الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER en

Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Par : BESSAID Abdeladime et ALI Abdeljalil Mounir

Sujet de :

Supervision et Diagnostic d'un système par le modèle Bond-graph

Soutenu publiquement le 24/ 06/ 2026, devant le jury composé de :

Mr YACOUBI Boumediene	M.A.A	Université de Tlemcen	Président
Mr GORINE Ali	M.C.B	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme BENALLAL Mounira	M.C.A	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2025 / 2026

Remerciements

Avant tout, nous adressons nos plus profondes louanges à Allah le Tout-Puissant, qui nous a accordé la volonté, la patience et la force nécessaires pour mener ce travail à son terme.

Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à notre encadrante, Mme BENALLAL Mounira, pour la qualité de son accompagnement, la pertinence de ses conseils et l'attention qu'elle nous a accordée tout au long de cette expérience académique. Sa disponibilité et son professionnalisme ont constitué une véritable source de motivation.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du département d'Automatique, qui ont contribué à notre formation par la richesse de leur enseignement et leur engagement constant dans la transmission du savoir.

Nous remercions avec respect les membres du jury ,Mr YACOUBI Boumediene et Mr GORINE Ali, pour l'honneur qu'ils nous font en consacrant leur temps à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt porté à notre travail.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'aboutissement de ce projet et nous ont encouragés dans les moments les plus exigeants de notre parcours universitaire.

BESSAID Abdeladime
ALI Abdeljalil Mounir

Dédicace

Nous dédions ce travail à nos chers parents, dont l'amour, les sacrifices et les encouragements constants ont été le fondement de chacune de nos réussites. Aucun mot ne saurait traduire la reconnaissance et le respect que nous leur portons. Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur et longue vie.

À nos familles, pour leur présence bienveillante, leur confiance et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours.

À nos amis et proches pour le témoignage des moments de fraternité, de soutien et de sincérité partagés durant ces années universitaires.

À nos camarades de la promotion M2 Automatique, avec qui nous avons vécu une expérience humaine et académique enrichissante, faite de solidarité, de travail et d'ambition commune.

Enfin, à toutes les personnes qui ont cru en nous et nous ont encouragés à avancer malgré les difficultés, nous adressons notre profonde gratitude.

BESSAID Abdeladime
ALI Abdeljalil Mounir

Table des matières

Introduction générale **12**

Chapitre 1 : Supervision des systèmes industriels et méthodes de diagnostic **14**
1.1 Introduction 15
1.2 Supervision industrielle 15
1.2.1 Définition 15
1.2.2 Fonctions de la supervision 16
1.3 Méthodes de diagnostic 17
1.3.1 Méthodes à base de modèles 18
1.3.2 Méthodes sans modèles 19
1.4 Notions de base sur la surveillance des systèmes 20
1.4.1 Rôle des capteurs 20
1.4.2 Détection des défauts 21
1.5 Conclusion 22

Chapitre 2 : Modélisation des systèmes par Bond Graph **23**
2.1 Introduction 24
2.2 Principe du Bond Graph 24
2.2.1 Notion d'énergie 25
2.2.2 Variables effort et flux 25
2.2.3 Énergie du système 27
2.3 Éléments du Bond Graph 28
2.3.1 Éléments passifs (1-port) 29
2.3.2 Éléments actifs 33
2.3.3 Éléments de transformation 35
2.3.4 Jonctions 37
2.3.5 Représentation des liaisons (bonds) 39

2.4 Causalité . . . 40
2.4.1 Définition . . . 40
2.4.2 Causalité intégrale et dérivée . . . 40
2.4.3 Chemin causal . . . 41
2.5 Méthodologie de modélisation par Bond Graph . . . 43
2.6 Conclusion . . . 44

Chapitre 3 : Diagnostic et surveillance des systèmes par Bond Graph 45
3.1 Introduction . . . 46
3.2 Notions de base . . . 46
3.2.1 Défaut . . . 47
3.2.2 Défaillance . . . 48
3.2.3 Panne . . . 48
3.2.4 Résidu . . . 48
3.3 Principe de la surveillance des systèmes . . . 49
3.4 Diagnostic des systèmes . . . 50
3.4.1 Détection . . . 52
3.4.2 Localisation . . . 53
3.4.3 Identification . . . 54
3.5 Diagnostic par Bond Graph . . . 55
3.5.1 Approche qualitative . . . 56
3.5.2 Approche quantitative . . . 57
3.6 Placement des capteurs . . . 57
3.7 Génération des relations de redondance analytique (RRA) . . . 59
3.8 Matrice de signature des fautes . . . 61
3.9 Conclusion . . . 63

Chapitre 4 : Présentation du logiciel Symbols Shakti 64
4.1 Introduction . . . 65
4.2 Présentation du logiciel Symbols . . . 65
4.2.1 Caractéristiques du logiciel . . . 66
4.2.2 Environnement Symbols . . . 66
4.3 Modules du logiciel Symbols Shakti . . . 67
4.3.1 Module BondPad . . . 68
4.3.2 Module de simulation et control . . . 69
4.3.3 Module FDIPad . . . 70
4.4 Création et incorporation des capsules sous SYMBOLS SHAKTI . . . 72
4.4.1 Caractéristiques des capsules . . . 72
4.4.2 Étapes de création . . . 73
4.5 Conclusion . . . 75

Chapitre 5 : Surveillance du moteur à courant continu 76
5.1 Introduction . . . 77
5.2 Présentation du moteur à courant continu . . . 77
5.2.1 Structure . . . 78
5.2.2 Principe de fonctionnement . . . 80
5.2.3 Bilan des puissances . . . 81
5.3 Modes d'excitation . . . 83
5.3.1 Excitation indépendante . . . 83

5.3.2 Excitation série 84
5.3.3 Excitation shunt 85
5.4 Simulation par la méthode Bond Graph 87
5.4.1 Excitation indépendante 87
5.4.2 Excitation série 90
5.4.3 Excitation shunt 93
5.5 Surveillance et analyse temporelle du moteur à courant continu 97
5.5.1 Excitation série 97
5.5.1.1 Génération automatique des RRAs 97
5.5.1.2 Analyse de détectabilité et d'isolabilité 102
5.5.2 Excitation shunt et séparée 104
5.5.2.1 Génération automatique des RRAs 104
5.5.2.2 Analyse de détectabilité et d'isolabilité 106

Conclusion et perspectives **109**

Table des figures

1.1 Schéma général d'un système de supervision industrielle [7] 16
1.2 Structure d'un système de surveillance pour le diagnostic des défaillances [8] 17
1.3 Classification des méthodes de diagnostic [9] 18
1.4 Principe du diagnostic à base de modèle 18
1.5 Représentation des principales méthodes de diagnostic sans modèle 20
1.6 Principe de fonctionnement d'un capteur [15] 21
1.7 Principe de la détection des défauts dans les systèmes industriels 21
2.1 Représentation des échanges d'énergie entre les composants d'un système . 25
2.2 Représentation des variables effort et flux dans un échange de puissance . . 26
2.3 Schéma des éléments passifs à 1 port [18] 29
2.4 Schéma bloc de l'élément résistif [22] 29
2.5 Représentation d'éléments-R dans les différents domaines physiques [22] . . 30
2.6 Analogie des domaines électrique et mécanique et représentation de la puