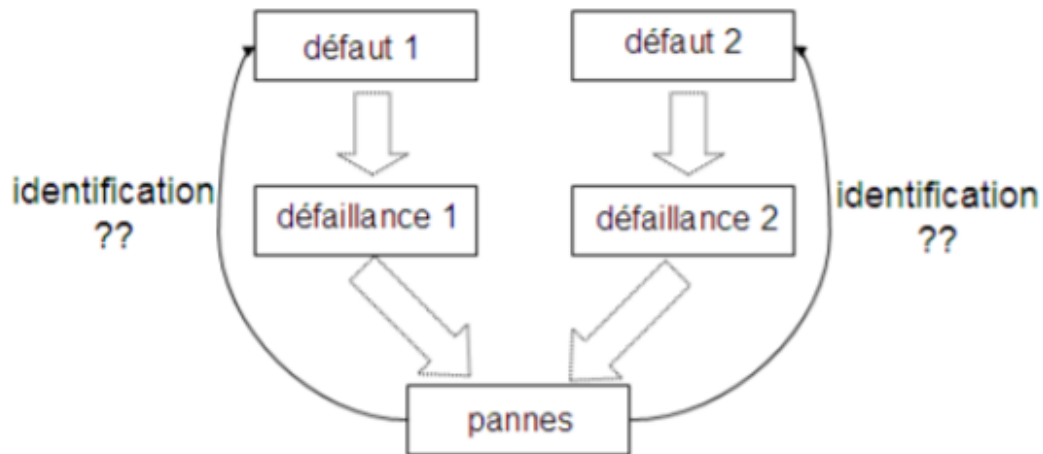


FIGURE 1.3: Localisation de défauts

1.3.3.5 Types défauts

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

— Un défaut de capteur

Une modification anormale d'une mesure est un défaut de capteur, comme une faute systématique entachant instantanément les données relevées d'un accéléromètre d'une centrale inertielle. Ainsi, un défaut capteur indique une fausse valeur de la grandeur physique à mesurer. Un capteur est un dispositif qui consiste à convertir une grandeur physique en une grandeur traitable par les calculateurs. On peut dire aussi que les capteurs connectent la sortie d'un système avec l'environnement extérieur. Ils permettent de communiquer les informations concernant l'état et le comportement interne du processus. Pour les systèmes en BF (boucle fermée), les mesures de ces capteurs sont utilisées pour générer le signal de commande. Par conséquent, la

présence d'un défaut capteur donne un signal de commande inexact et inefficace.[8]

Les défauts capteurs les plus répandus sont :

- a. le biais
- b. la dérive
- c. la perte d'efficacité
- d. le blocage
- e. le défaut de calibrage

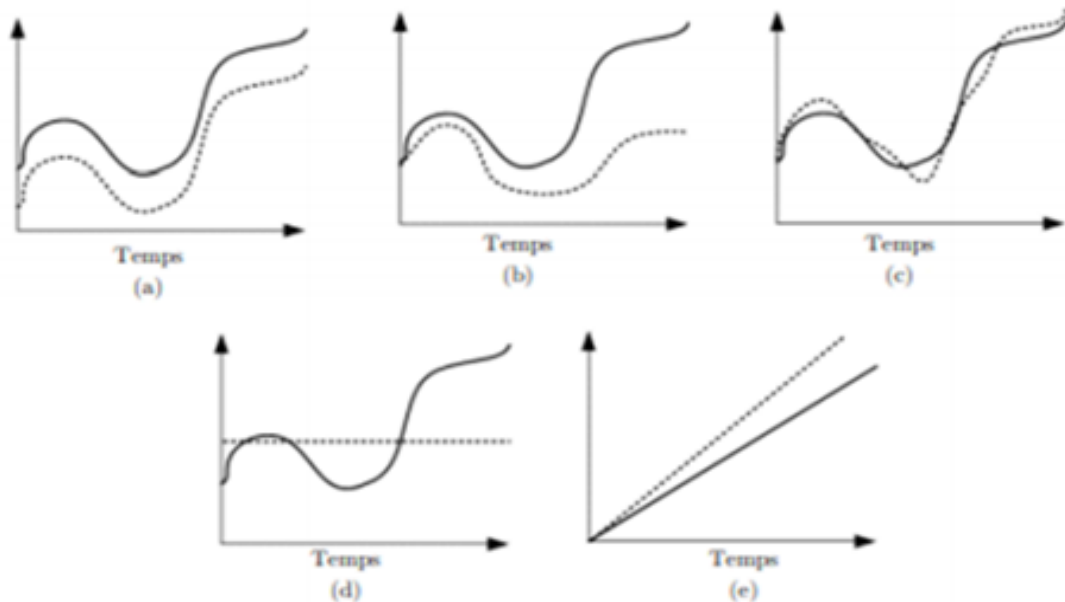


FIGURE 1.4: L'effet de différents types de défauts capteur sur les mesures.

— Un défaut d'actionneur

Le dispositif actionneur est un élément de la partie opérative d'un système qui transforme les signaux de commande issus du contrôleur (processeur ou contrôleur) en mouvement (moteur), en chaleur (résistance électrique), ou en champ magnétique (électroaimant) Ainsi, les défauts actionneurs agissent au niveau de la dynamique de la partie opérative et détruisent le signal d'entrée du système, par exemple le blocage d'une gouverne. Les conséquences de défauts actionneurs peuvent varier d'une consommation élevée de l'énergie jusqu'à la perte totale de contrôle. Les défauts actionneurs varient d'un actionneur à un autre.[9]

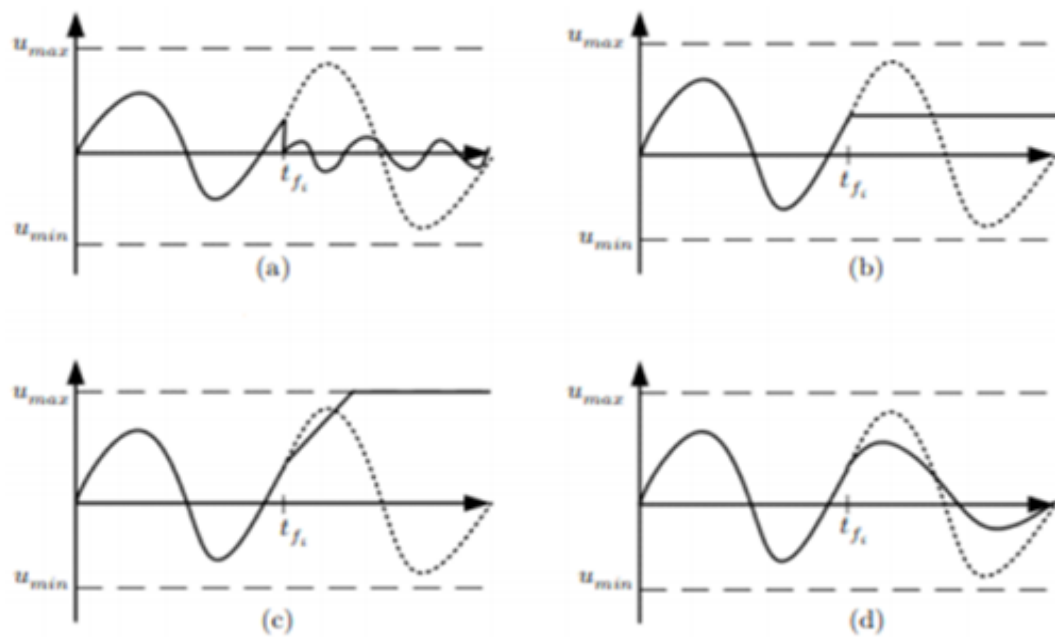


FIGURE 1.5: Représentation graphique des défauts actionneur les plus répandues

1.3.3.6 Mode de fonctionnement

— **Mode de fonctionnement normal (nominal)**

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

— **Mode de fonctionnement dégradé**

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

— **Mode de défaillance**

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

1.4 Classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic des défauts utilisées dans le milieu industriel sont très variées. Leur principe général repose sur une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance[?]. Dans cette section, nous présentons une classification des principales méthodes de diagnostic rencontrées dans la littérature. Cette classification, peut être réalisée selon plusieurs critères tels que la nature de l'information disponible (quantitative ou qualitative), la dynamique du système (continu, discret ou hybride), la structure de prise de décision (centralisée, décentralisée ou distribuée).[11]

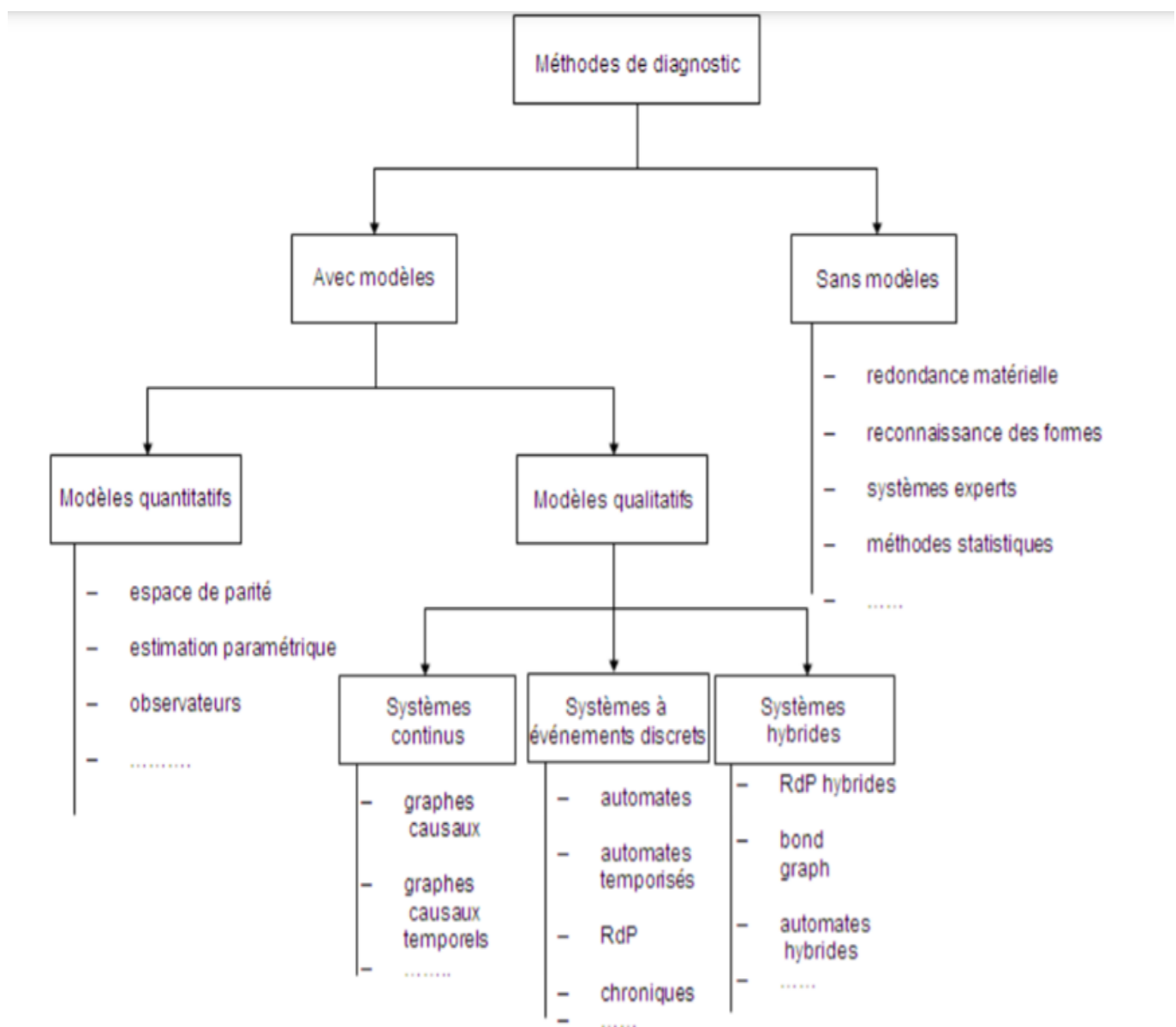


FIGURE 1.6: Une classification des méthodes de diagnostic

1.4.1 Méthodes sans modèles

- Dans certaines applications industrielles, il est difficile, voire impossible, d'obtenir le modèle du système. Cette difficulté est justifiée par la complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production Dans un système. En effet, seules les méthodes de surveillance sans modèles sont opérationnelles pour ce type d'applications industrielles. Ces méthodes de diagnostic se basent sur des informations issues d'une expérience préalable, sur des règles heuristiques ou encore sur des exemples de résolution. Parmi ces méthodes, on trouve :

1.4.1.1 La méthode du seuillage

Les signaux fournis par les capteurs sont comparés avec des valeurs limites constantes ou adaptatives (évoluant en fonction du point de fonctionnement) [12]. Un premier niveau indique la présence probable d'un défaut alors qu'un second niveau peut en caractériser la gravité. Le franchissement d'un seuil révèle la présence d'une anomalie.

1.4.1.2 Les méthodes statistiques

Les méthodes statistiques supposent que les signaux fournis par les capteurs possèdent certaines propriétés statistiques, sur lesquelles des tests de seuil sont établis [13]. En effet, l'étude de l'évolution de la moyenne ou de la variance d'un signal peut favoriser la mise en évidence d'une anomalie.

1.4.1.3 La reconnaissance des formes

Ces méthodes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et des mesures (continues ou discrètes). Le fonctionnement d'un système de diagnostic par reconnaissance de formes se déroule en trois phases : [14]

- une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.
- une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage
- une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

1.4.1.4 Les systèmes experts

Les systèmes experts utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux défauts. Ce sont des systèmes à base de règles qui établissent des associations empiriques entre effets et causes. Ces associations sont généralement fondées sur l'expérience de l'expert plutôt que sur une connaissance de la structure et/ou du comportement du système. Leur fonctionnalité est de trouver la cause de ce qui a été observé en parcourant les règles par un raisonnement inductif par chaînage avant ou arrière.[15]

1.4.2 Méthodes à base de modèles

Ces méthodes reposent sur une comparaison du comportement du système avec le comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi[16]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, comme indiqué dans le schéma. Selon le type du modèle (qualitatif et/ou quantitatif), on peut distinguer deux branches de méthodes : les méthodes quantitatives issues de la communauté FDI (Failure Detection and Identification) et les méthodes qualitatives issues des communautés IA et SED. La dissociation entre les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives n'implique pas que ces deux aspects sont disjoints. En réalité, ces deux types d'approche peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic.

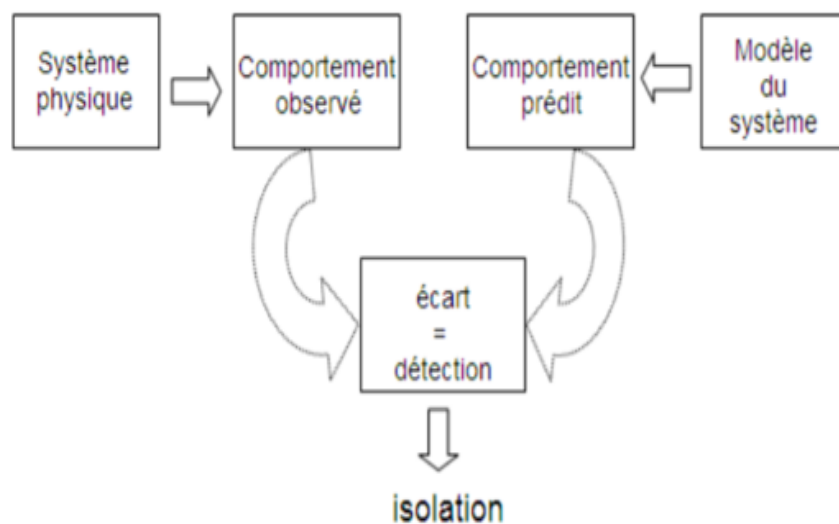


FIGURE 1.7: Principe des méthodes de diagnostic avec modèles

• Méthodes de diagnostic à base de modèles quantitatifs

Ces méthodes reposent sur l'estimation de l'état, des paramètres ou de l'espace de parité en utilisant des modèles mathématiques du système décrivant le comportement du système. Si l'écart entre ces modèles et les variables du système dépasse un certain seuil, une défaillance est alors détectée. À ce moment, un résidu sera généré et comparé avec toutes les signatures des défauts connues, afin d'isoler et d'identifier la défaillance. Parmi les différentes méthodes de détection et de diagnostic utilisant des modèles mathématiques, nous trouvons principalement l'espace de parité, les observateurs et l'estimation paramétrique.

— La méthode d'espace de parité :

La méthode de l'espace de parité a été une des premières méthodes employées à des fins de FDI). Cette méthode repose sur la vérification de la cohérence (parité) des modèles du procédé avec les mesures issues de capteurs et des entrées connues (consignes, signal de commande, etc.[17]

— La méthode à base d'observateurs :

Cette méthode se base sur la reconstruction de la sortie du processus à l'aide d'observateurs, de la comparer avec la sortie mesurée, puis à utiliser l'écart entre ces deux fonctions est utilisé comme résidu.[18]

— La méthode d'estimation paramétrique :

Cette méthode suppose l'existence d'un modèle paramétrique décrivant le comportement du système et que les valeurs de ces paramètres en fonctionnement nominal soient connues. Elle consiste alors à identifier les paramètres caractérisant le fonctionnement réel, à partir de mesures des entrées et des sorties du système [11]. Pour détecter l'apparition de défaillances dans le système, il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques.

• Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs

Les modèles qualitatifs permettent d'abstraire le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction à travers des modèles non plus mathématiques mais des modèles de type symbolique. Ces modèles décrivent d'une manière qualitative l'espace d'état continu du système. Contrairement aux modèles de type numérique, les modèles qualitatifs ne représentent pas la physique du système, mais ils le décrivent en terme de mode de fonctionnement. Les méthodes à base de modèles qualitatifs peuvent être classifiées selon le niveau d'abstraction considéré du système à diagnostiquer, à savoir, les systèmes continus, les systèmes à événements discrets ou les systèmes hybrides dynamiques. Pour les systèmes continus, les approches ont été développées à base de graphes causaux et de graphes causaux temporels. Le diagnostic des SED est basé sur l'utilisation de modèles discrets tels que les réseaux de Petri et les automates d'états finis, . . . Dans ce contexte, Sampath et al. ont proposé dans une approche de diagnostic devenue une référence dans la littérature. Cette approche consiste à modéliser le système par des automates à états finis, puis à construire son diagnostiqueur.[19][20]

1.4.2.1 Critères des méthodes de diagnostic à base de modèles

Les méthodes de diagnostic doivent tenir compte de certains critères qui varient en fonction des besoins en termes de sûreté, des ressources humaines et matérielles disponibles, de l'aspect critique du système surveillé[?], plusieurs critères communs aux méthodes de diagnostic ont été dégagés. En effet, une méthode de diagnostic doit :

- fournir un diagnostic fiable (pas de fausses alarmes ni d'alarmes manquantes et ni d'alarme tardive).
- être algorithmiquement concevable.
- être réalisable en temps réel.
- avoir un temps de réponse raisonnable (faible complexité).
- permettre un diagnostic rapide des défauts.
- être facile à mettre en œuvre.
- nécessiter un nombre réduit de capteurs (si c'est possible).

1.4.2.2 Approches de diagnostic centralisés, décentralisés et distribués

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

1.4.2.3 Diagnostic hors-ligne/en-ligne

- Dans le diagnostic hors-ligne, l'ensemble des comportements et d'observations du système construisent le diagnostic hors-ligne, pour élaborer son diagnostic. Cette apparition n'impose pas des critères de réactivité de la réponse de diagnostic. En effet, dans ce cas aucune limitation de temps de réponse n'est exigée.
- Dans le diagnostic en ligne, en s'appuyant sur les observations générées, le diagnostic en ligne consiste à calculer le diagnostic du système pendant qu'il fonctionne. Par contre, les diagnostics hors ligne, les approches de diagnostic en ligne présentent des exigences en termes de réactivité de la réponse. De la part du module de diagnostic cela nous implique un temps de réponse rapide de la part du module de diagnostic. Le diagnostic en ligne conduit généralement à une difficulté qui concerne la complexité du calcul. En effet, la réponse de diagnostic doit être livrée en temps-réel, le plus rapidement possible. Le diagnostic en ligne n'est plus possible lorsque le module de diagnostic ne parvient pas à gérer le flux d'observations et inférer le diagnostic suffisamment rapidement. Vu que le nombre d'observations augmente régulièrement, il est nécessaire de disposer d'un diagnostic incrémental. En effet, la complexité de traitement ne doit pas dépendre du nombre d'observations reçus avant la date $t(i - 1)$ puisque ce nombre augmente d'une manière non bornée.[22]

1.4.2.4 L'analyse diagnostique avec modèle

— Le raisonnement causal

L'idée de raisonnement causal consiste à déterminer les composants défaillants pour définir le comportement anormal observé. Au moment de l'analyse des régimes perturbés, l'aspect significatif de la connaissance des mécanismes en termes de causalité est nécessaire. Ainsi, $(x \rightarrow y)$ signifie que l'état de y au temps t dépend de l'état de x au temps $t' \leq t$, x est la cause et y l'effet. Lorsque les liens causaux ne sont pas modifiés par les défauts, le principe déclaré avant est valide. À chaque instant la liste des défauts est donnée par une comparaison entre grandeurs simulées et mesurées, lorsque la différence (l'écart) significative est signalée entre les deux grandeurs, la variable associée est un défaut. C'est l'étape de détection. La procédure de détection fournit donc une liste de variables en défaut. Pour localiser le défaut source (l'origine de défaut) il faut obtenir une liste ordonnée de variables, depuis le défaut source, en passant par toutes les variables intermédiaires affectées jusqu'aux ultimes conséquences. A cause de ça, on cherche à estimer l'écart entre valeurs prédites et valeurs mesurées.[23]

— Le raisonnement FDI

En premier temps, l'approche FDI (Fault Detection and Isolation) se déroule en trois étapes : la partie détection puis la partie localisation. Le modèle comportemental défini par un ensemble de contraintes statiques ou dynamiques décrit les composants d'un système. Devant la réalisation de l'analyse diagnostique, des tests de détection doivent être réalisés permettant de générer des symptômes. Ces tests reposent sur différents modèles. En effet, un test de détection sur un modèle de comportement n'intervient que sur des variables et paramètres connus (mesurés), ce test est nommé aussi relation de redondance analytique (RRA).[24]

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la problématique générale de surveillance des systèmes. A travers ce premier chapitre, nous avons souligné l'importance du rôle que joue un système de diagnostic dans le bon fonctionnement d'un processus industriel. La première partie de ce chapitre a été dédiée à la présentation de quelques terminologies, notions et mots clés utilisés dans ce mémoire. En effet, nous avons établi que le diagnostic d'un système automatique se fait à travers trois fonctions de base : la détection, la localisation et l'identification. Dans une deuxième partie, nous avons présenté une classification des différentes méthodes de diagnostic. Deux grandes catégories de méthodes de diagnostic ont été abordées : méthodes à base de modèles et méthodes sans modèles. Nous avons constaté que les méthodes avec modèles reposent sur une comparaison du comportement observable du système avec son comportement prévu. Les méthodes à base de modèles qualitatifs consistent à abstraire certains aspects continus du système, à travers une représentation symbolique. Dans le chapitre suivant, nous allons rappeler les principales approches de diagnostic à base de modèles autour desquels ce mémoire de thèse est focalisé. Nous focalisons notre étude sur les bonds graphs.

Bond graph

Sommaire

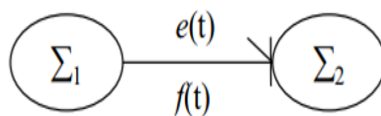
2.1	Introduction	20
2.2	Bond graph	20
2.3	Eléments de base du langage Bond graph	21
2.3.1	Eléments passifs	23
2.3.2	Eléments actifs	26
2.3.3	Jonctions	26
2.4	La causalité	29
2.4.1	Notion de causalité	29
2.4.2	Règles d'affectation de la causalité	30
2.4.3	Chemin causal	32
2.5	Conclusion	34

2.1 Introduction

Pour la conception de nouveaux produits ou pour l'amélioration de produits existants, les entreprises s'organisent de plus en plus en équipes pluridisciplinaires composées de personnes de compétences différentes (mécaniques, hydrauliques, électriques, automatiques, thermiques, etc.). Ces équipes sont responsables de toutes les phases de la recherche, que ce soit la modélisation, la simulation, la conception de lois pour la sûreté de fonctionnement du projet. Le mot bond graph est utilisé pour visualiser comment le système est décomposé en termes d'utilisation et de consommation d'énergie. Ces graphiques identifient les composants d'un système et leurs connexions électriques. Et utilisés aussi pour spécifier les composants individuels pertinents pour le modèle de système dynamique. La méthodologie bond graph est un langage unifié pour tous les domaines de l'ingénierie. Il a été inventé par le professeur H. Paynter aux Etats-Unis en 1959 et formalisé par D. Kannopp, est arrivé en Europe au Pays-Bas. Ce chapitre présente spécifiquement les concepts généraux des bond graph et les éléments essentiels pour construire un model bond graph.

2.2 Bond graph

Bond graph est un langage graphique désigné spécialement pour la description des processus divers . Il modélise les échanges d'énergie par un réseau de liens de puissances appelés bonds. Un bond est un lien dont l'extrémité est une demi-flèche. Le sens de la demi-flèche indique la direction de la puissance alors que les entités $e(t)$ et $f(t)$ portées sur les liens sont l'effort et le flux. Les phénomènes de dissipation d'énergie, de stockage et d'inertie sont représentés en bond graph et indépendamment de leur nature physique, par les éléments R, C et I.



Lorsque deux systèmes sont en interaction, $\sum 1$ applique à $\sum 2$ un 'effort' $e(t)$. $\sum 2$ réagit en envoyant à $\sum 1$ un flux $f(t)$. l'effort imposé par $\sum 1$ est une donnée pour $\sum 2$.

Les entités $e(t)$ et $f(t)$ changent d'un domaine à un autre, le tableau ci-dessous donne leur signification dans les différents domaines physiques :

domaine	effort e	flux f	moment p	déplacement
mécanique	force F	vitesse v	impulsion p	élongation q
translation	couple τ	vit. ang. ω	impul. ang h	angle θ
rotation				
électrique	tension u	courant i	flux magn ϕ	charge q
hydraulique	pression p	débit vol V	impul.pres	volume V
magnétique	force magnéto-mot	dérivée flux magnétique		flux magnétique
chimique	potentiel chimique	flux molaire		masse molaire
thermique	température	flux d'entropie		entropie

TABLE 2.1: variables généralisées pour différents domaines physiques

Les Variable de puissance sont e et f , elles sont appelées de puissance parce que leur produit donne une grandeur de puissance : $[P = e.f]$, Comme l'énergie est l'intégrale de la puissance , nous avons l'intégrale de l'effort est le moment et l'intégrale du flux est le déplacement, p et q représentent donc les variables d'énergie

2.3 Eléments de base du langage Bond graph

Le langage bond graph est un langage conçu spécifiquement pour la description des processus qui manœuvrent l'énergie. Une notation graphique est nécessaire afin de fournir une description concise du processus entier à un niveau d'abstraction plus élevé que les équations décrivant les transferts d'énergie entre les éléments. En outre, les bonds graphs accentuent également la structure du modèle, faisant un tracé entre le modèle et le système assez intuitif.

Les éléments constituant le langage bond graph sont résumés avec leurs relations constitutives dans le tableau ci-dessous :

Symbole	Définition	Nom
$\text{Se} \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$	$e = e(t)$	Source d'effort
$\text{Sf} \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$	$f = f(t)$	Source de flux
$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} \text{R}$	$\Phi_R(e, f) = 0$	Résistance
$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} \text{C}$	$\Phi_C(e, q) = 0$ $\Phi_C(e, \int f(t)dt) = 0$	Capacité
$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} \text{I}$	$\Phi_I(f, p) = 0$ $\Phi_I(f, \int e(t)dt) = 0$	Inertie
$\begin{array}{c} \textcircled{1} \xrightarrow{\quad} \text{TF} \xrightarrow{\quad} \textcircled{2} \\ \quad \quad \quad :1/m \end{array}$	$e_1 = m.e_2$ $f_2 = m.f_1$	Transformateur
$\begin{array}{c} \textcircled{1} \xrightarrow{\quad} \text{GY} \xrightarrow{\quad} \textcircled{2} \\ \quad \quad \quad :r \end{array}$	$e_1 = r.f_2$ $e_2 = r.f_1$	Gyrateur
$\begin{array}{c} \textcircled{2} \\ \downarrow \\ \textcircled{1} \xrightarrow{\quad} \text{0} \xrightarrow{\quad} \textcircled{3} \end{array}$	$f_1 + f_2 - f_3 = 0$ $e_1 = e_2 = e_3$	Jonction de l'effort
$\begin{array}{c} \textcircled{2} \\ \downarrow \\ \textcircled{1} \xrightarrow{\quad} \text{1} \xrightarrow{\quad} \textcircled{3} \end{array}$	$e_1 + e_2 - e_3 = 0$ $f_1 = f_2 = f_3$	Jonction du flux

TABLE 2.2: éléments bond graph

2.3.1 Eléments passifs

Les éléments R, C, I ce sont les éléments passifs car Les R dissipent l'énergie, et Les I et C stockent l'énergie, Ce sont des éléments 1-port, la puissance est fournie aux éléments, la demi-flèche est orientée vers l'élément.[25]

2.3.1.1 Résistance R

Les éléments R sont des éléments de base à 1 port qui dissipent l'énergie . Ils sont caractérisés par une relation constitutive qui relie directement l'effort au flux (résistance électrique, diode, restriction hydraulique, frottement, résistance thermique). La loi linéaire ou non linéaire est sous forme :

$$\phi R(e,f)=0$$

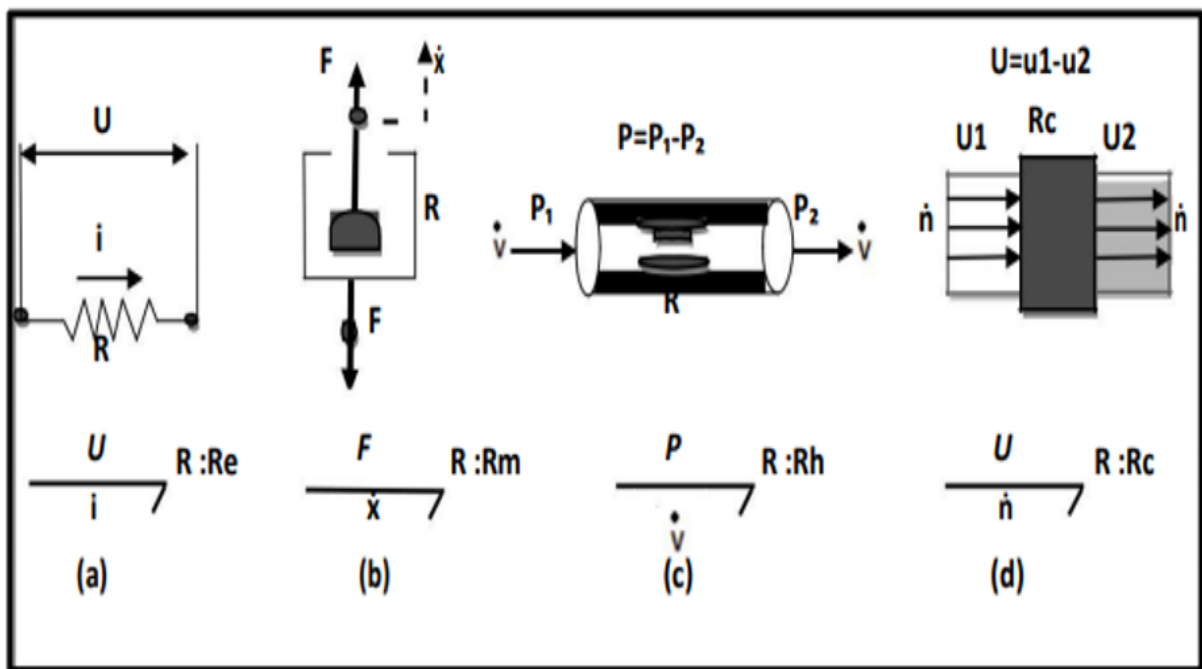


FIGURE 2.1: Représentation graphique de R

Domaine	Paramètre	SI Units
généralisé	$R = e/f$	N/A
Transnational	b , constante d'amortissement	$N - s/m$
Rotationnel	β , constante d'amortissement en rotation	$N - m - s/rad$
Électrique	R , résistance	$\omega(\text{ohms})$
Hydraulique	Rf , résistance hydraulique	$Pa - s/m^3$

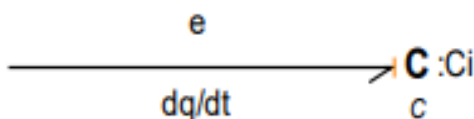
TABLE 2.3: Résistance linéaire de l'élément R

2.3.1.2 Capacité C

Les éléments C sont des éléments de base qui stockent l'énergie potentielle. Ils se caractérisent par une relation constitutive qui relie directement l'effort au déplacement généralisé (ressort, condensateur, accumulateur, réservoir de stockage, phénomène de compressibilité). La loi générique qui le caractérise est :

$$\phi_c(e, q) = 0$$

La représentation générale est la suivante :



Les représentations graphiques sont données par la figure suivante :

Domaine	Paramètres	SI Units
Généralisé	$C = q/e$	N/A
Transnational	$1/k$	m/N
Rotationnel	$1/\kappa$, conformité de rotation	$rad/N - m$
Électrique	C , capacité	$F(\text{farad})$
Hydraulique	Cf	m^3/Pa

TABLE 2.4: Conformité de l'élément C linéaire

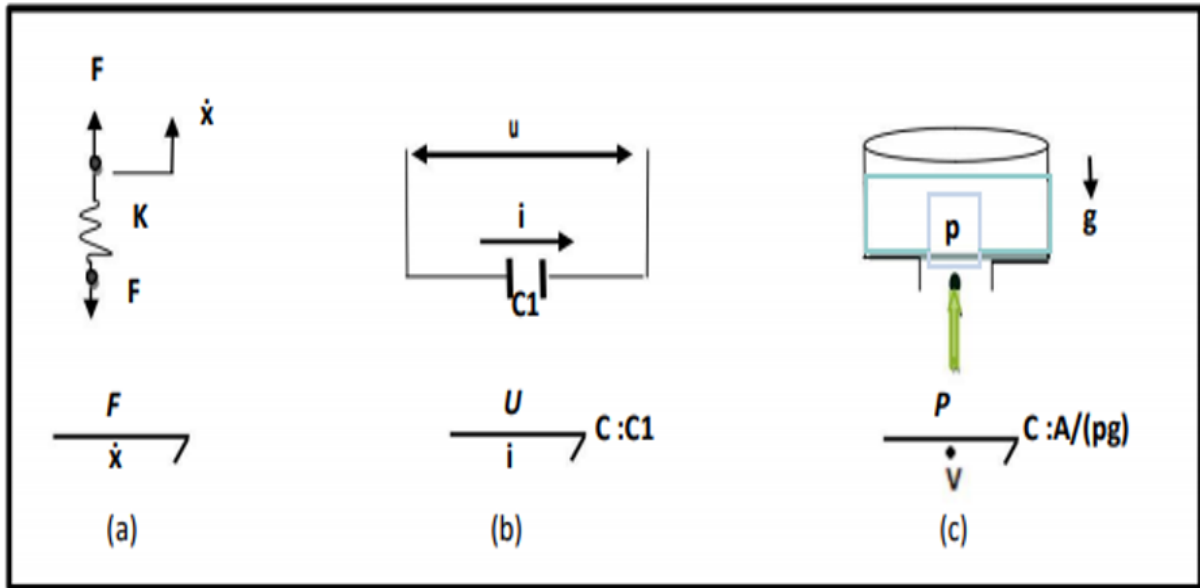


FIGURE 2.2: Représentation graphique de C

2.3.1.3 L'élément I

Les éléments I sont des éléments de base qui stockent l'énergie cinétique (masse en translation, inductance). Ils sont caractérisés par une relation, Elle est de la forme :

$$\phi_1(p, f) = 0$$

Les représentations graphiques sont données par la Figure 2.3 .

Les éléments I et C les deux sont 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.

Domaine	Paramètres	SI Units
Généralisé	$I = p/f$	N/A
Transnational	m	kg
Rotationnel	J , Inertie de rotation	$kg - m^2$
Électricité	L , inductance	H (henrys)
Hydraulique	$I f$	kg/m^4

TABLE 2.5: Inertance linéaire de l'élément I

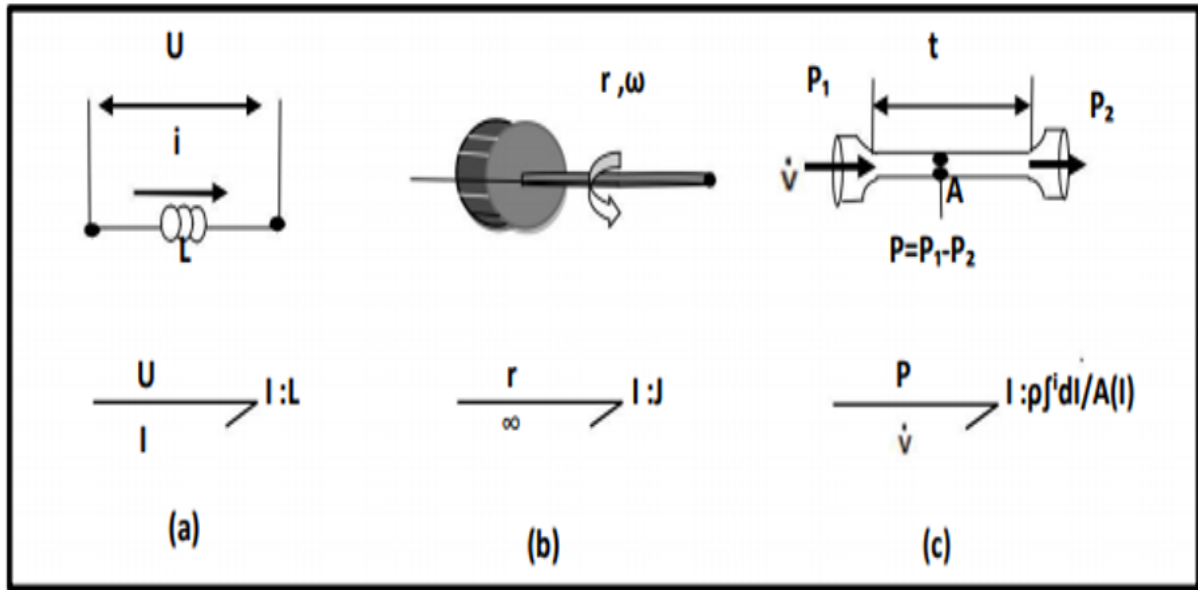


FIGURE 2.3: Représentation graphique de I

2.3.2 Éléments actifs

Les sources sont appelées éléments actifs dans la notation des graphes de bondes. Elles alimentent le processus. Leur type est indiqué soit par un indice «e» ou «f» selon que la

Source impose un effort ou un flux au système. Selon le type de variable de puissance fournie par la source, la modélisation du bond graph comporte deux éléments sources : la source d'effort (Se) et la source du flux (Sf). La figure montre les symboles de ces éléments.

L'orientation de la demi-flèche est fixée. La variable effort ou flux fourni par la source est supposée indépendante de la variable complémentaire flux (pour Se) ou effort (pour Sf). Si les sources appliquées sont indépendantes (gravité, tension ou courant d'alimentation, pompe...), elles seront représentées par Se ou Sf, si en revanche elles sont modulées par des variables externes (pompe commandée par exemple) on les désigne par MSe ou MSf («M» pour modulée.)[26]

2.3.3 Jonctions

Pour exprimer d'autres contraintes du système global à modélisé, les éléments du bond graph (R, C, I,) sont interconnectés par des jonctions «0» lorsqu'ils sont régis par le même effort et par une jonction «1» si ils sont parcourus par le même flux. la structure de jonction correspond à l'architecture du modèle étudié . Ils sont



FIGURE 2.4: éléments actifs : a-source d'effort et de flux , b- sources

conservatifs de puissance.[27]

2.3.3.1 Jonction 0

Pour la jonction 0, les efforts de tous les ports d'alimentation sont les mêmes et tous les flux conjugués de puissance se résument à zéro avec leurs signes. Le signe est déterminé par l'orientation de la demi-flèche pour la direction de référence d'énergie. Si une demi-flèche est orientée vers un port, le flux est considéré positif, sinon le flux a un signe négatif. La jonction et la loi constitutive est donnée par la figure 2.5.

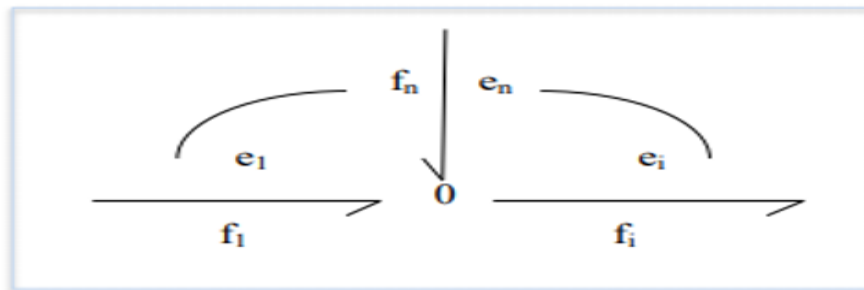


FIGURE 2.5: Jonction parallèle ou jonction 0

$$e_1 = e_2 = \dots e_n$$

$$f_1 + f_2 + \dots f_n = 0$$

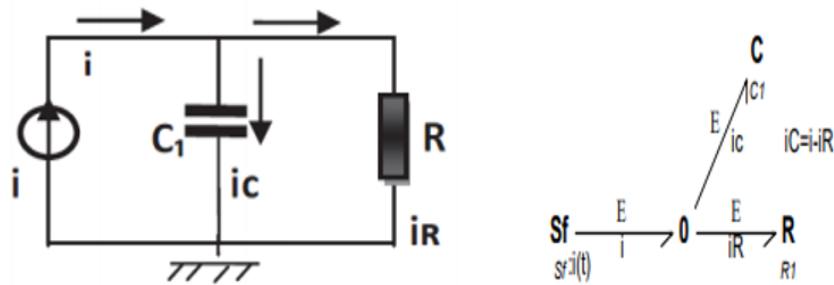


FIGURE 2.6: jonction 0 système électrique

2.3.3.2 Jonction 1

La jonction 1 joue le double rôle. Autrement dit, les flux de toutes les liaisons incidentes au nœud sont les mêmes et tous les efforts conjugués se résument à zéro en tenant compte de leurs signes.

la jonction 1 dans un bond graph n'a pas de nœud comme contrepartie dans les réseaux. L'équation constitutive d'une jonction 1 reliant tous les efforts dans les réseaux car elle correspond à la généralisation de la loi de tension de Kirchhoff . La jonction et la loi constitutive est donnée par la figure .

$$f_1 = f_2 = \dots f_n$$

$$e_1 + e_2 + \dots e_n = 0$$

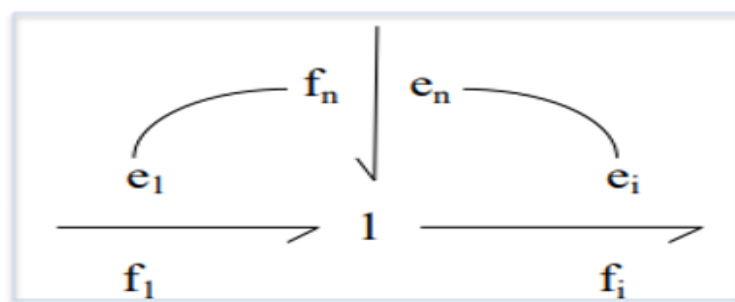


FIGURE 2.7: jonction série ou jonction 1

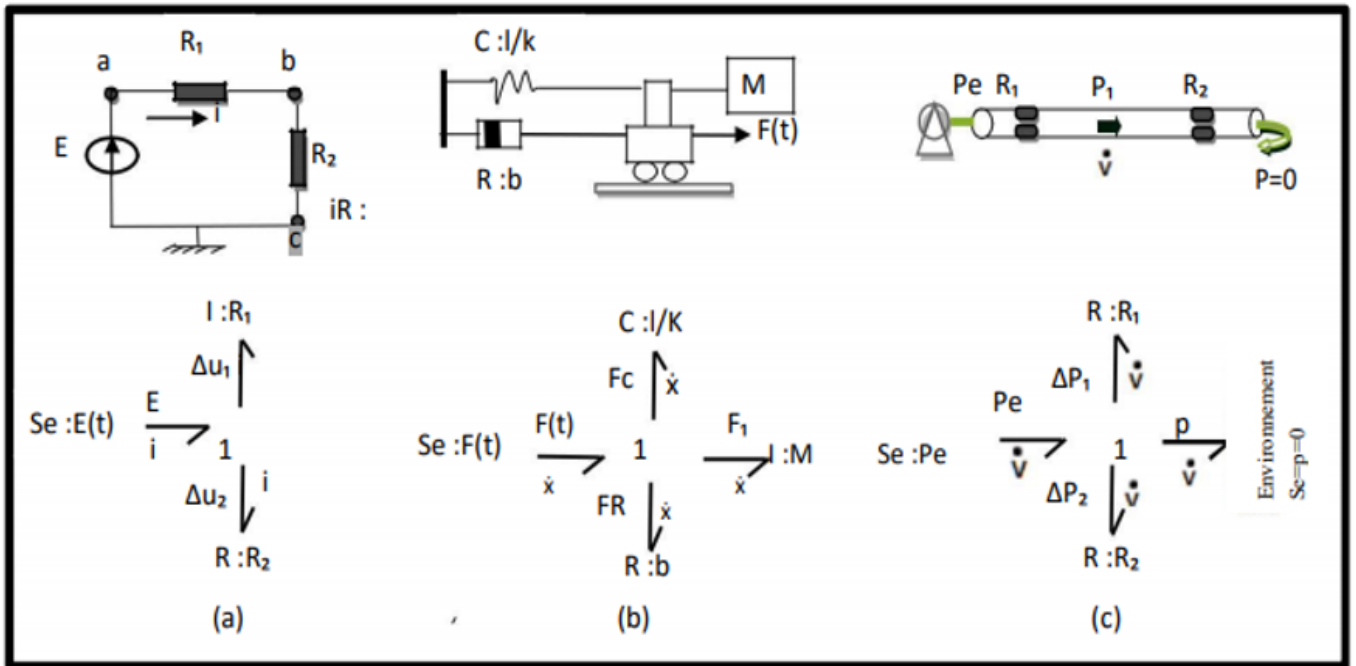


FIGURE 2.8: Jonction 1 : a- sys mécanique. b- sys électrique. c- sys hydraulique.

2.4 La causalité

Le couplage énergétique entre deux composants physiques interconnectés est représenté par un bond .Un tel modèle est acausal. Chaque composant est décrit par sa contrainte (équation constitutive). Le composant physique doit se comporter selon sa contrainte définie dans les termes des variables de puissance conjuguée. Mais si on veut simuler les phénomènes physiques (le modèle), il faut décider dans quel ordre les variables (efforts et flux) sont dirigées. Et aussi introduire la simulation de schéma de principe qui est causale. Pour cela il faut prendre une série de décisions de cause à effet, appelées alternativement attribution causale.[27]

2.4.1 Notion de causalité

Une propriété structurelle importante du bond graph c'est le concept de causalité. En effet, la détermination des causes à effets dans le système est directement déduite de la représentation graphique.

La relation entre la cause et l'effet sur un bond graph est indiquée par un trait perpendiculairement au bond. Par convention, le côté du trait indique par convention le sens où l'effort est connu, et le flux agit alors à l'inverse. Dans ce sens, un trait de causalité remplace deux connexions en sens retenu dans un bloc diagramme.[28]

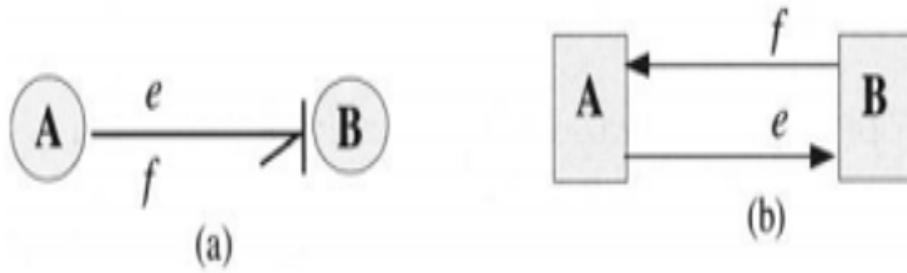


FIGURE 2.9: Causalité

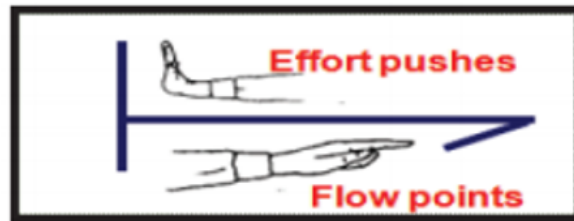


FIGURE 2.10: Causalité en bond graph

Remarque

la causalité vient pour enrichir le modèle bond graph afin d'obtenir un ensemble d'équations orientées sous forme d'entrée / sortie (connues / inconnues).

2.4.2 Règles d'affectation de la causalité

Le choix de la causalité est libre en principe mais soumis à certaines limitations . 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 2.6.

La procédure d'affectation des causalités SCAP est effectuée comme suit :

- Affecter la causalité aux sources.
- Mettre les éléments I et C en causalité intégrale et affecter la causalité arbitraire sur les R.
- respecter les contraintes causales sur les jonctions 0,1, T F, GY.
- 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 R (pouvant modifier un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale.

Element	Bond graph	Causal equation	Block diagrams	Rule
Effort source		e known		Output of Se (of Sf) is an effort (flow) input for the system.
Flow source		f known		<i>Rule: the causality is compulsory</i>
0 Junction		$\begin{cases} e_2 = e_1 \\ e_3 = e_1 \\ e_4 = e_1 \\ f_1 = -f_2 + f_3 - f_4 \end{cases}$		Only one effort (here e_1) is input. <i>Rule: only one bond can have causal stroke near a 0-junction</i>
1 Junction		$\begin{cases} f_2 = f_1 \\ f_3 = f_1 \\ f_4 = f_1 \\ e_1 = -e_2 + e_3 - e_4 \end{cases}$		Only one flow (here f_1) is input. <i>Rule: only one bond can have causal stroke away from a 1-junction</i>
TF		$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \\ e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{m} f_2 \end{cases}$		Only one effort and one flow are inputs <i>Rule: one causal stroke near TF</i>
GY		$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \\ f_2 = \frac{1}{r} e_1 \\ f_1 = \frac{1}{r} e_2 \end{cases}$		Two efforts or two flows are inputs <i>Rule: two or no causal stroke near GY</i>
C		$e = \Phi_C(\int f dt) = \Phi_C(q)$ $f = \frac{d}{dt}(\Phi_C^{-1}(e))$		Integral causality: effort is an output Derivative causality: flow is an output
I		$f = \Phi_I(\int e dt) = \Phi_I(p)$ $e = \frac{d}{dt}(\Phi_I^{-1}(f))$		Integral causality: flow is an output Derivative causality: effort is an output
R		$e = \Phi_R(f)$ $f = \Phi^{-1}_R(e)$		Resistance causality: output is an effort Conductance causality: flow is an output

TABLE 2.6: Causalité des éléments bond graph

2.4.3 Chemin causal

Le bond graph est un graphe dans lequel sont définis des boucles et des chemins causaux, qui sont parcourus en suivant la propagation de l'information effort ou flux, et quelque soit le sens des demi-flèches .

Définition 1 : un chemin causal est dit simple s'il est parcouru en suivant toujours la même variable. Il existe donc pour une même séquence de liens et de nœuds, deux chemins en suivant soit l'effort soit le flux.

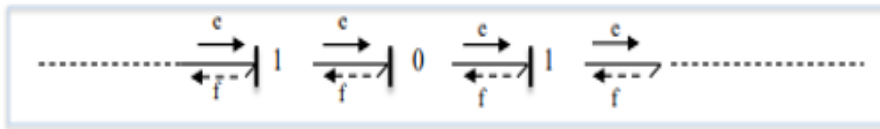


FIGURE 2.11: Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.

Définition 2 : Un chemin 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 ou lorsqu'il faut traverser un élément R, C ou I, ce qui correspond à un chemin mixte indirect .

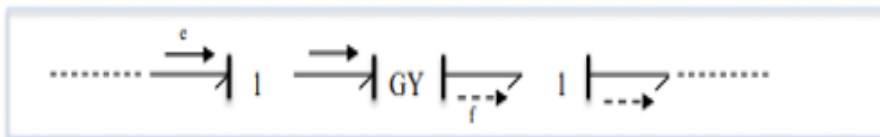


FIGURE 2.12: Chemin causal simple en suivant l'information effort e ou l'information flux f.

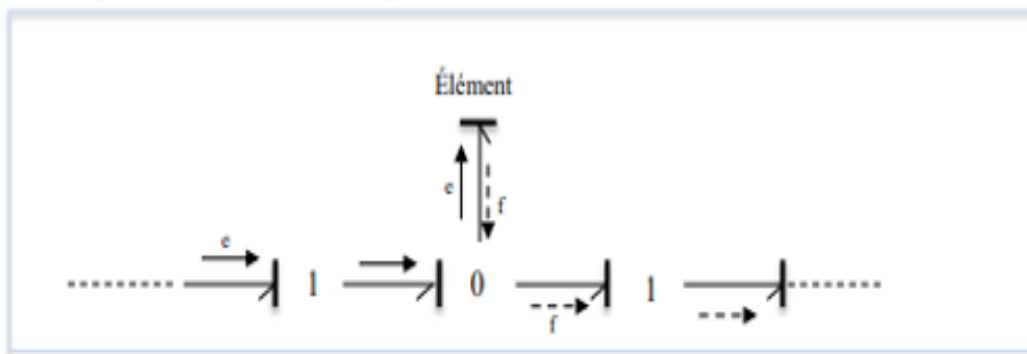


FIGURE 2.13: Chemin causal mixte indirect.

Définition 3 : une chaîne d'actions est un chemin causal entre une source et une sortie (qui peut être représentée par un détecteur).

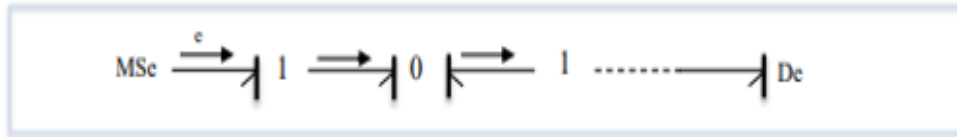


FIGURE 2.14: chaîne d'actions

Définition 4 : une boucle causale est un chemin causale fermé entre deux éléments de type R, C ou I, sans lien parcouru en suivant la même variable plus une fois.

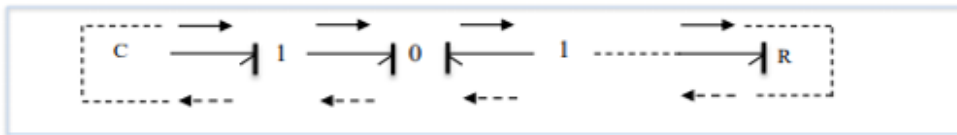


FIGURE 2.15: Boucle causal en suivant l'effort ou le flux

Définition 5 : une maille est un chemin fermé parcouru en partant d'un élément et en revenant à cet élément, ayant suivi dans certains une seule variable .

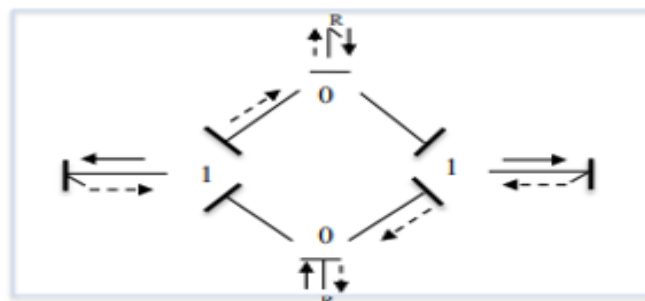


FIGURE 2.16: Maille

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la richesse de l'outil bond graph pour l'étude, la modélisation et l'analyse des systèmes complexes dans le monde industriel. On a présenté l'approche bond graph, ses éléments et ses caractéristiques. Et on a aussi parlé sur les propriétés de la causalité et le bond graph.

Les bonds graph ont initialement été inventés pour la modélisation des systèmes, dans la modélisation des processus en génie énergétique y compris les systèmes chimiques, le choix des variables de puissance n'est pas trivial. L'approche énergétique des bonds graphes et l'utilisation de variables génériques de puissance permettent de sélectionner les variables de puissance en fonction du système physique à modéliser.

Analyse d'un moteur à courant continu

Sommaire

3.1	Introduction	36
3.2	moteur à courant continu	38
3.2.1	Introduction	38
3.2.2	Les Composants de MCC	38
3.2.3	Principe de fonctionnement	40
3.2.4	Les types d'excitation	42
3.2.5	Résumé sur les types de moteur à courant continu	44
3.3	Application MATLAB	46
3.3.1	Introduction	46
3.3.2	Les moteurs à courant continu à excitation séparée	46
3.3.3	Application	48
3.3.4	Simulation simulink	49
3.4	Application SYMBOLS SHAKTI	53
3.4.1	Modalisation par Bond graph	53
3.4.2	Symbols shakti	53
3.5	Comparaison	61
3.6	Génération des indicateurs de fautes	62
3.6.1	Algorithme	62
3.7	Conclusion	78

3.1 Introduction

Tous les systèmes industriels possèdent l'intégration des parties de surveillances, qui sont mis en oeuvre dont l'objectif est d'être capable, à tout instant, de fournir l'état de fonctionnement des différents éléments constitutifs d'un processus technologique. L'opérateur de supervision gère deux types d'information, Tant au niveau de (FDI) qu'au niveau de la tolérance aux fautes (FTC). Le premier type d'information occupe la détection et l'isolation de défauts survenus sur l'installation, et le second indique les possibilités de laisser fonctionner ou non le processus la Figure 3.1 résume le principe de la «FDI» et de la «FTC». D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph, un système de surveillance peut être illustré par la figure 3.2 On distingue essentiellement deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie (formée par le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde représente les signaux (le système d'information, c'est à dire les capteurs et le système de régulation). La partie énergétique du système prise en charge est représenté par le modèle bond graph. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graph usuels (R, C, I, et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux). Les sources peuvent être simples (Se,Sf) ou modulées (Mse, MSf), c'est à dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien de puissance) comportant les variables d'effort et de flux. Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche). Les algorithmes de surveillance reçoivent les informations en ligne issues des capteurs et délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défailants sont transmises au service de maintenance. Dans les sections suivantes les différentes approches de FDI par bond graph sont présentées. On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus : l'approche quantitative et l'approche qualitative.

Nous nous intéressons dans ce chapitre aux méthodes de diagnostic à base du modèle bond graph. Au début, on présente le moteur à courant continu et les types d'excitation. Par la suite, On a simulé le modèle mathématique du moteur qui est composé par une partie mécanique et une partie électrique, Ensuite on expose les approche qualitative et quantitative pour la surveillance utilisant les bond graph toujours, après on fait rappelle les étapes de diagnostic par bond graph, on passe à la procédure de génération des RRAs qui sont détaillée dans ce chapitre et au calcul de matrice de signature de défaillance et on termine avec la procédure de détection et d'isolation de défaillances.

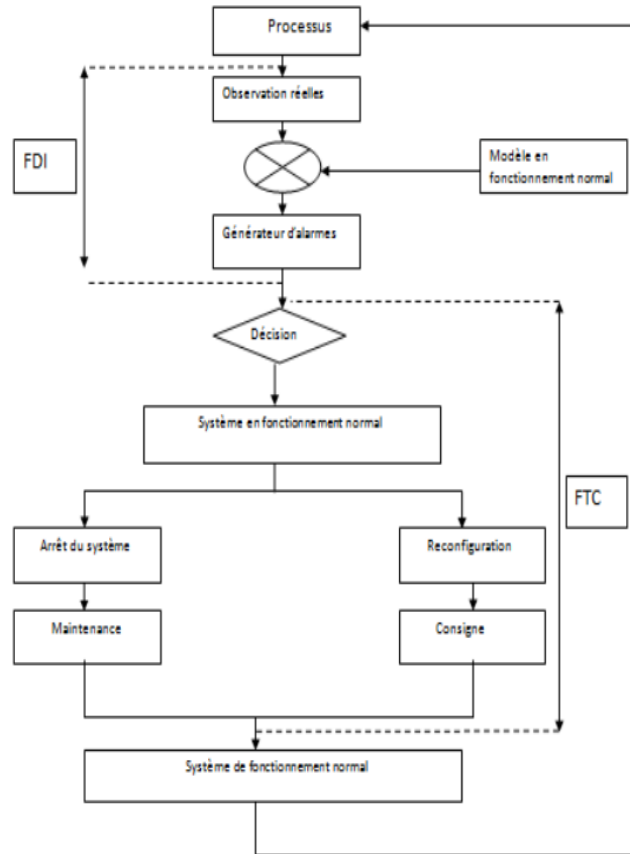


FIGURE 3.1: Schéma de principe de la supervision

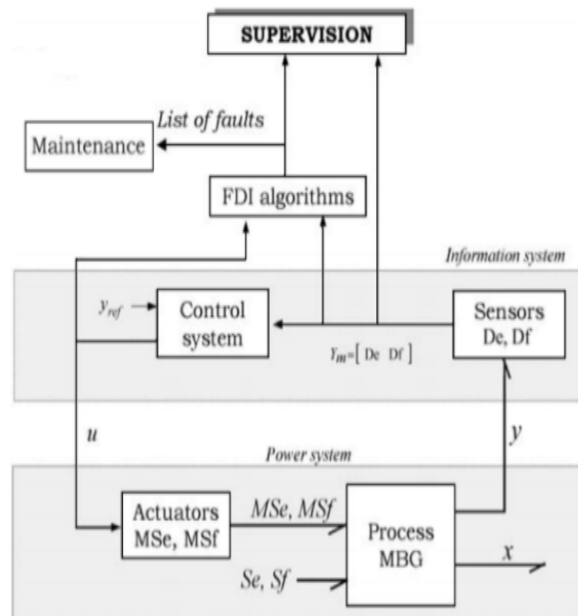


FIGURE 3.2: Représentation bond graph d'un système de surveillance

3.2 moteur à courant continu

3.2.1 Introduction

Un moteur à courant continu (CC) est un type de machine électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Les moteurs à courant continu prennent de l'énergie électrique par le courant continu et convertissent cette énergie en rotation mécanique.

Ces moteurs utilisent les champs magnétiques générés par les courants électriques, qui alimentent le mouvement d'un rotor fixé sur l'arbre de sortie. Le couple et la vitesse de sortie dépendent à la fois de l'entrée électrique et de la conception du moteur.[30]

3.2.2 Les Composants de MCC

3.2.2.1 Le rotor/induit

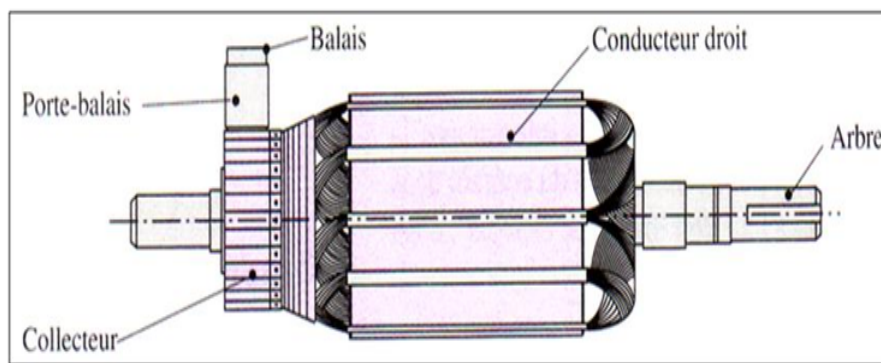


FIGURE 3.3: L'induit

L'induit du moteur à courant continu est composé d'un arbre sur lequel est empilé un ensemble de disques ferromagnétiques. Des encoches sont axialement pratiquées à la périphérie du cylindre formé par les disques empilés. Dans ces encoches les enroulements (bobines de l'induit) sont "bobinés" selon un schéma très précis et complexe qui nécessite une main d'œuvre particulière (coûts importants). Pour cette raison, on préfère, en général, s'orienter vers des moteurs à courant alternatif plus robuste et simple dans leur conception.

Chaque enroulement est composé d'une série de sections, elles même composées de spires; une spire étant une boucle ouverte dont l'aller est placé dans une encoche de l'induit et le retour dans l'encoche diamétralement opposée. Pour que l'enroulement soit parcouru par un courant, ses conducteurs de départ et de retour sont connectés aux lames du collecteur (cylindre calé sur l'arbre et composé en périphérie d'une succession de lames de cuivre espacée par un isolant).[32]

3.2.2.2 Le collecteur

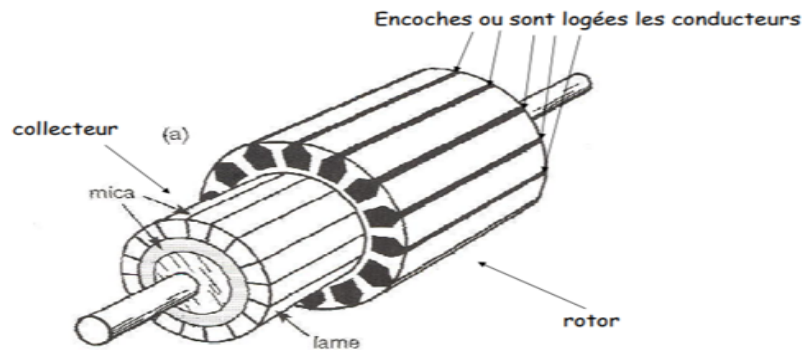


FIGURE 3.4: Collecteur

- Ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres.
- Chaque lame est soudée à un des deux fils sortant d'une des bobines de l'induit.
- Il tourne avec le rotor.
- Il est essentiellement constitué par une juxtaposition cylindrique de lames de cuivre séparées par des lames isolantes.
- Chaque lame est reliée électriquement au bobinage induit.[33]

3.2.2.3 Balais

- Faits en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement.
- Assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante.
- En s'appuyant sur le collecteur, assurent un contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur.
- Dans une machine à enroulements imbriqués, il y a autant de balais que de pôles magnétiques inducteurs.[34]



FIGURE 3.5: Collecteur

3.2.2.4 Stator/L'inducteur

L'inducteur d'un moteur à courant continu est la partie statique du moteur. Il se compose principalement :

- la carcasse.
- paliers.
- flasques de palier.
- portes balais.

Le cœur même du moteur comprend essentiellement :

Un ensemble de paires de pôles constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques.

Les enroulements (ou bobinage en cuivre) destinés à créer le champ ou les champs magnétiques suivant le nombre de paires de pôles.

Pour des moteurs d'une certaine puissance, le nombre de paires de pôles est multiplié afin de mieux utiliser la matière, de diminuer les dimensions d'encombrement et d'optimiser la pénétration du flux magnétique dans l'induit.[35]

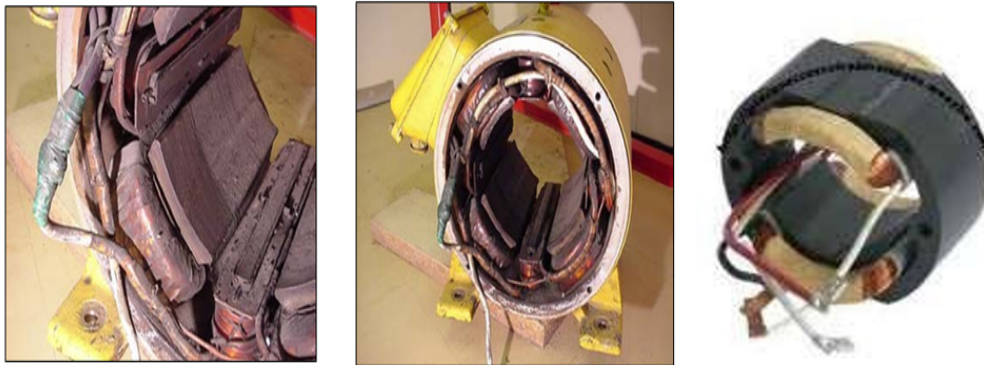


FIGURE 3.6: L'inducteur

3.2.3 Principe de fonctionnement

Le terme "moteur à courant continu" est utilisé pour désigner toute machine électrique rotative qui convertit l'énergie électrique en courant continu en énergie mécanique. Les moteurs à courant continu peuvent varier en taille et en puissance, allant des petits moteurs de jouets et d'appareils ménagers aux grands mécanismes qui propulsent les véhicules, tirent les ascenseurs et les palans, et entraînent les laminoirs à acier. Mais comment fonctionnent les

moteurs à courant continu ?

Les moteurs à courant continu comprennent deux éléments clés : un stator et un induit. Le stator est la partie fixe d'un moteur, tandis que l'armature tourne. Dans un moteur à courant continu, le stator fournit un champ magnétique rotatif qui entraîne l'induit en rotation.

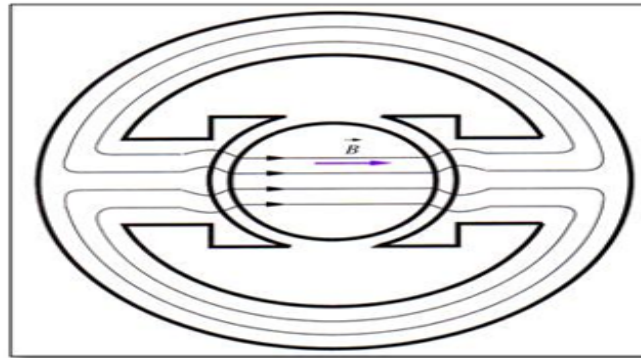


FIGURE 3.7: Le champ magnétique rotatif qui entraîne l'induit en rotation

Un moteur à courant continu simple utilise un ensemble fixe d'aimants dans le stator et une bobine de fil parcourue par un courant pour générer un champ électromagnétique aligné sur le centre de la bobine. Un ou plusieurs enroulements de fil isolé sont enroulés autour du noyau du moteur pour concentrer le champ magnétique.

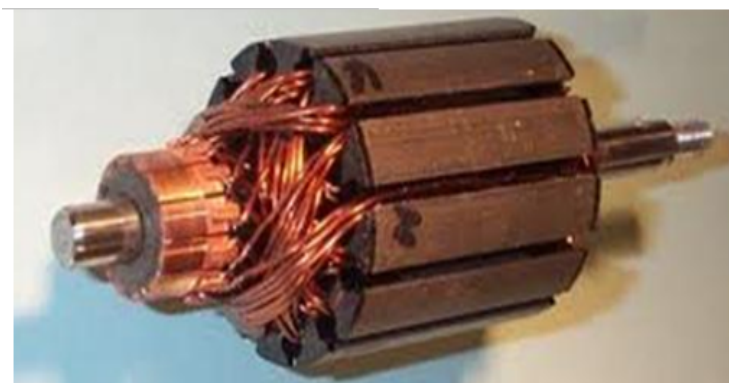


FIGURE 3.8: La bobine

Les enroulements de fil isolé sont reliés à un commutateur (un interrupteur électrique rotatif), qui applique un courant électrique aux enroulements. Le commutateur permet à chaque bobine de l'induit d'être alimentée à son tour, créant ainsi une force de rotation régulière (appelée couple).

Lorsque les bobines sont activées et désactivées en séquence, un champ magnétique rotatif est créé et interagit avec les champs différents des aimants stationnaires du stator pour créer un couple, qui le fait tourner. Ces principes de fonctionnement clés des moteurs à courant continu leur permettent de convertir l'énergie électrique du courant

continu en énergie mécanique par le biais du mouvement de rotation, qui peut ensuite être utilisé pour la propulsion d'objets.[36]

3.2.4 Les types d'excitation

3.2.4.1 Moteur à excitation indépendante

Comme dans le cas des génératrices à excitation indépendante, le bobinage inducteur des moteurs à excitation indépendante est raccordé à une alimentation à courant continu séparée.

Par conséquent, le courant qui alimente l'inducteur est indépendant de celui qui alimente l'induit.[32]

Caractéristique mécanique :

La caractéristique mécanique est la relation entre la vitesse de rotation et le couple moteur.

La caractéristique mécanique est relevée à tension d'alimentation et à flux constants.

Lorsque le courant d'induit augmente, le couple qui lui est proportionnel augmente, ainsi que la chute de tension aux bornes de l'induit. Cette dernière fait chuter la force contre-électromotrice. Par conséquent, la vitesse diminue puisqu'elle est proportionnelle à la f.c.é.m.

Ce type d'excitation est fréquemment utilisé lorsqu'on désire faire varier la vitesse entre de larges limites avec un couple moteur constant. Dans ce cas, le flux étant maintenu constant, on fait varier la tension d'alimentation de l'induit à l'aide d'une génératrice à tension réglable.

La vitesse étant inversement proportionnelle au flux, si le flux s'annule (ce qui peut se produire, par exemple, par rupture du circuit d'excitation), la vitesse prendra des valeurs très élevées et le moteur aura tendance à s'emballer. On doit donc prévoir un dispositif de protection du circuit inducteur.

3.2.4.2 Moteur à excitation en dérivation ou shunt

Dans un moteur à excitation en dérivation, le circuit inducteur est branché en parallèle avec l'induit et, de ce fait, alimenté sous la même tension. Ce moteur a les mêmes caractéristiques que le moteur à excitation indépendante. Il est utilisé sur des machines-outils démarrant à vide et sur des pompes de circulation. La figure suivante vous montre le schéma d'un moteur à excitation en dérivation.

3.2.4.3 Moteur à excitation en série

Dans un moteur à excitation en série, le circuit inducteur qui produit le champ est raccordé en série avec l'induit.

Caractéristique mécanique :

Le couple est proportionnel au flux et au courant d'induit, il devient proportionnel au carré du courant d'induit.

Si l'on augmente la charge, le flux augmente proportionnellement. Quant au couple, il augmente selon le carré du courant d'induit. Comme la vitesse est inversement proportionnelle au flux, elle diminue.

On remarque, sur la caractéristique, qu'il n'y a pas de vitesse à vide. En effet, si le moteur tourne à vide, le courant d'induit est nul.

Aucun champ n'est produit dans le moteur. Le flux est nul. Comme la vitesse est inversement proportionnelle au flux, elle tend à prendre des valeurs très élevées.

On parle de l'emballement du moteur. C'est pourquoi, on ne fait jamais démarrer un moteur à excitation en série à vide.

L'avantage de ce type d'excitation réside dans le couple qui est maximal au démarrage du moteur.

Ce moteur est bien adapté pour démarrer avec de grosses charges dont l'inertie est élevée. Il est particulièrement utile comme moteur d'entraînement des trolleys, des trains et des systèmes de traction à grande puissance.[32]

3.2.4.4 Moteur à excitation composée

Le moteur à excitation composée comporte un inducteur série et un inducteur shunt. Comme dans le cas des génératrices, lorsque le flux de l'inducteur série s'ajoute à celui de l'inducteur shunt, le moteur est appelé à excitation composée à flux additif.

Par contre, si l'inducteur série est raccordé de façon que son flux soit dans le sens contraire du flux de l'inducteur shunt, le moteur est à excitation composée à flux soustractif.

Ce genre de moteur peut être branché en longue dérivation ou en courte dérivation.

Lorsque le moteur tourne à vide, le courant dans l'inducteur série est faible et son flux est négligeable si on le compare à celui de l'inducteur shunt. Le moteur agit alors comme un moteur shunt. Il présente donc un avantage par rapport au moteur à excitation série : il ne s'emballe pas à vide.

Flux additif :

Lorsque la charge augmente, le flux de l'inducteur série augmente et s'ajoute à celui de l'inducteur shunt.

Le flux total augmente donc dans le moteur. La vitesse étant inversement proportionnelle au flux, elle diminue lorsque le flux augmente.

Ce genre de moteur sert à entraîner des charges très élevées pendant une courte durée (étaux-limeurs, poinçonneuses, cisailles, etc.).

Flux soustractif[32] :

Lorsque la charge augmente, le flux de l'inducteur série s'oppose au flux de l'inducteur shunt. Cela amène une diminution du flux total dans le moteur. Par conséquent, la vitesse augmente.

3.2.4.5 Moteur à aimants permanents

Les moteurs à aimants permanents comportent des aimants permanents plutôt que des enroulements inducteurs pour produire le champ magnétique du stator.

Ces aimants assurent une intensité de champ constante, ce qui amène des caractéristiques similaires à celles des moteurs à excitation en dérivation.

On se sert des moteurs à aimants permanents pour des applications de faible et moyenne puissance, en particulier pour les appareils alimentés par pile. Il est également très utilisé en robotique.

3.2.5 Résumé sur les types de moteur à courant continu

A la suite de cette étude, vous devriez retenir plus particulièrement les points suivants :

- Il y a cinq modes d'excitation des moteurs à courant continu :

- excitation indépendante.
- excitation en dérivation.
- excitation en série.
- excitation composée.
- excitation par aimants permanents.

- La caractéristique mécanique est la relation entre la vitesse de rotation et le couple moteur.

- La vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation, en négligeant la chute de tension aux bornes de l'induit, et inversement proportionnelle au flux.

- Le couple est proportionnel au flux et au courant d'induit.

- Dans le cas des moteurs à excitation en dérivation ou à excitation indépendante, la vitesse diminue légèrement lorsque la charge augmente. Si le flux s'annule par rupture du circuit d'excitation, ces moteurs s'emballent.
- La vitesse d'un moteur à excitation en série diminue considérablement lorsque la charge augmente. A vide, ce moteur s'emballé.
- A vide, un moteur à excitation composée agit comme un moteur shunt. Il ne s'emballé pas.
- Lorsque les flux des inducteurs shunt et série s'ajoutent, il s'agit de flux additif : la vitesse diminue avec la charge.
- Lorsque les flux des inducteurs shunt et série sont contraires, il s'agit de flux soustractif : la vitesse augmente avec la charge.
- On utilise des moteurs à aimants permanents lorsqu'il est question d'appareils alimentés par pile ou en robotique.

3.3 Application MATLAB

3.3.1 Introduction

Nous allons simuler le modèle mathématique du moteur à courant continu qui est composé par une partie mécanique et d'une partie électrique à excitation séparée pour visualisé la vitesse, le couple, le courant de l'induit et le courant d'inducteur.

3.3.2 Les moteurs à courant continu à excitation séparée

Les moteurs à courant continu à excitation séparée sont aujourd'hui des concurrents industriels des moteurs à courant alternatif. En raison de leur fiabilité, ils sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Pour leur utilisation industrielle continue, ce moteur a été choisi comme moteur de référence pour le travail de thèse. La bobine de champ (ou stator) contient un nombre relativement important de tours qui minimise le courant nécessaire pour produire un champ statorique puissant. Elle est connectée à une alimentation en courant continu séparée, rendant ainsi le courant de champ indépendant du courant de charge ou d'induit.

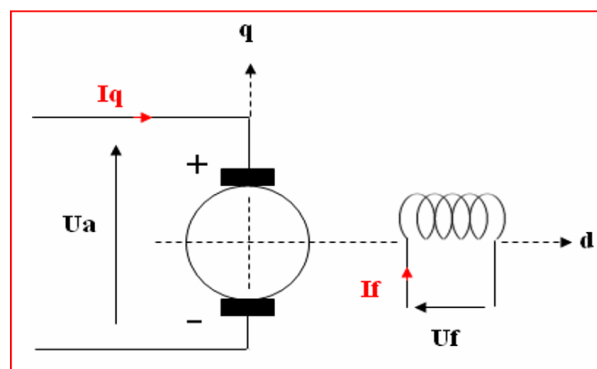


FIGURE 3.9: Schéma électrique excitation séparée

3.3.2.1 Fonctionnement

Lorsqu'un moteur à excitation séparée est excité par un courant d'excitation de I_f et qu'un courant d'induit de I_q circule dans le circuit, le moteur développe une force contre-électromotrice et un couple pour équilibrer le couple de charge à une vitesse particulière. Le I_f est indépendant du I_q . Chaque enroulement est alimenté séparément. Toute modification du courant d'induit n'a aucun effet sur le courant d'excitation. Le courant I_f est normalement beaucoup plus faible que le courant I_q . Les enroulements de champ sont utilisés pour exciter le flux de champ. Le courant d'induit est fourni au rotor par l'intermédiaire du balai et du collecteur pour le travail mécanique. L'interaction du flux d'excitation et du courant d'armature dans le rotor produit un couple.

3.3.2.2 Le bilan de puissance

Les équations caractéristiques sont :

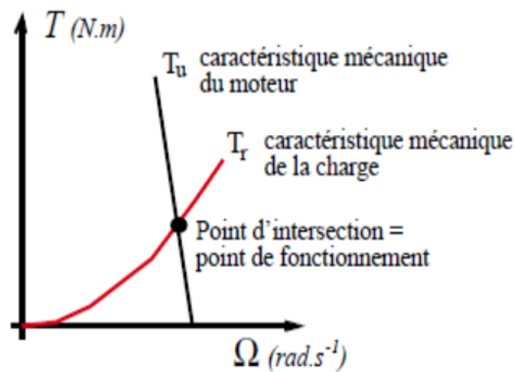
$$\begin{aligned} U &= E + RI_q \\ C_e &= K\Phi I_q \\ E &= K\Phi\Omega \end{aligned} \tag{3.1}$$

Nous avons besoin de deux sources d'alimentation : une pour l'inducteur et pour l'armature.

Quatre grandeurs déterminent le fonctionnement du moteur : U , I_q et pour que le moteur puisse entraîner une charge résistif C_r , un couple utile C_u doit être fourni comme :

$$C_u = C_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.



P_a : la puissance absorbée (W)

U_f : la tension de l'inducteur (V)

I_f : le courant d'inducteur (A)

E : la f.é.m. (V)

P_{em} : la puissance électromagnétique (W)

I_q : le courant d'induit (A)

P_u : la puissance utile (W)

C_e : le couple électromagnétique (N.m)

P_{je} : les pertes joules à l'inducteur (W)

C_u : le couple utile (N.m)

P_{j} : les pertes joules à l'induit (W)

Ω : la vitesse de rotation ($rad.s^{-1}$)

P_{fer} : les pertes ferromagnétiques (W)

R_a : la résistance d'induit (Ω)

Le bilan de puissance montre toute la puissance, de la puissance absorbée d'origine mécanique à la puissance utile de l'électrique.

Entre ces deux termes, les recherches porteront sur l'ensemble des pertes mécaniques et électriques, et enfin une puissance est étudiée alors qu'elle correspond notamment au passage de l'énergie mécanique à l'énergie électrique.

Les résultats peuvent être résumés à l'aide du diagramme suivant :

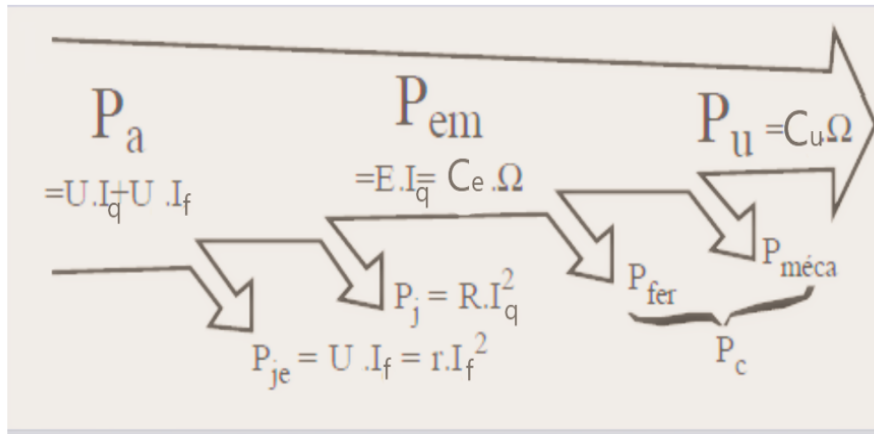


FIGURE 3.10: Le bilan de puissance

3.3.3 Application

À partir de la figure précédente, nous écrivons les équations électromécaniques suivantes :

subsubsectionEquations électriques

$$\begin{cases} Ce = Mfd^*If*Iq \\ u = Rf*I_f + L_f^* \frac{dI_f}{dt} \\ U = Ra * Iq + La * \frac{dI}{dt} + \omega_r^* Mfd^* I_f \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3.3.1 Equations mécaniques

$$J^* \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\omega_r \quad (3.3)$$

On remplace « Ce » de l'Equations électriques dans la partie mecanique

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{Mfd^*Iq^*If}{J} - \frac{C_r}{J} - \frac{j\omega_r}{j} \quad (3.4)$$

3.3.3.2 Paramètre moteur

Les paramètres utilisés pour la simulation sont les suivants :

PARAMETRES	VALEURS [Unités]
Se : Ua	220 [V]
Se : Uf	220 [V]
R : Ra	6.76 [Ω]
I : Ia	0.198 [H]
R : Rf	880 [Ω]
I : If	55.366 [H]
R : f	0.00019 [N.m.s/rd]
I : J	0.0398 [$Kg.m^2$]

TABLE 3.1: Paramètres utiliser pour la simulation du MCC à excitation séparée

3.3.4 Simulation simulink

Pour faire la simulation de systèmes électromécanique comme les machines à courant continu pour ce faire. Nous utiliserons le logiciel MATLAB auquel est intégré l'outil SIMULINK qui est une référence en la matière Simulink est une plate –forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permet le design précis la simulation l'implémentation et le contrôle de systèmes.

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

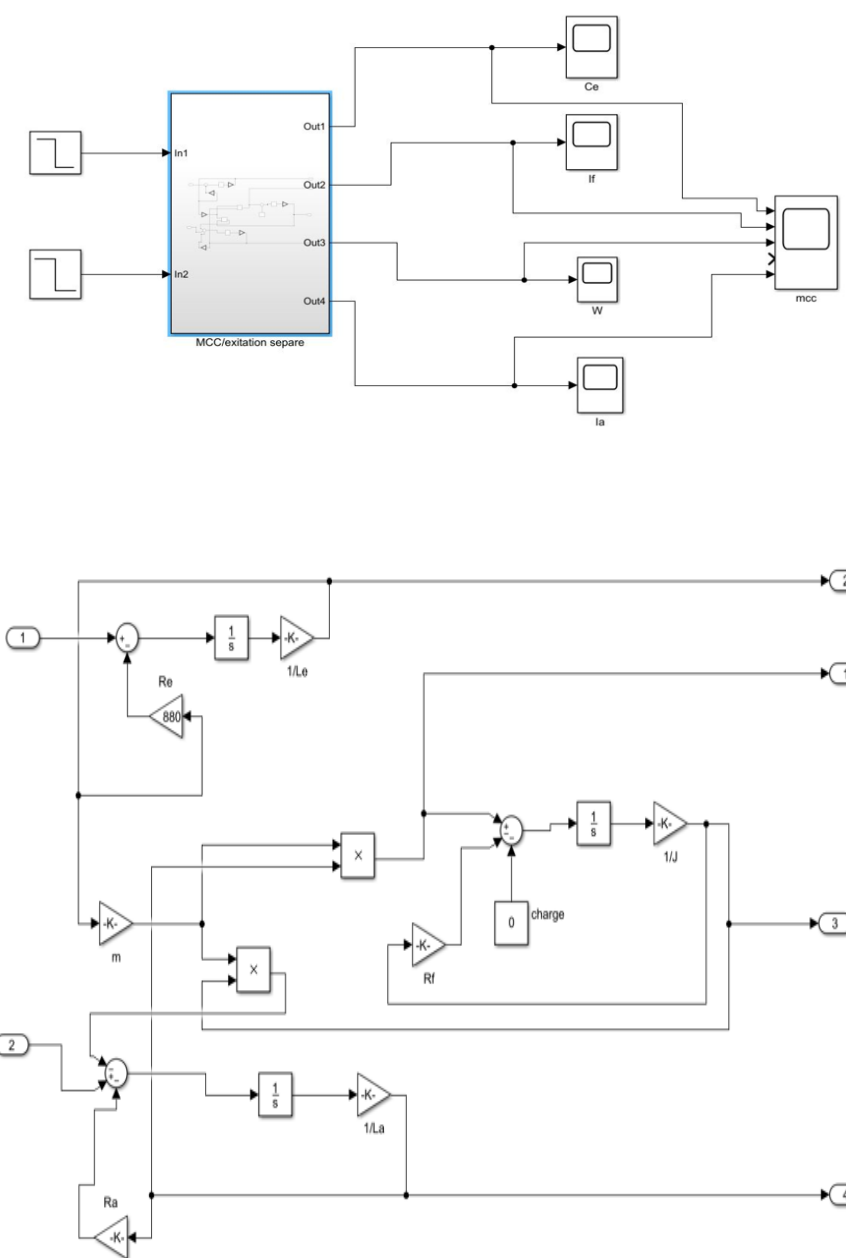


FIGURE 3.11: Modèle Matlab du MCC à excitation séparée

À partir modèle du moteur à courant continu à excitation séparée , on effectue une simulation qui sera répartie comme suit :

Dans la première partie on donne des résultats avec une charge résistante nulle donc le moteur est à vide.

En suit On procède à la simulation avec une charge sur le moteur de 5 N.m .

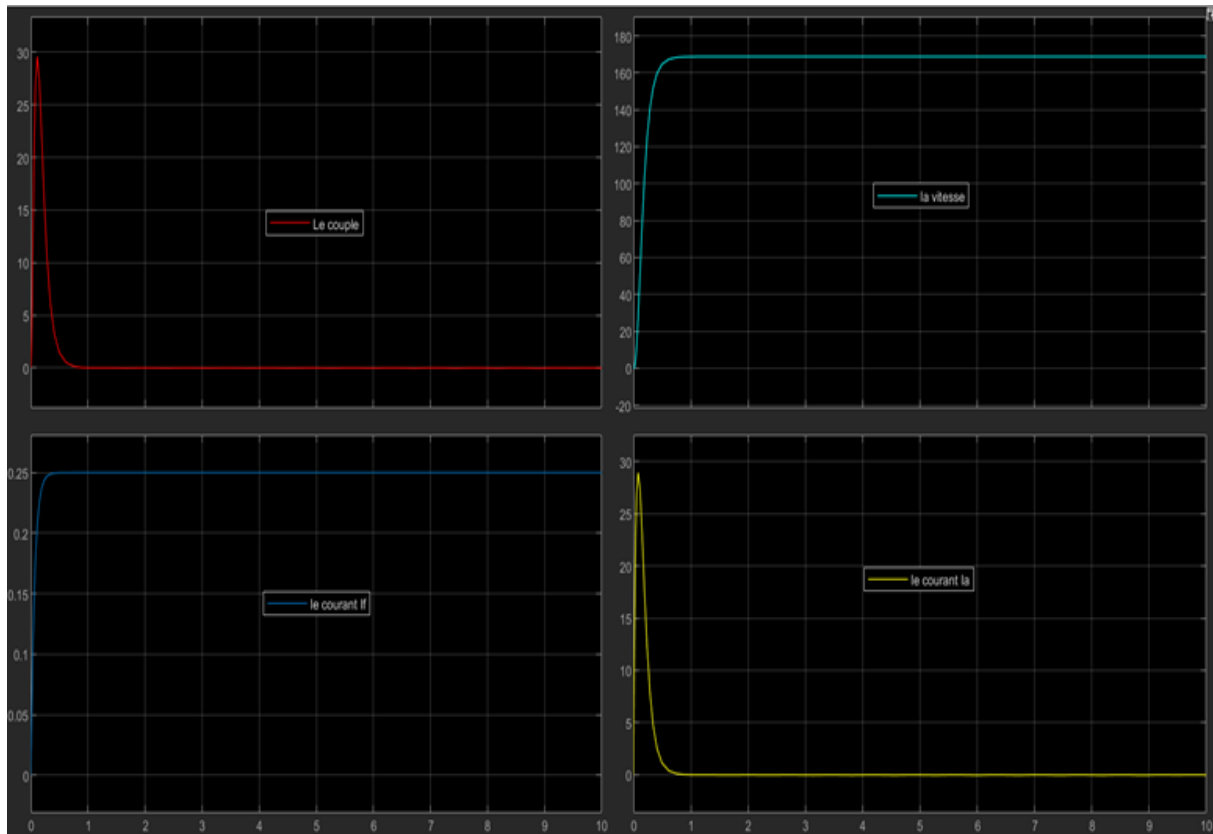


FIGURE 3.12: Simulation du MCC à excitation séparée (a vide).

À partir de la simulation de les courant (if) et (iq), la vitesse et le couple en fonction du temps pour moteur courant continue à excitation sépare, on optaient que La variation de la vitesse dépend de la variation de la tension selon l'équation :

$$\varphi = K' * If$$

$$\omega = \frac{U - RIq}{Mfd * \varphi}$$

Puisque le moteur est à vide donc le courant iq est nulle

$$\omega = \frac{U}{Mfd * \varphi}$$

La vitesse de rotation atteint, la vitesse nominale 168.69 rad/s donc 1610.87tour/min après une période transitoire qui dur environ 0.108 sec. Ainsi, la partie transitoire du courant est équivalente a celle de la vitesse (0.108 sec) avec une valeur crête d'environ Le courant if 0.2475 A.

La partie transitoire du couple est équivalente à celle du courant d'induit selon l'équation

$$C = Mfd * K' * If * Iq$$

De (0.108 sec) avec un pique de démarrage d'environ 29.61 N.m et d'un courant 28,94A et ensuite, le couple reprend le régime nominal avec une valeur nulle de 0.032 N.m

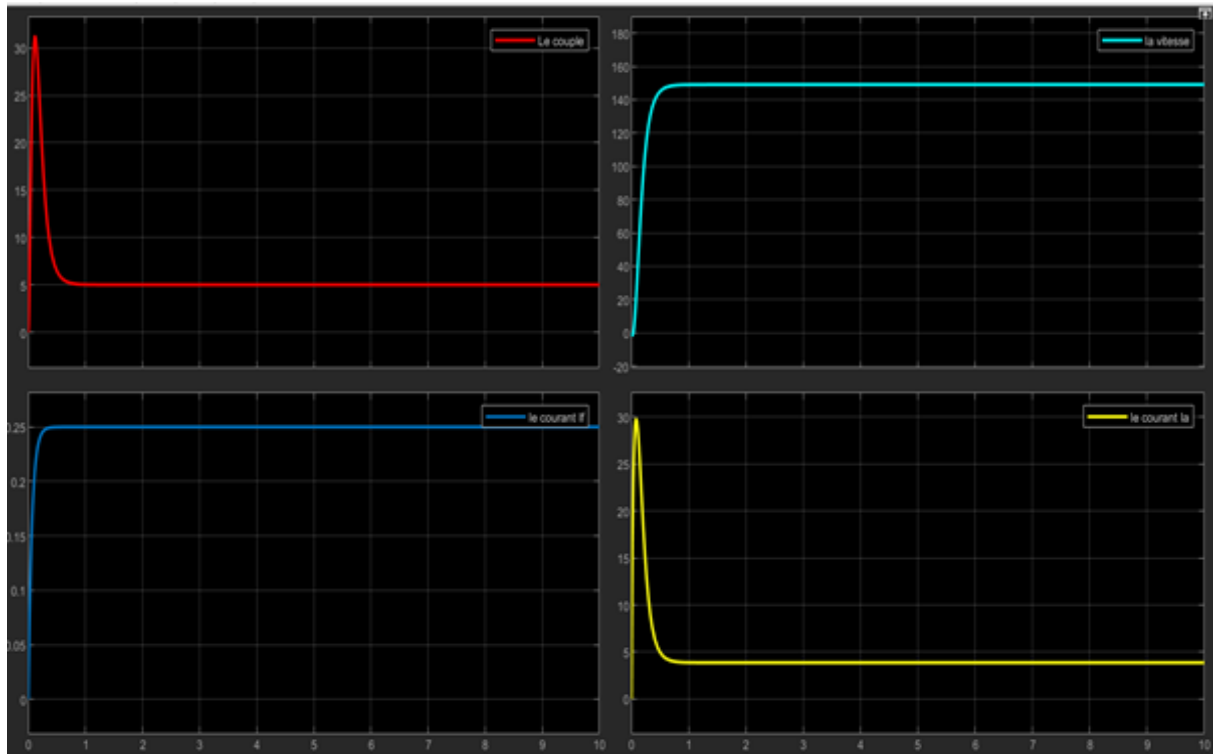


FIGURE 3.13: Simulation du MCC à excitation séparée (a charge)

La vitesse de rotation atteint, la vitesse nominale 149.06 rad/s donc 1423.4tour/min après une période transitoire qui dure environ 0.108 sec . Ainsi, la partie transitoire du courant est équivalente a celle de la vitesse (0.108 sec) avec une valeur d'environ Le courant if 0.25 A, la diminution de la vitesse a cause de l'augmentation du courant I_q .

$$\omega = \frac{U - R * I_q}{M f d * \varphi}$$

Pour le couple on a un pique de démarrage de 31.22 N.m et un courant de 29.7A ensuite, le couple reprend le régime nominal avec une valeur de 5.028 N.m et un courant d'duit de 3.85 A.

3.4 Application SYMBOLS SHAKTI

3.4.1 Modalisation par Bond graph

Dans cette partie, nous avons réalisé une modélisation graphique du moteur à courant continu (seule la transmission de puissance est considérée, sans recourir à des équations mathématiques)

3.4.2 Symbols shakti

Nous avons fait un model bond graph qui représente le moteur à excitation indépendante avec Le logiciel Symbols shakti.

Les éléments sont repartie en deux parties :

Partie électrique

- Source d'effort "Ua :SE " alimentation pour l'induit.
- L'élément "I : La " pour l'inductance de l'induit en série avec "R :Ra ".
- Source d'effort "Uf :SE " alimentation pour l'inductance.
- Les éléments Rf et If de l'inductance sont reliés en série par la jonction "1".

la partie mécanique

- Coefficient de couple frein présenté par l'élément R :f et l'élément présente l'inertie du moteur.
- Le gyrateur "Gy :m" c'est le point de transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

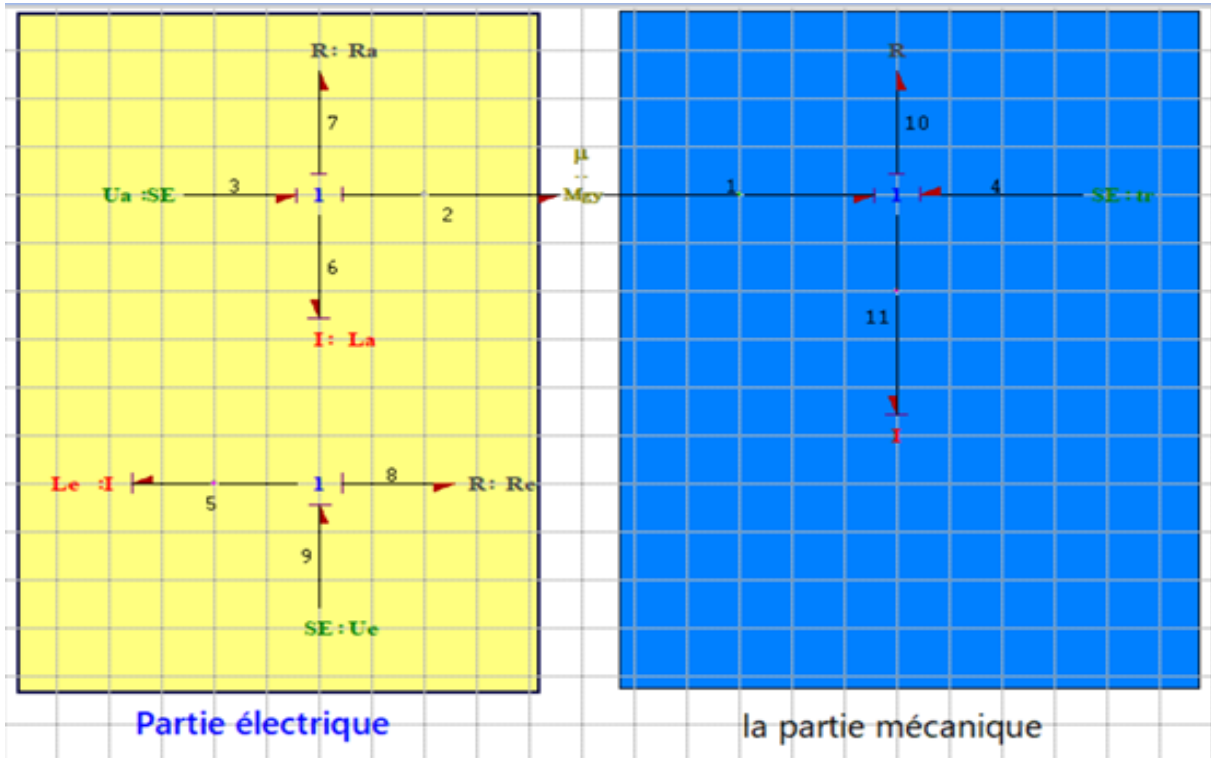


FIGURE 3.14: Modèle bond graph du MCC à excitation séparée

Après avoir conçu notre modèle, nous simulons ce modèle, ce qui est une étape nécessaire pour ne pas dire primordiale dans le travail de modélisation, représentant une bonne fonctionnalité du modèle, dans Modeling Tool (symbols shakti). Ce programme peut générer des équations de notre modèle un simple cliquer.

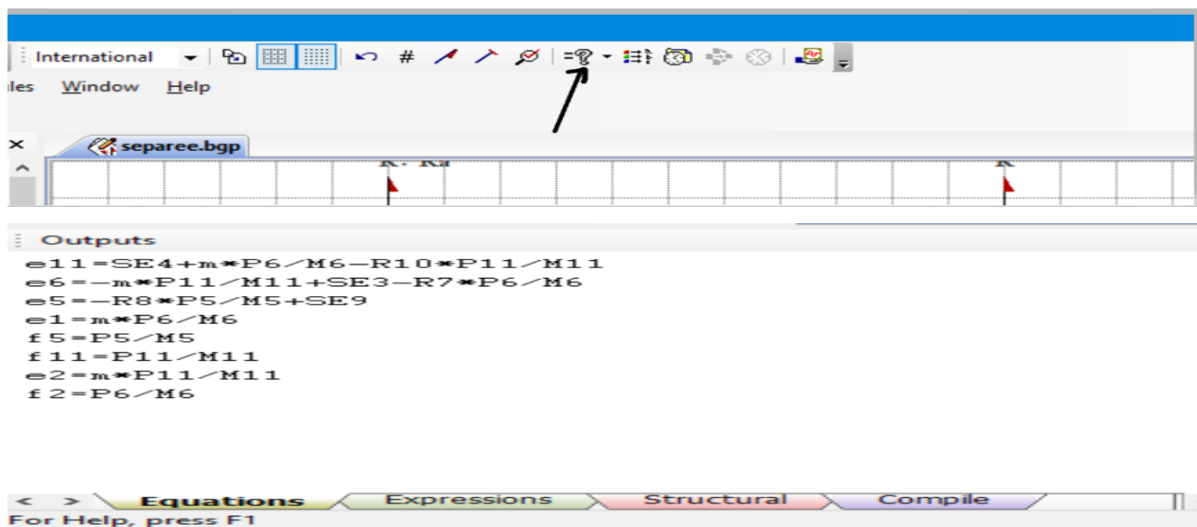


FIGURE 3.15: programme pour générer des équations de notre modèle une simple cliquer

— 1) La modélisation d'un système se fait dans le module "BondPad",,

— 2) la simulation se fait dans la fenêtre "Simulator". Les étapes pour accéder à la simulation sont :

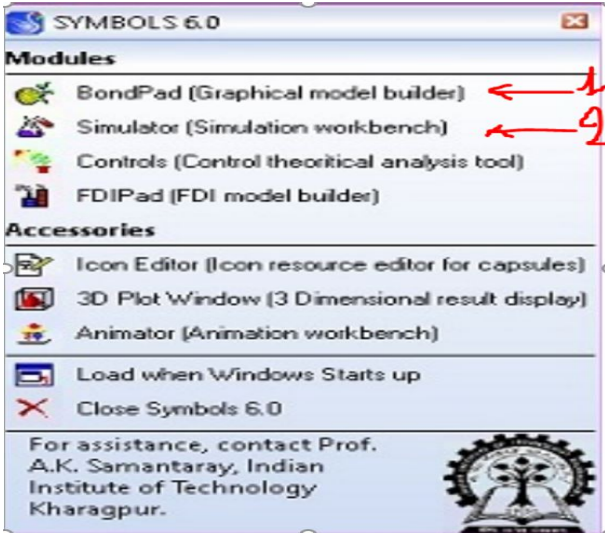


FIGURE 3.16: SYmbols shakti

Pour accéder à l'affichage des résultats de la simulation, il faut :

- La modélisation de notre système se fait dans le module "BondPad", par contre, la simulation se fait dans la fenêtre "Simulator", Les étapes pour accéder à la simulation sont :

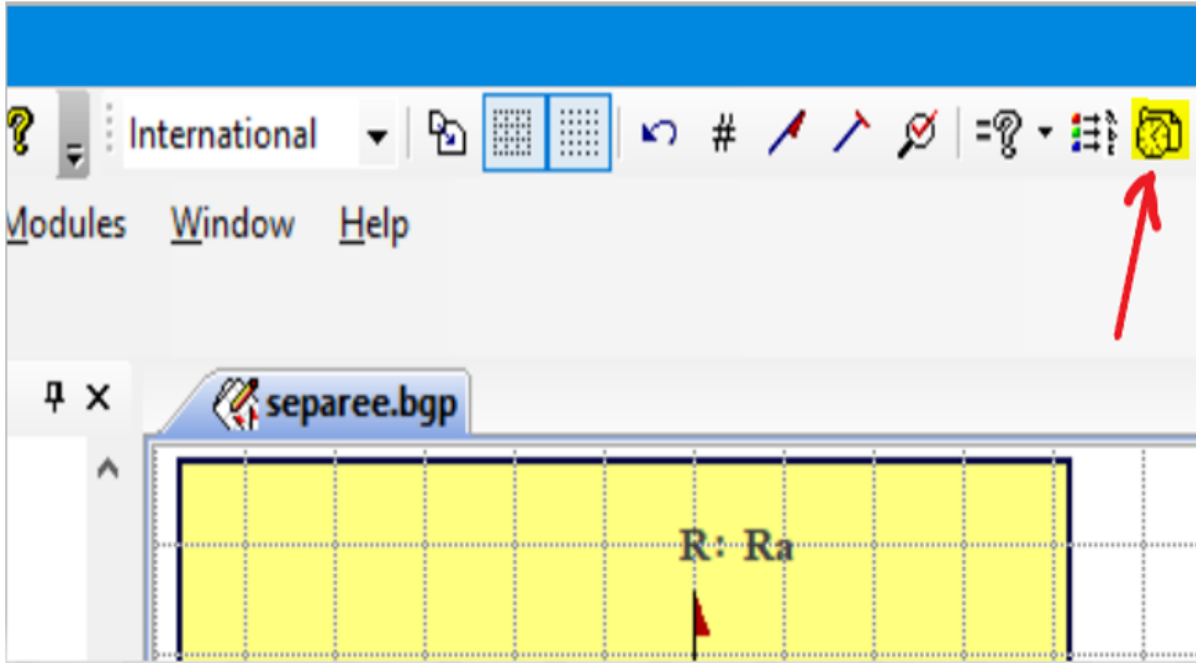


FIGURE 3.17: étape 1 - simulation

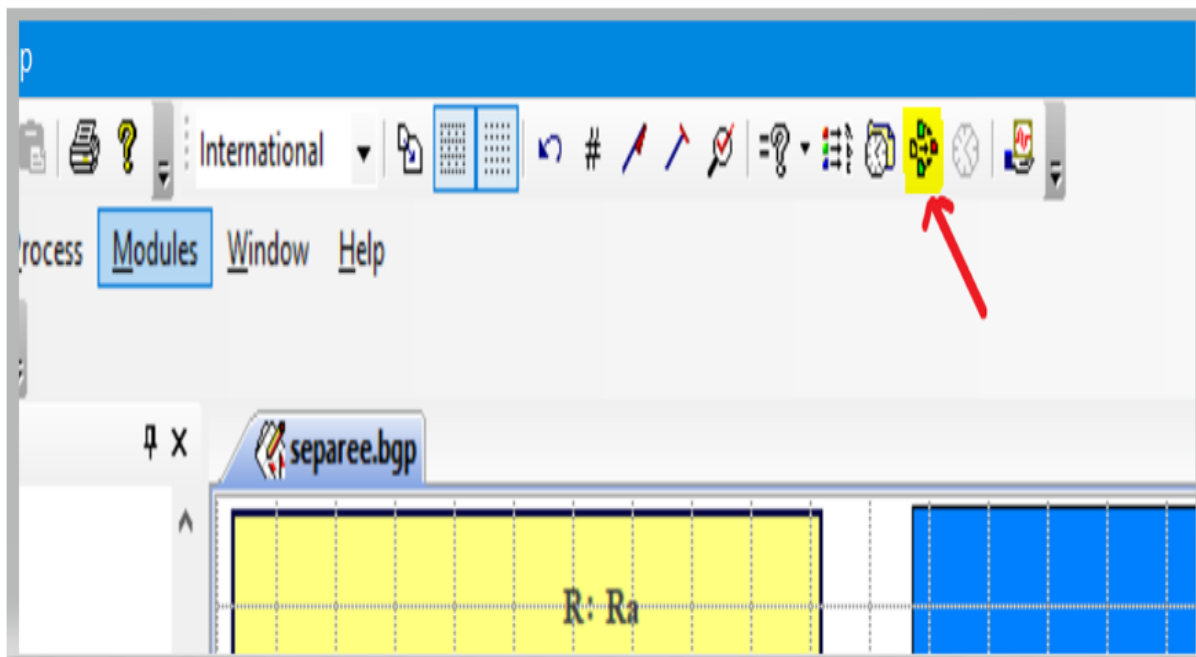


FIGURE 3.18: étape 2 - simulation

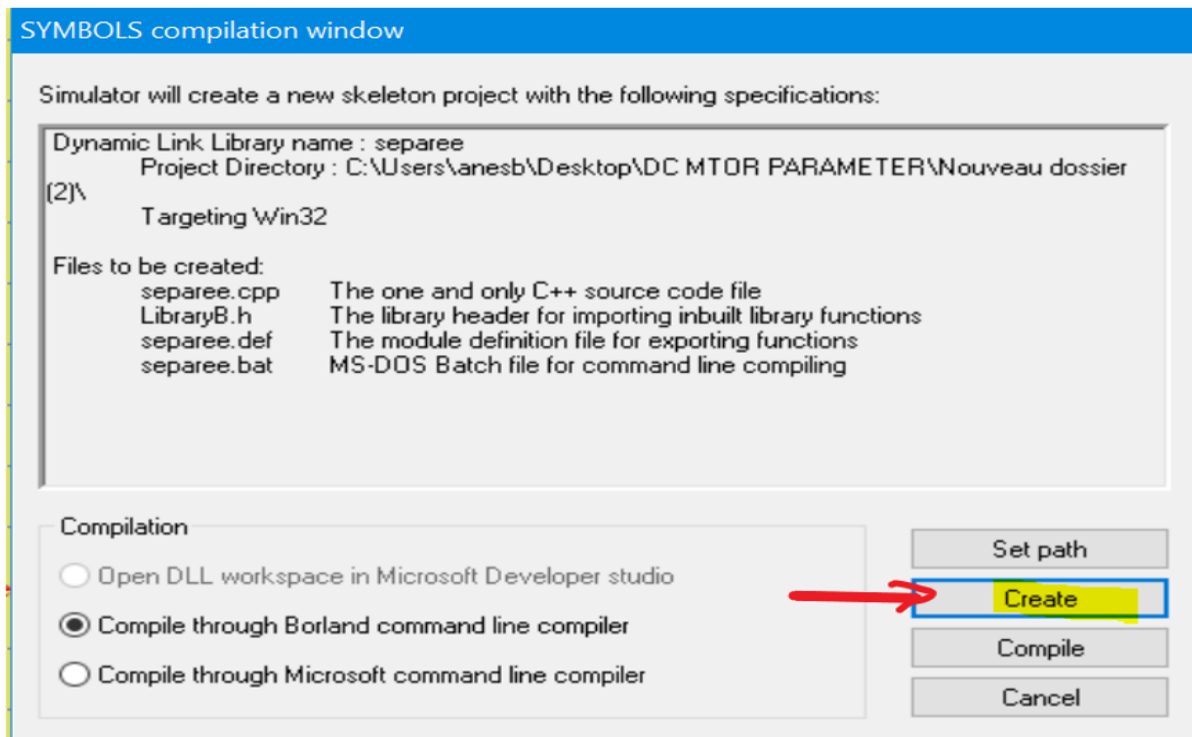


FIGURE 3.19: étape 3 - simulation

S'il n'y a pas d'erreurs après compilation on procède a la simulation de notre modèle.

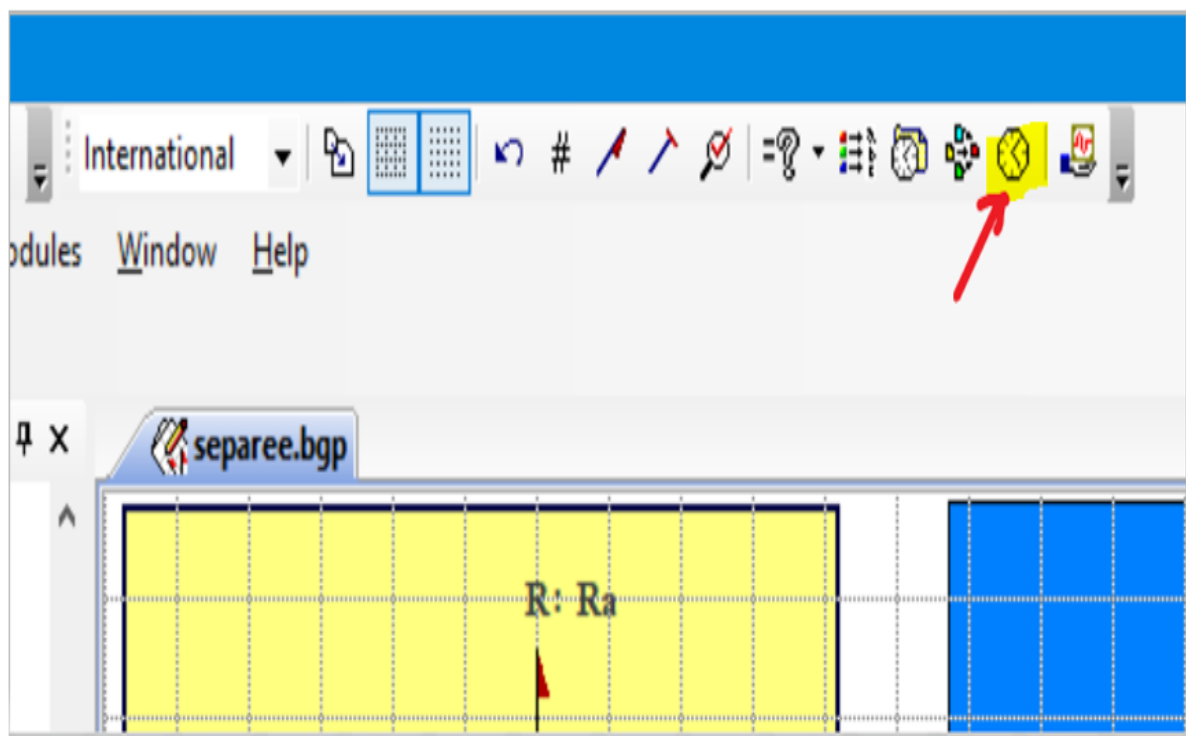


FIGURE 3.20: étape 4 - simulation

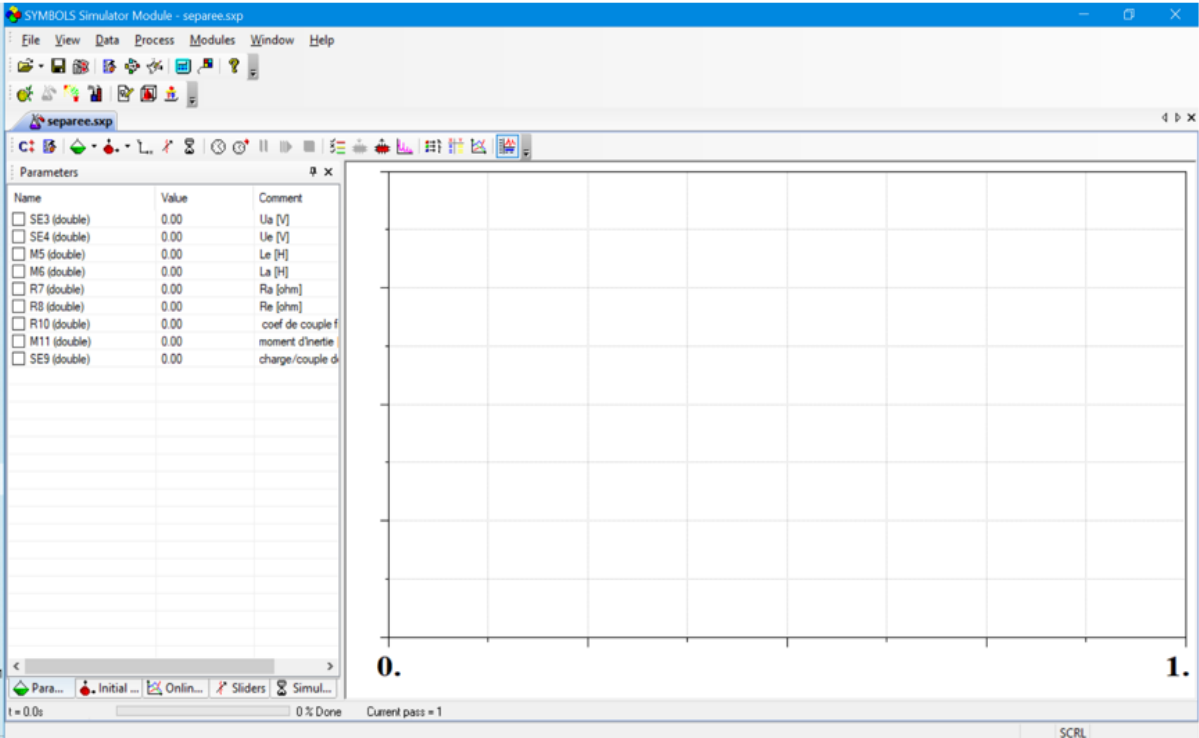


FIGURE 3.21: étape 5- simulation

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

Nous faisons la même chose que dans simulink, en premier lieu, nous voyons les résultats de la simulation avec le moteur à charge nulle.

En deuxième lieu on procède à la simulation avec une charge sur le moteur de 5 N.m.

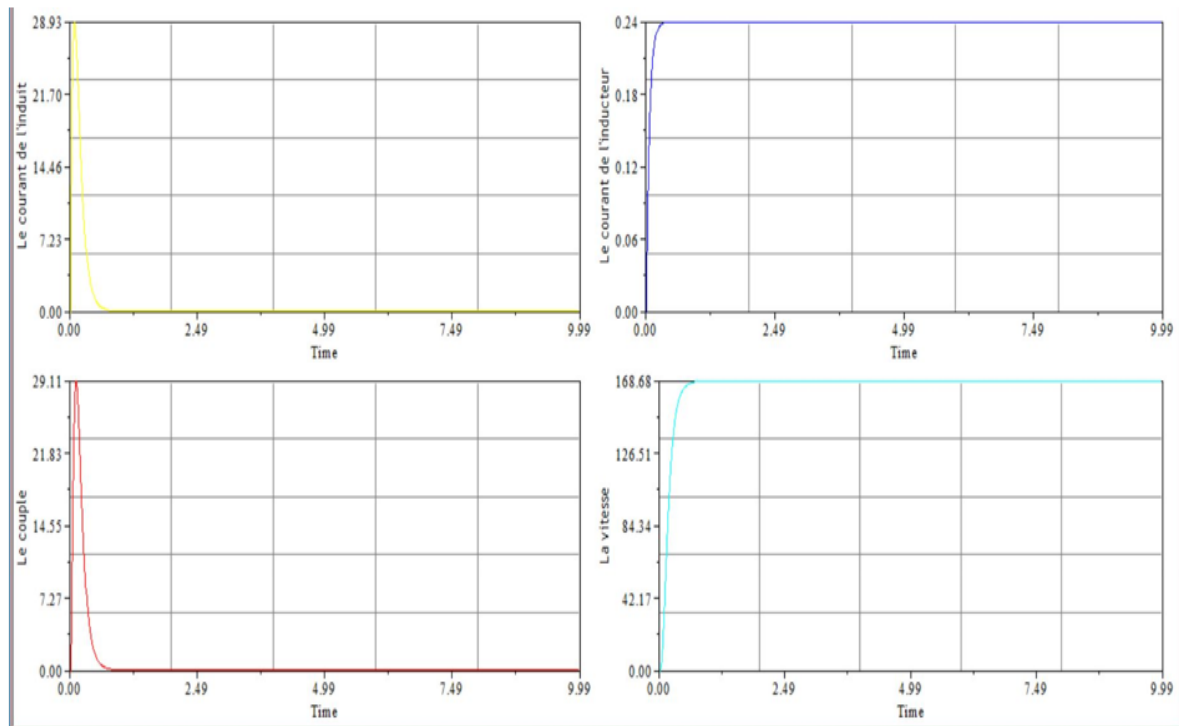


FIGURE 3.22: Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (à vide)

Voici donc le résultat de la simulation d'un moteur à courant continu avec excitation séparée, avec un couple résistif nul. À partir de ces simulations on constate que le couple. D'après ces simulations, nous pouvons voir que le moteur subit un couple de démarrage de 29.11 N.m et un courant d'induit de 28.93A puis le couple et le courant reviennent au régime nominal avec une valeur nulle. D'après ce que nous voyons le couple et le courant de l'induit sont similaires selon la formule du générateur :

$$e1 = m * f2$$

d'un autre côté, on a :

$$e1 = e10 + e11$$

On voit que la vitesse de rotation atteint la vitesse nominale 168.68 rad/s donc 1610.894tour/min et si la vitesse augmente, le couple diminue.

$$f_{11} = (e_2 * f_2) / e_1$$

La vitesse d'un moteur à courant continu est modifiée en changeant le courant dans le champ ou en changeant le courant dans l'armature. Lorsque le courant d'excitation est réduit, le flux d'excitation est réduit, ce qui permet d'augmenter le courant d'induit. Par conséquent, le moteur accélère, donc si le courant de l'induit égal a zéro le moteur s'emballe

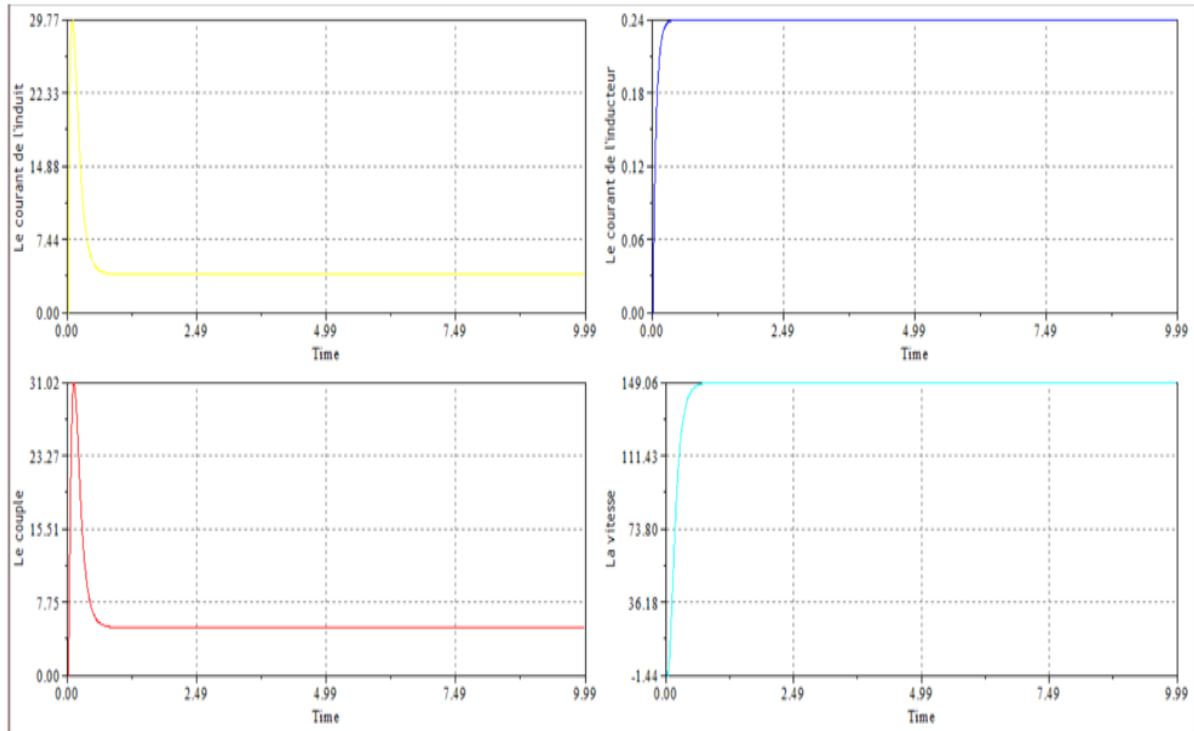


FIGURE 3.23: Simulation du modèle bond graph du MCC à excitation séparée (en charge)

On observe que dans le couple on a un pique de démarrage de 31.02 N.m et un courant de 29.7A ensuite, le couple reprend le régime nominal avec une valeur de 5.028 N.m et un courant d'induit de 3.85 A selon l'équation :

$$e_1 = e_{10} + e_{11} - SE$$

Nous voyons que la vitesse du moteur sous charge diminue ,La vitesse de rotation atteint 149.06 rad/s donc 1423.4 rpm.

3.5 Comparaison

En comparant les résultats de simulation présentés par les figures (matlab simulink) et (sumulator bond graph) qui correspondent aux simulations du modèle du moteur à courant continu à excitation séparée par Matlab Simulink bond graph et bond graph Matlab Simulink successivement, on constate que ces résultats sont les mêmes et les caractéristiques de ce type d'excitation décrites au premier de ce 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 $\tilde{I} = 28.93A$ durant le régime transitoire, puis la vitesse se stabilise sur $\tilde{W} = 168.68rad/s$ par contre le courant d'inducteur et le couple électromagnétique s'annulent.

Avec les mêmes paramètres et un couple résistant de $\tilde{5N.m}$ produit par la charge qu'entraîne le moteur, on remarque que les résultats représentés par les figures (matlab simulink) et (sumulator bond graph) sont identiques, sur ces résultats apparaît clairement la diminution de la vitesse du moteur qui atteint la valeur de $\tilde{W} = 149.06rad/s$, 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.

On conclue que la méthode de modalisation par bond graph est aussi fiable que les méthodes de modalisation classique et qu'il est facile de modéliser un système par bond graph si l'on ne connaît pas ses équations. elle nous permet de développée des modèles numériques à partir des modèles graphiques.

3.6 Génération des indicateurs de fautes

3.6.1 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.

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 « yi correspondant au placement d'un capteur sur une jonction sont telles que :

$Y_i = 1$ si le capteur est placé à la jonction "0" sinon $Y_i = 0$.

$Z_j = 1$ si le capteur est placé à la jonction "1" sinon $Z_j = 0$.

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" ($i = 1, \dots, N_0$).

— m_j le nombre de liens attachés à la j ème jonction "1" ($j = 1, \dots, N_1$).

— e et f représentent l'effort et le flux respectivement. Les équations de la i ème jonction "0" sont :

$$\begin{cases} \sum_l^j a_l e_l = 0 \\ f_l = f_R; l = 1, \dots, m_j - 1 \end{cases}$$

$$\text{où } a_l = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$$

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

$$K = \{MS_e \cup MS_f \cup D_e \cup D_f \cup S_e \cup S_f\}$$

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

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

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 cheminscausaux.

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

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

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 :

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

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

$$\begin{cases} e_{R_j} = \phi \\ R_j [(1 - z_j) f_{R_j} + z_j D f_j] ; j = 1, \dots, N_1 \\ f_{R_j} = \begin{pmatrix} 1 - z \\ j \end{pmatrix} \phi_{R_j}^{-1} (e_{R_j}) + z_j D f_j \end{cases}$$

Et si l'élément « R » est placé sur une jonction « 0 » :

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

3.6.1.1 La génération des RRAs

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 :

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

— Pour toute équation de jonction « 0 et 1 » contenant un détecteur une relation de redondance analytique est déduite.

3.6.1.2 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 :

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la } i_n \text{ RRA contient des variables du } j \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

La matrice S_{ij} est appelée matrice de signature des défaillances qui fournit la logique pour la localisation des défaillances détectées durant le fonctionnement du système.

L'objectif de la procédure de localisation (isolation) est de fournir à l'opérateur la liste des composants défaillants. Chaque composant a une signature représentée par un vecteur ligne 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

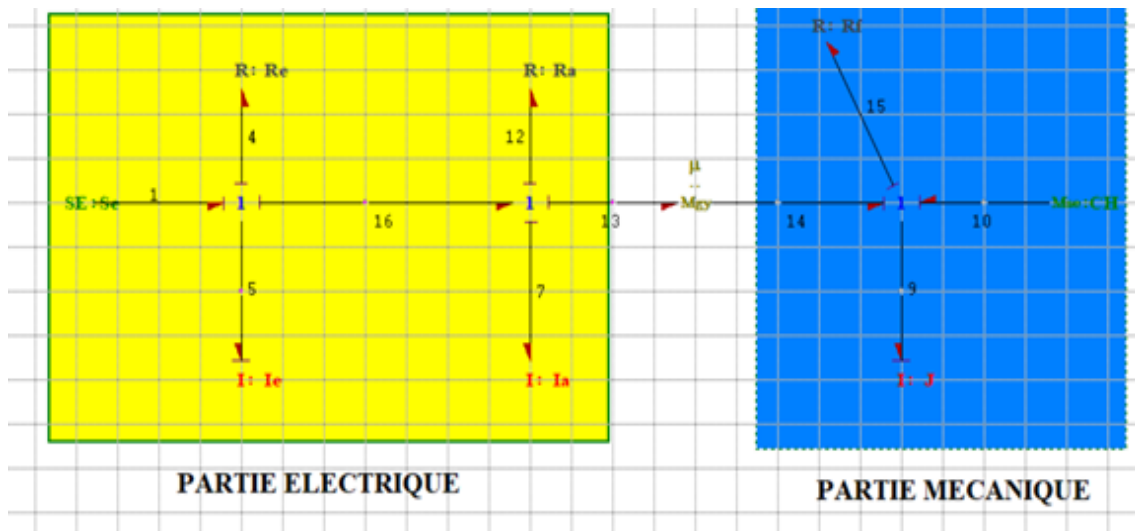


FIGURE 3.24: Moteur mcc série model bond graph

" Jonction 1 : Re "

$$\begin{cases} f_4 = f_1 = f_5 = f_{16} \\ e_1 - e_4 - e_{16} - e_5 = 0 \end{cases}$$

"Junction 1 : If "

$$\begin{cases} f_4 = f_1 = f_5 = f_{16} \\ e_1 - e_4 - e_{16} - e_5 = 0 \\ e_1 = S e_1 \end{cases}$$

"Junction 1 : Ra"

$$\begin{cases} f_{16} = f_{12} = f_7 = f_{13} \\ e_{16} - e_{12} - e_{13} - e_7 = 0 \end{cases}$$

" Junction 1 : Ia"

$$\begin{cases} f_{16} = f_{12} = f_7 = f_{13} \\ e_1 - e_4 - e_{16} - e_5 = 0 \\ \dots \dots! \end{cases}$$

"Junction 1 : Ra "

$$\begin{cases} f_{16} = f_{12} = f_7 = f_{13} \\ e_1 - e_4 - e_{16} - e_5 = 0 \end{cases}$$

Junction 0 Rf

$$\begin{cases} e_{14} = e_{15}; e_{15} = e_{18} \\ -f_{15} + f_{14} - f_{18} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} e_{15} = \Phi_{I_{f_5}} [\{(1 - y_3)^* f_{15} + y_3 D f_1\}] \\ f_{15} = (1 - y_3) \Phi_{I_{15}}^{-1} * (e_{15}) + \Phi_{I_{15}}^{-1} * z_3^* D f_3 \end{cases}$$

Junction 1 J

$$\begin{cases} f_9 = f_{18}; f_9 = f_{10} \\ e_{18} + e_{10} - e_9 = 0 \\ e_{10} = S e_2 \end{cases} \quad \begin{cases} e_9 = \Phi_{I_{j_9}} [s \{(1 - z_4)^* f_9 + z_4^* D f_4\}] \\ f_9 = \frac{1}{s} * (1 - z_4) \Phi_{I_{j_9}}^{-1} * (e_5) + z_4^* D f_4 \end{cases}$$

" Elément " R₄

$$\begin{cases} e_4 = R_4 [(1 - z_2) f_{R_4} + z_2 D f_1] \\ f_{R_4} = (1 - z_2) \phi_{R_4}^{-1} (e_{R_4}) + z_2 D f_1 \end{cases}$$

"Elément " I₅

$$\begin{cases} e_5 = \Phi_{I_{f5}} [s \{(1 - z_1)^* f_5 + z_1^* Df_1\}] \\ f_5 = \frac{1}{s} * (1 - z_1) \Phi_{I_5}^{-1} * (e_5) + z_1^* Df_1 \end{cases}$$

"Elément " R₁₂

$$\begin{cases} e_{12} = R_{12} [(1 - z_2) f_{R_{12}} + z_2 Df_2] \\ f_{R_{12}} = (1 - z_2) \phi_{R_{12}}^{-1} (e_{R_{12}}) + z_2 Df_2 \end{cases}$$

" Elément " I₇

$$\begin{cases} e_7 = \Phi_{I_{f7}} [s \{(1 - z_2)^* f_7 + z_2^* Df_2\}] \\ f_7 = \frac{1}{s} * (1 - z_2) \Phi_{R_7}^{-1} * (e_7) + z_2^* Df_2 \end{cases}$$

" Elément " R₁₂

$$\begin{cases} e_7 = R_{12} [(1 - z_2) f_{R_{12}} + z_2 Df_2] \\ f_{R_{12}} = (1 - z_2) \phi_{R_{12}}^{-1} (e_{R_{12}}) + z_2 Df_2 \end{cases}$$

Gyrator k

$$\begin{cases} f_{13} = k^{-1} * e_{14} \\ f_{14} = k^{-1} * e_{13} \end{cases}$$

3.6.1.3 Les RRA's du Moteur mcc série model bond graph

$$R1 : Se_2 + \{Df_3\} - \Phi_{I_{j9}} s \{Df_4\} = 0$$

$$R2 : - \Phi_{I_{15}}^{-1} Df_3 + \frac{1}{K} * \left\{ SE - \frac{1}{K} * \Phi_{I_{f5}} s \{Df_3\} - \frac{1}{k} * R_{12} [Df_3] - \frac{1}{k} * R_4 [(1 - z_2) f_{R_4} + z_2 Df_4] - \frac{1}{k} * \Phi_{I_{f5}} [s \{(1 - z_1)^* f_5 + z_1^* Df_1\}] - \frac{1}{s} * (1 - z_4) \Phi_{I_{j9}}^{-1} * (e_5) + z_4^* Df_4 \right\} = 0$$

$$R3 : \frac{1}{k} * De_3 - Df_1 = 0$$

$$R4 : \frac{1}{k} * De_3 - Df_2 = 0$$

3.6.1.4 Les capsules

L'interface SYMBOLS shakti «FDIPad» est dédiée à la création des modèles utilisés pour générer le RRA. Le modèle global doit être une interconnexion de capsules, dans laquelle aucun graphique clé ou élément source ne doit apparaître, car chaque capsule du modèle est analysée indépendamment des autres capsules. La première étape dans la génération des RRAs sur FDI pad c'est de créer les capsules de notre modèle.

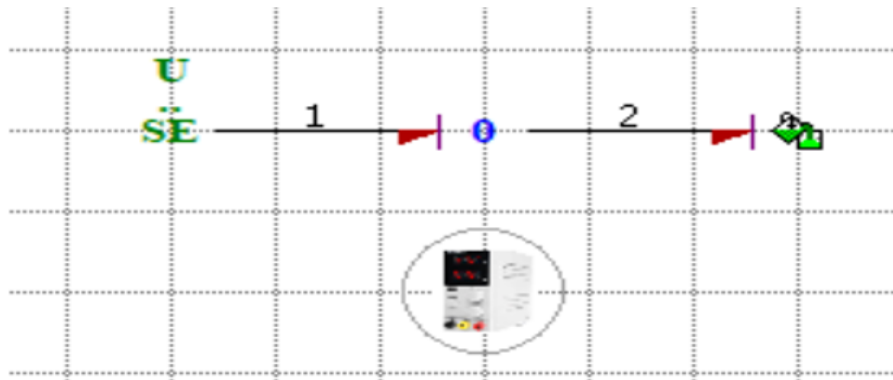


FIGURE 3.25: Capsule de la source

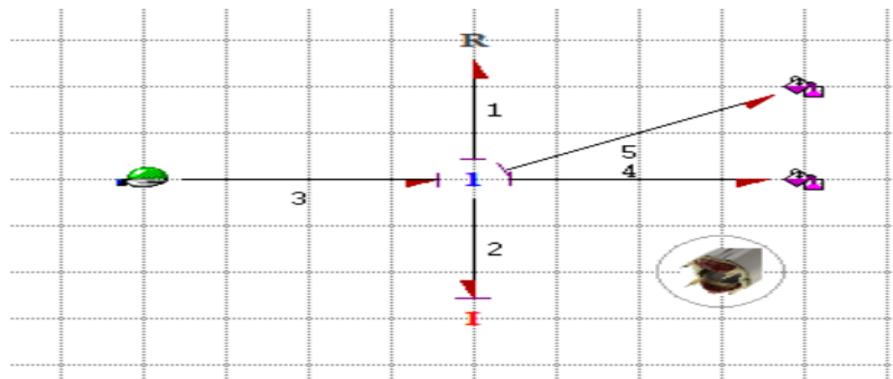


FIGURE 3.26: Capsule d'inducteur

L'inducteur, il a deux sorties de flux, une pour l'induit et l'autre pour le capteur Df.

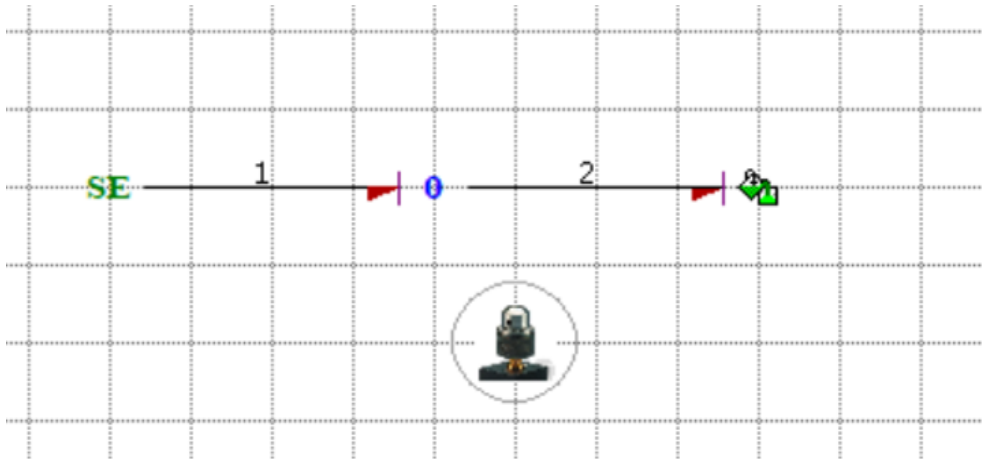


FIGURE 3.30: Capsule de la charge

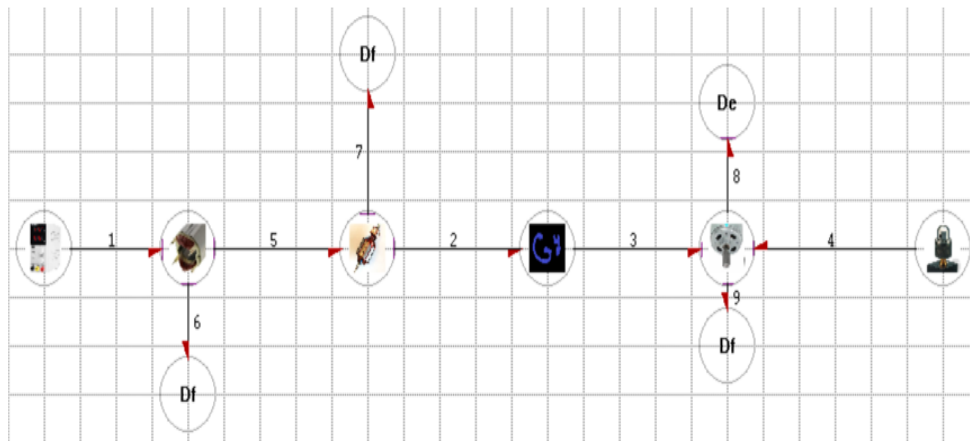


FIGURE 3.31: Le model du moteur MCC par Fdipad

```

Expression/Equation View
Residuals
Arr1=-mecaniq1_I2*ddt(vitesse_Measurement)+charge1_tension+couple_Measurement
Arr2=-couple_Measurement/mecaniq1_R+1/gyrateu1_K*(-1/gyrateu1_K*couple_Measurement*R-inducte1_I2*ddt(1/gyrateu1_K*couple_Measurement)
+SE1_tension-induit1_I3*ddt(1/gyrateu1_K*couple_Measurement)-1/gyrateu1_K*couple_Measurement*R)-vitesse_Measurement
Arr3=1/gyrateu1_K*couple_Measurement-if_Measurement
Arr4=1/gyrateu1_K*couple_Measurement-ia_Measurement
    
```

Les équation des residus generer par FDI pad :

Sur la matrice des signatures représentent les résidus $R1, R2, R3$ et $R4$ correspondant aux RRAs et M_b c'est la détectabilité et I_b l'isolabilité des défaillances si La valeur est 1 il signifie que l'élément est influe sur la réponse du résidu sinon c'est 0, si au moins l'un des résidus égale a un alors que la défaillance est détectable et $M_b = 1$ et si un élément a une signature unique donc la défaillance de cet élément est isolable donc $I_b = 1$.

Monitorability Analysis

	M_b	I_b	R1	R2	R3	R4
couple_Measurement	1	1	1	1	1	1
if_Measurement	1	1	0	0	1	0
ia_Measurement	1	1	0	0	0	1
vitesse_Measurement	1	0	1	1	0	0
SE1	1	0	0	1	0	0
gyrateur1	1	1	0	1	1	1
inducte1	1	0	0	1	0	0
induit1	1	0	0	1	0	0
mecanique1	1	0	1	1	0	0

FIGURE 3.32: la matrice de signature default

À partir des équations des résidus que nous avons obtenues de logiciels symboles, nous créons des diagrammes bloc pour chaque résidu.

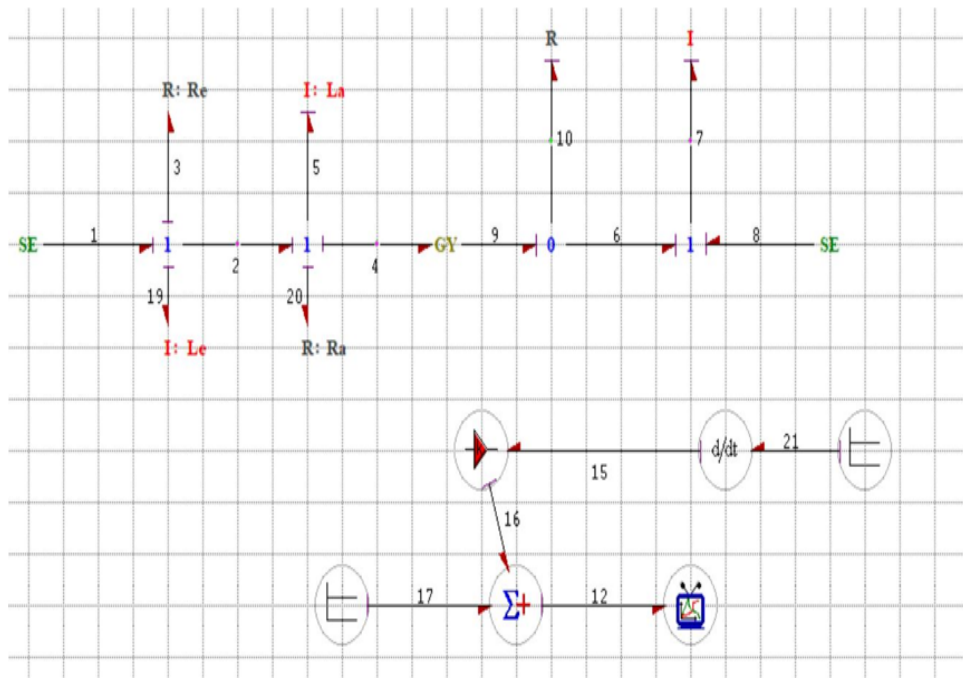


FIGURE 3.33: Modèle bond graph du résidu R1

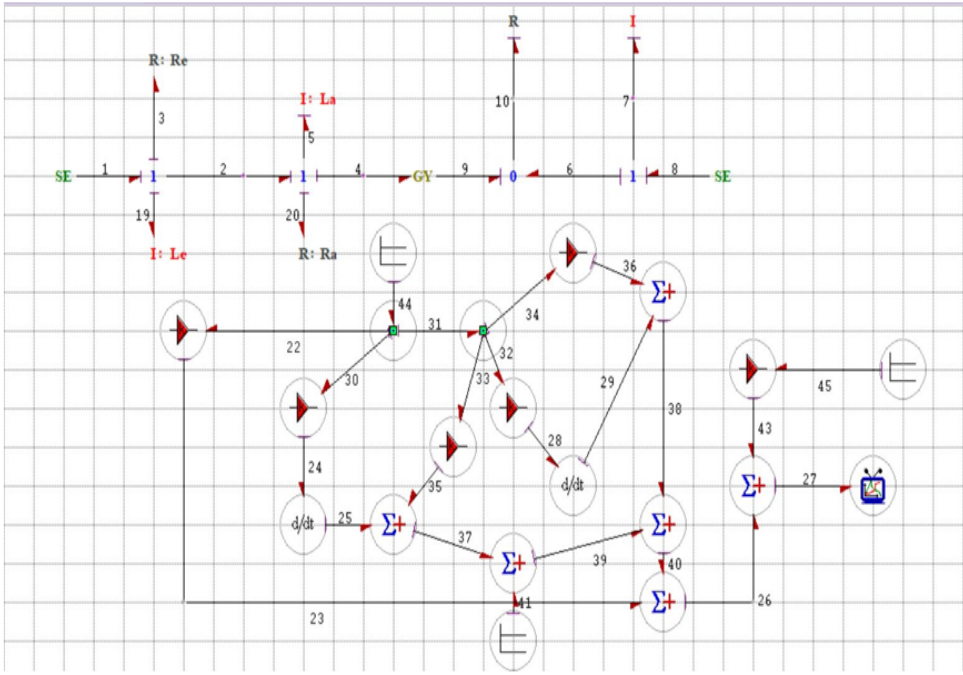


FIGURE 3.34: Modèle bond graph du résidu R2

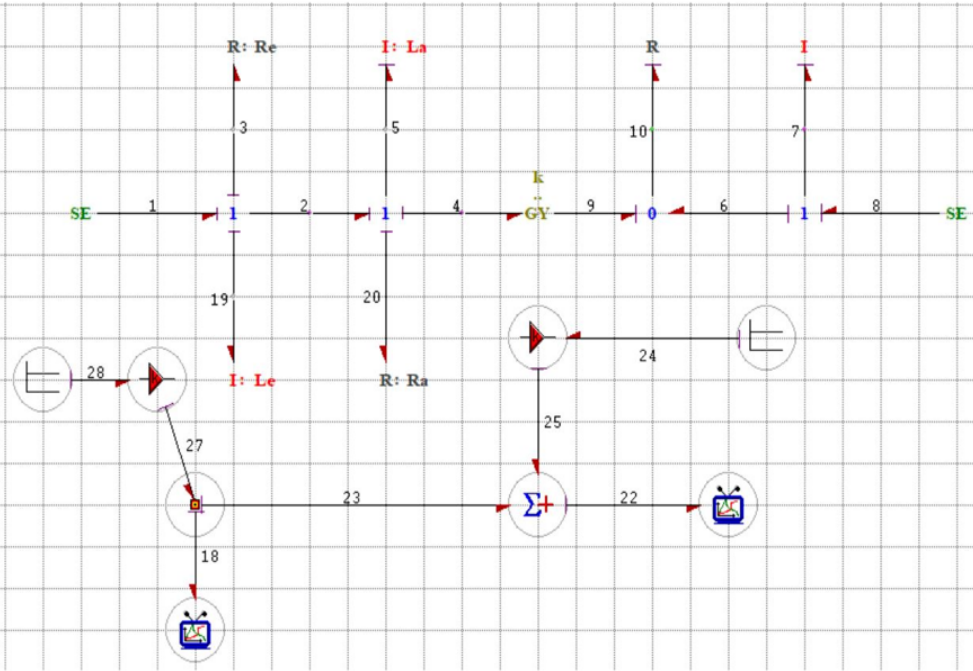


FIGURE 3.35: Modèle bond graph du résidu R3

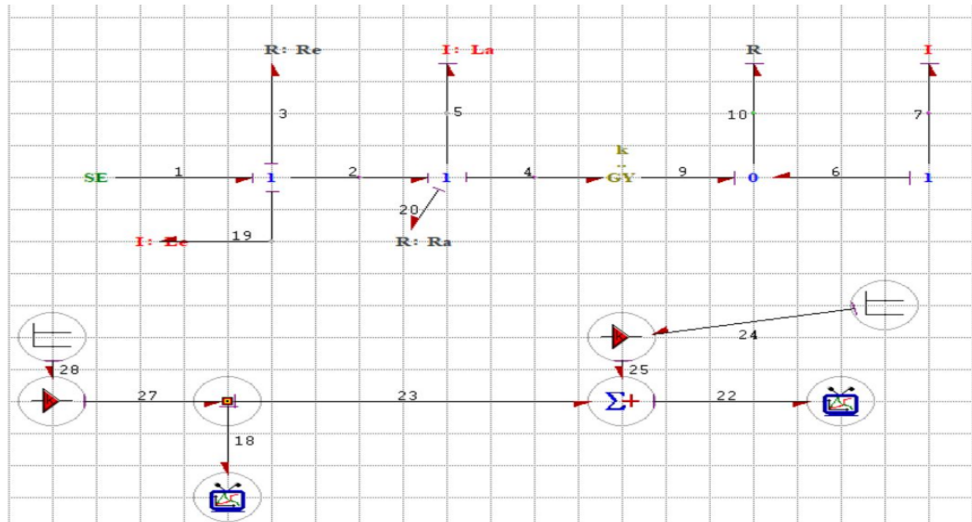


FIGURE 3.36: Modèle bond graph du résidu R4

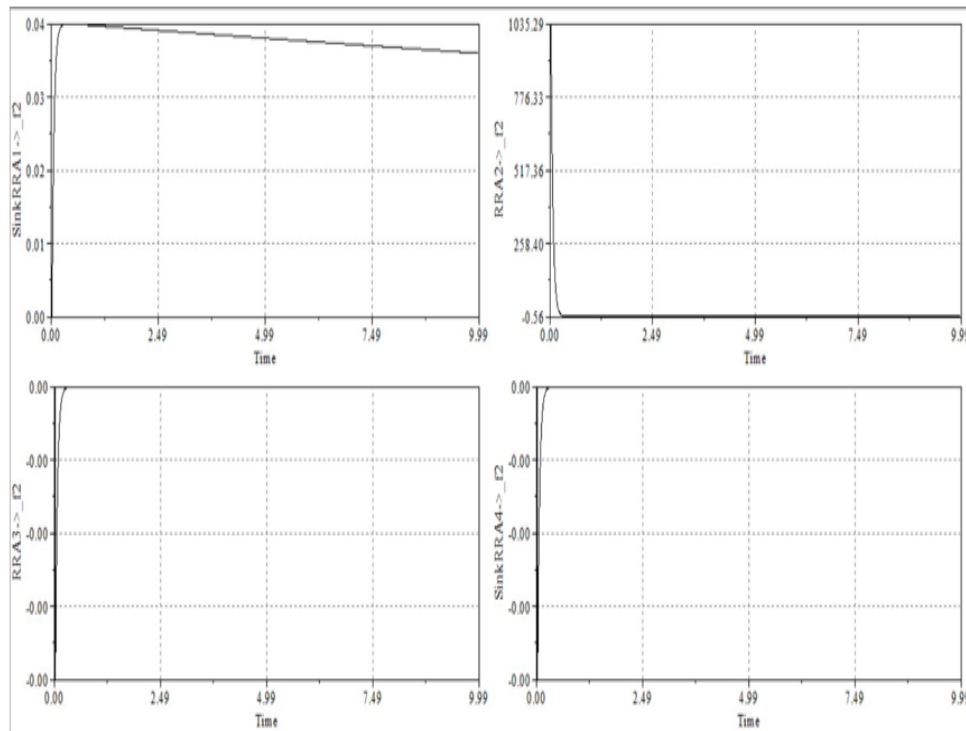


FIGURE 3.37: Réponses des résidus sans défauts

Une fois les résidus calculés, on passe à présent à la simulation du système qui donne :
 Tous les résidus tendent vers zéro à la fin, ce qui représente le bon fonctionnement du moteur modélisé.
 On commence par créer des défauts aux niveaux de chaque élément.

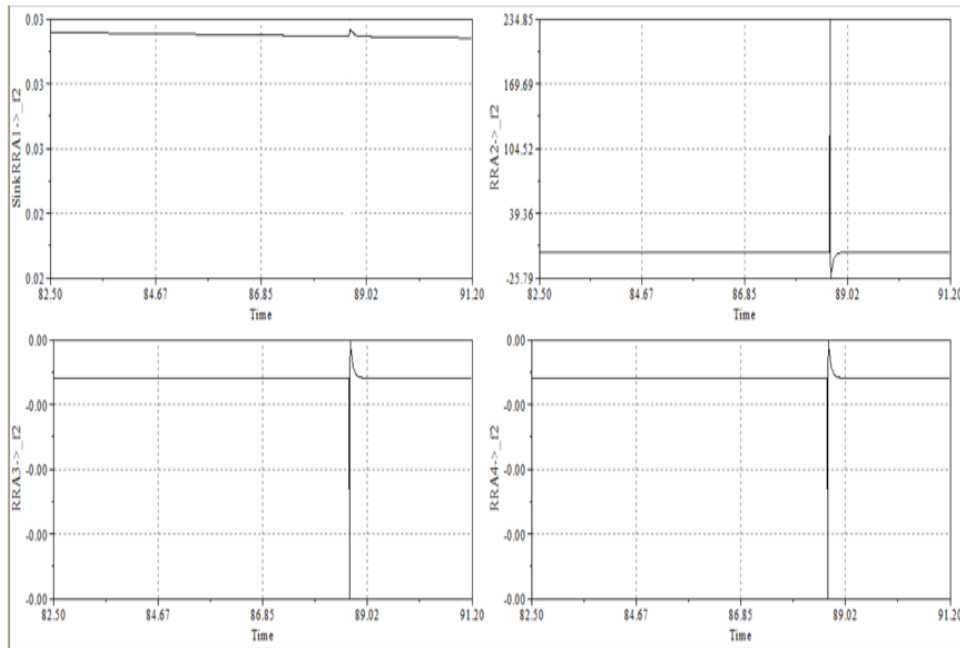


FIGURE 3.38: la réponse des résidus à la défaillance de « GY »

Le gyrateur

On observe une légère défaillance sur R1 par contre il y a une grande défaillance sur les résidus R2,R3et R4, et d'après la matrice de signature de faute et les simulations que nous obtenons on dit que le gyrateur est isolable.

L'inducteur et l'induit

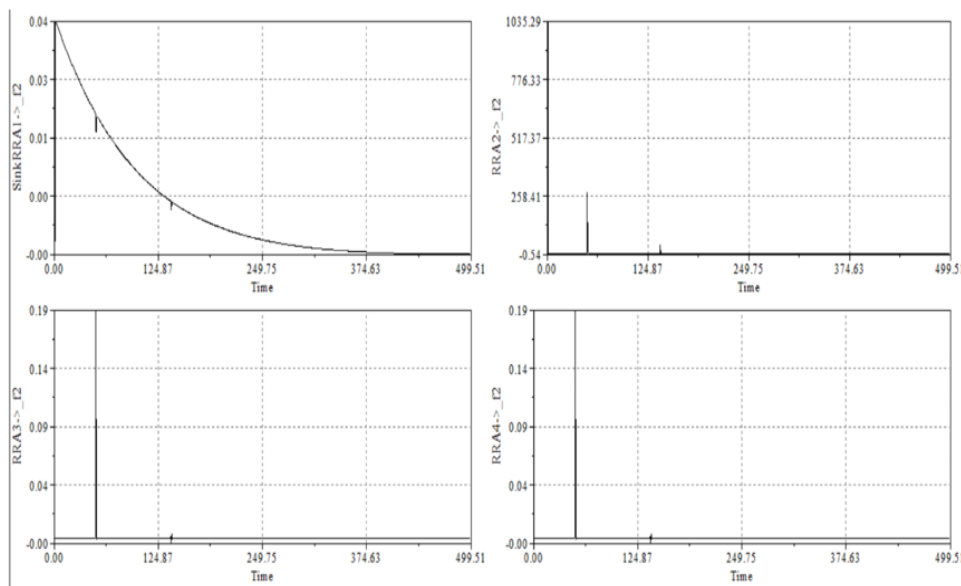


FIGURE 3.39: La réponse des résidus à la défaillance de « Le »

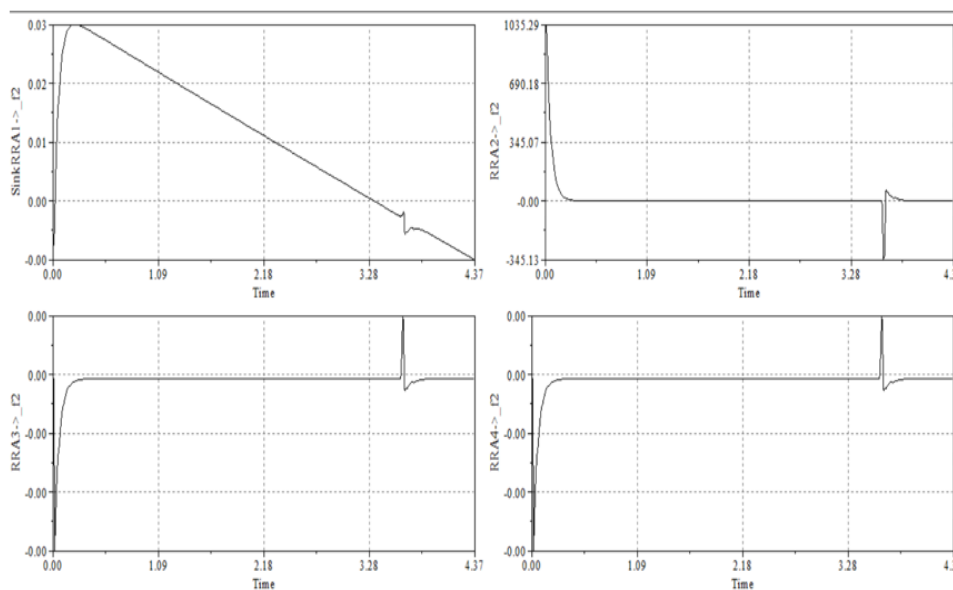


FIGURE 3.40: La réponse des résidus à la défaillance de « La »

La figure (3.38) montre une défaillance au niveau des résidus R2, R3 et R4 il est clair que les résidus R3 et R4 ont le même courant. On voit les même défaillance pour l'induit figure(3.40) C'est pour ça l'induit et l'inducteur ne sont pas isolable.

Partie mécanique

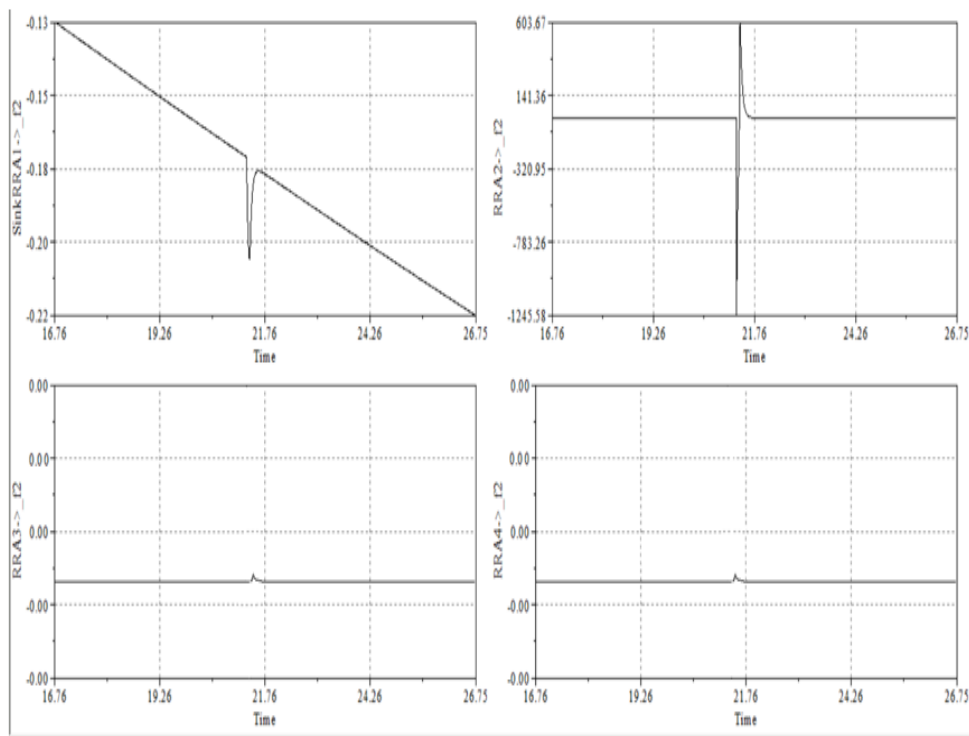


FIGURE 3.41: La réponse des résidus à la défaillance de « J »

Nous voyons clairement que les résidus R1 et R2 sont répondeu à la défaillance de l'élément I par contre il y a une légère défaillance sur les résidus R3 et R4. Nous concluons de la matrice de signature de faute que la partie mécanique n'est pas isolable.

Les capteurs

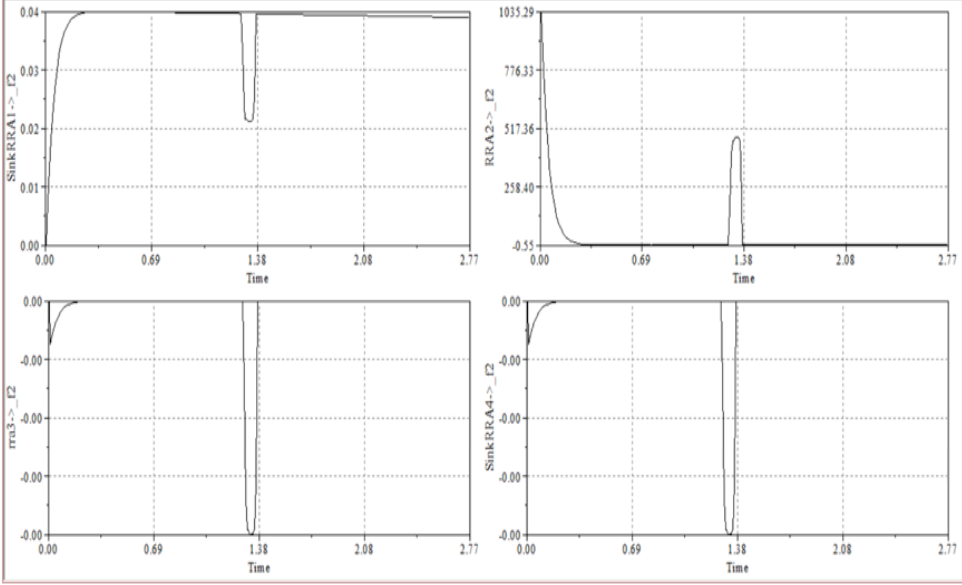


FIGURE 3.42: La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de couple»

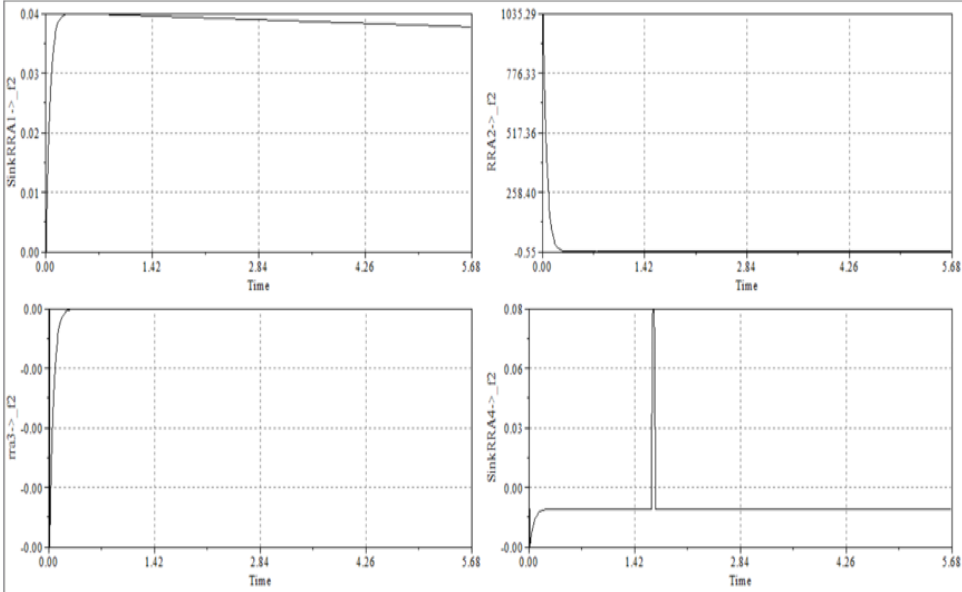


FIGURE 3.43: La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de courant d'induit»

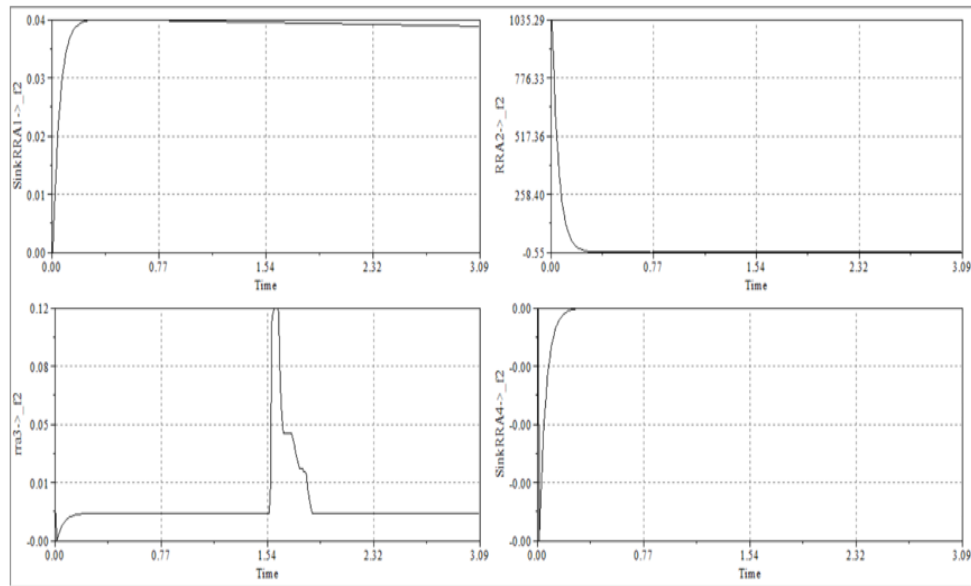


FIGURE 3.44: La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de courant de l'inducteur»

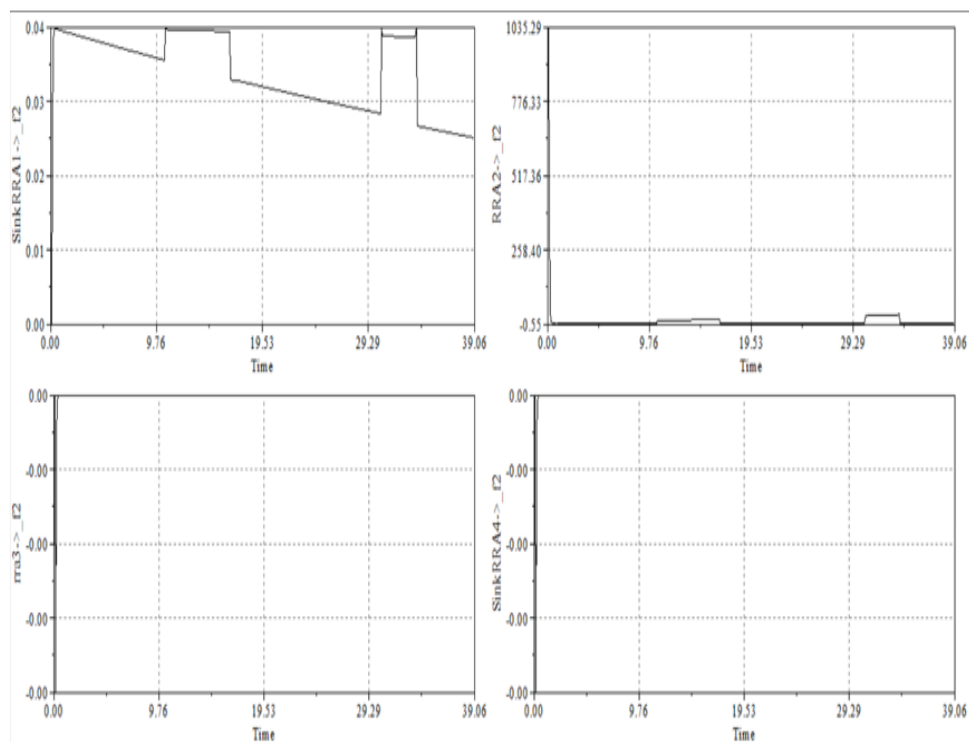


FIGURE 3.45: La réponse des résidus à la défaillance de «capteur de vitesse»

D'après la matrice de signature défauts les capteurs isolable 's' sont (le capteur de couple , capteur de courant d'induit et capteur de courant de l'inducteur) et c'est ce qui est présenté dans les figures figure(3.44),figure (3.42) et figure(3.43) donc chaque capteur a une signature unique par contre le capteur de vitesse n'est pas isolable car il a les même RRA de la partie mécanique.

3.7 Conclusion

Les principales observations et conclusions de ce chapitre sont que les logiciels MATLAB / SIMULINK et SYMBOLS SHAKTI ont été utilisés avec succès comme stratégie pour prédire la réponse à la modélisation et simulation du moteur à courant continu et confirme que Les méthodes d'analyse par Bond Graph nous permis des gains spectaculaires de temps et ne prend pas en compte les équations mathématiques. Toute défaillance d'un processus est néfaste dans un environnement où la performance est primordiale. Il est donc nécessaire d'assurer en permanence le bon fonctionnement du processus. L'information pour traduire le comportement d'un système est donnée par les actions d'une variable. La qualité des mesures est essentielle pour permettre le suivi et l'évaluation de la performance d'un processus. La qualité de l'information peut être augmentée pour éviter les défaillances en multipliant le nombre de capteurs.

Les résultats de la simulation montrent que les performances satisfaisantes peuvent être obtenues avec une réponse rapide et un niveau inférieur de défaillances.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, nous avons présenté une nouvelle approche intégrée pour la supervision.

Nous avons utilisé un seul outil pour la modélisation, la génération des indicateurs de défaillances, l'analyse de la surveillabilité en vue de satisfaire le cahier des charges pour la surveillance.

Dans le premier chapitre on a montré les critères principaux de classification des méthodes de surveillance qui sont basés sur le type de la connaissance, on a distingué deux types d'approches : les méthodes avec et sans modèle. Utilisant l'outil bond graph, nous avons rappelé l'approche qualitative et l'approche quantitative pour la surveillance des systèmes physiques.

Dans le deuxième et troisième chapitre on a essayé d'éclairer les concepts de bond graph et l'utilisation de cet outil en vue de la modélisation, de la détection et de la localisation des défauts dans les systèmes électriques vient de paraître très efficace du fait de sa simplicité et de ses supports de modélisation et de simulation. Notre contribution concerne une méthode à base du modèle Bond graph, la génération des relations de redondance analytiques (résidus), l'analyse de la surveillabilité et l'isolabilité des fautes.

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

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

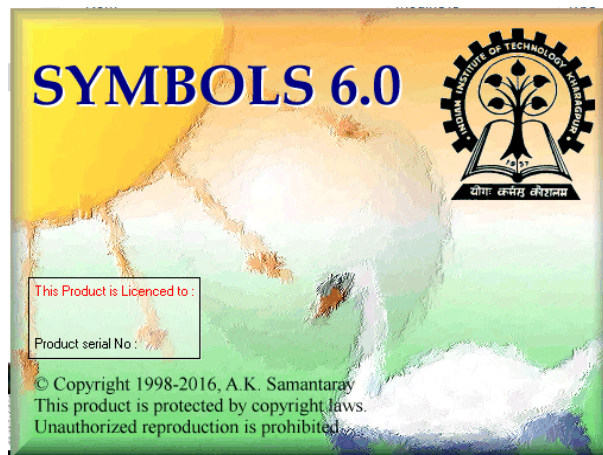
Dans ce travail, nous avons modélisé un système électrique qui est le moteur à courant continue avec une source d'effort comme source d'entrée et une charge comme sortie. Nous avons généré le modèle dynamique, spécifié des indicateurs de fautes et calculer la matrice de signatures des fautes par une interface conviviale et un menu approprié Symbols Shakti. Nous avons utilisé des capsules pour chaque parties de notre système et grâce à ce modèle nous avons obtenu les relations de redondance analytique.

ANNEXES

SYMBOLS SHAKTI

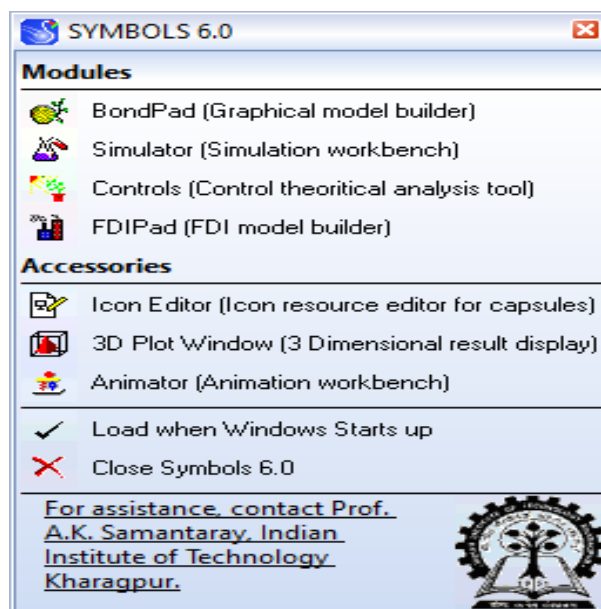
SYMBOLS : SYstems Modelled by BOnd-graph Language and Simulation.

Symbols Shakti est un logiciel très puissant de modélisation, de simulation, Il effectue des analyses théoriques de contrôle et de synthèse. Ce manuel décrit divers outils et des installations pour effectuer les tâches ci-dessus. SYMBOLS SHAKTI vous aide à concevoir de grands systèmes industriels par la modélisation, la simulation et l'analyse. Mais pas seulement qu'il simule votre attitude inventive et peut être utilisé comme une aide pédagogique puissante dans les cours du système dynamique et contrôles.



La question est de savoir quels sont les différents types de modèles qui peuvent être créés dans SYMBOLS SHAKTI. Voici les types de modèles, qui peuvent être créés et gérés dans SYMBOLS SHAKTI.

- Des modèles simples, qui sont créés peu à peu en utilisant des éléments de la boîte à outils de SYMBOLS SHAKTI fournis dans BondPad. Ces modèles peuvent inclure des modèles linéaires ou non linéaires éléments et champs. Il existe des installations pour détecter les flux et les efforts dans divers liaisons et puissance s'écoulant de liaisons sélectionnées en dehors de tous les états du système.
- Modèles avec des objets Bond graph pré-crés appelés capsules. Les facilités de création et l'incorporation de capsules ou d'objets sous-modèles font de SYMBOLS SHAKTI un très outil de modélisation puissant. Grâce aux capsules, vous pouvez apporter de la modularité dans votre modèle.



- Création d'objets bond graph appelés capsules. Des outils sont fournis pour créer un sous-système modèles, qui peuvent être utilisés à plusieurs reprises dans un modèle complet ou dans différents modèles. Un individu peut ne pas être un expert dans un grand nombre de domaines énergétiques ou dans toutes les variétés possibles, qui sont possibles dans un seul domaine. SYMBOLS SHAKTI permet de créer des modèles de sous-systèmes (qui peuvent même être créés par d'autres experts) et les stocker dans bibliothèques de capsules classées.
- Création d'un modèle d'analyse et de synthèse théoriques du contrôle :
En hiérarchisant les entrées comme les éléments SE ou SF comme « entrée

(0) », « entrée (1) », « entrée (2) », etc. dans la fenêtre d'expression, le modèle est préparé pour les activités théoriques de contrôle à géré dans le module de contrôle de SYMBOLS SHAKTI.

- Modèles de diagramme : Dans la bibliothèque de capsules, un groupe de capsules est fourni pour créer modèles de schémas fonctionnels. Ces modèles de schémas fonctionnels peuvent même être non linéaires. Une fois par le modèle de schéma fonctionnel est créé à l'aide d'une capsule peut être considéré comme un mode schéma fonctionnel par en cliquant sur l'élément de menu « Block Diagram Mode » du menu d'affichage de BondPad.
- Modules pour intégrer des modèles mathématiques : Parfois, un modélisateur peut souhaiter intégrer des modèles qui ne sont pas sous des formes physiques, on a plutôt des descriptions mathématiques sous forme d'équations algébriques et différentielles. On utilise les SYMBOLES SHAKTI pour créer et intégrer des sous-modèles.
- Création de S-Functions pour Matlab : Un modèle complet ou un sous-modèle sous forme de capsule peut être passé sur un poteau traitement appelé MATLAB sous forme de S-Functions. On peut alors profiter de toutes les facilités de MATLAB. SYMBOLS SHAKTI dispose de nombreuses fonctionnalités pour le post-traitement d'un modèle. Ainsi, l'utilisateur de SYMBOLS SHAKTI souhaite très rarement bénéficier de l'assistance de tout autre Logiciel. Toujours pour l'aspect très particulier du post-traitement, on peut se prévaloir de l'assistance de MATLAB.

Nous procédons maintenant à la description des diverses fonctionnalités et outils disponibles dans SYMBOLS SHAKTI pour créer des modèles de système, simuler les modèles, effectuer des activités théoriques de contrôle et affichage des résultats et visualisation du comportement. SYMBOLS SHAKTI est un outil hautement interactif Logiciel. Nous voudrions suggérer à l'utilisateur de jouer avec lui au fur et à mesure. SYMBOLS SHAKTI dispose d'une aide contextuelle très bien organisée. L'utilisateur peuvent se prévaloir de ces fonctionnalités pendant qu'une session est en cours.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rosnay, J. 1975, *Le microscope : vers une vision globale*, Seuil.
- [2] Villemeur, A. 1988, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, vol. 67, Edition EYROLLES, Collection DER-EDF.
- [3] Combacau, M. 1991, *Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : applications aux ateliers flexibles*, thèse de doctorat, L'université Paul Sabatier de Toulouse.
- [4] Combacau, M., P. Berrut, F. Charbonnaud et A. Khatab. 2000, «Reflexions sur la terminologie : Surveillance - supervision», *Groupement pour la recherche en Productique, Systèmes de Production Sûrs de Fonctionnement*.
- [5] Chow, E. et A. Wilsky. 1984, «Analytical redundancy and the design of robust failure detection system», *IEEE transactions on Automatic and Control*, vol. 29, no 7, p. 603–614.
- [6] Valette, R., J. Cardoso et D. Dubois. 1989, «Monitoring manufacturing systems by means of petri nets with imprecise markings», dans *IEEE Conference Intelligent Control*, NY, p. 233–238.
- [7] Zemouri, M. R. 2003, *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance.*, thèse de doctorat, l'Université de Franche-Comté.
- [8] Sobhani-Tehrani et khorasani, 2009. *Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f.*

- [9] Ducard, 2009. . Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sousclasse de systèmes dynamiques hybrides. Automatique / Robotique. Université JosephFourier - Grenoble I, 2009. Français. ftel-00445949f.
- [10] Combacau, M. 1991, Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : applications aux ateliers flexibles, thèse de doctorat, L'université Paul Sabatier de Toulouse.
- [11] Willsky, A. 1976, «A survey of design methods for failure detection in dynamic systems», *Automatica*, vol. 12, no 6, p. 601–611.
- [12] Montmain, J. 1992, nterprétation qualitative de simulation pour le diagnostic en ligne de procédé continu, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [13] Basseville, M. 1988, «Detecting changes in signals and systems - a survey», *Automatica*, vol. 24, no 3, p. 309–326.
- [14] Dubuisson, B. 1990, Diagnostic et reconnaissance des formes, Hermès.
- [15] Zwingelstein, G. 1995, Diagnostic des défaillances. Traité des nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hérmes.
- [16] Combacau, M., P. Berrut, F. Charbonnaud et A. Khatab. 2000, «Refexions sur la terminologie : Surveillance - supervision», Groupement pour la recherche en Productique, Systèmes de Production Sûrs de Fonctionnement.
- [17] Chow, E. et A. Wilsky. 1984, «Analytical redundancy and the design of robust failure detection system», *IEEE transactions on Automatic and Control*, vol. 29, no 7, p. 603–614.
- [18] Beard, R. V. 1971, Failure accommodation in linear systems through self reorganization, thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology.
- [19] Bousson, K., J. Steyer, L. Travé-Massuyès et B. Dahhou. 1998, «From a rule-base to a predictive qualitative model-based approach using automated model generation. application to the monitoring and diagnosis of biological process», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 11, p. 477–493.

- [20] Gomaa, M. 1997, Représentation et Supervision des Systèmes Hybrides par Réseaux de Petri, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- [21] Philippot, A. 2006, Contribution au diagnostic décentralisé des systèmes à événements discrets : Application aux systèmes manufacturiers, thèse de doctorat, L'Université de Reims Champagne Ardenne.
- [22] Grastien, A. 2005, Diagnostic décentralisé et en-ligne de systèmes à événements discrets reconfigurables, thèse de doctorat, Université Rennes 1.
- [23] Interprétation qualitative de simulation pour le diagnostic en ligne de procédé continu, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [24] P. Frank, J. Wuennenberg. (1989). 'Fault Diagnosis in Dynamic Systems'. Chap. Robust Fault Diagnosis using Unknown Input Observer Schemes. pp. 46-98. Prentice Hall.
- [25] Kypuros, Javier - system dynamics and control with bond graph modeling- CRC Press(2013) - page 29
- [26] Arun K. Samantaray PhD -Verlag London (2008) - Page 37
- [27] Wolfgang Borutzky - Bond graph modelling for control, fault diagnosis and failure prognosis.
- [28] J. Thoma - B.ould Bouamama - Modelling and simulation in thermal and chemical engineering.
- [29] Brown, F.T.direct application of the loop rule to bond graphs. Journal of dynamic systems, Measurement and control, pp 253-261, september 1972.
- [30] maxicours - Types de moteur à courant continu
- [31] maxicours - Types de moteur à courant continu - Moteur à excitation indépendante
- [32] Bruno FRANÇOIS, Iteem , Cours d'Electricité - La machine à courant continu - pp 18
- [33] Bruno FRANÇOIS, Iteem , Cours d'Electricité - La machine à courant continu - pp 14

- [34] Bruno FRANÇOIS, Iteem , Cours d'Electricité - La machine à courant continu
- pp 16
- [35] Bruno FRANÇOIS, Iteem , Cours d'Electricité - La machine à courant continu
- pp 20
- [36] Bruno FRANÇOIS, Iteem , Cours d'Electricité - La machine à courant continu
- pp 22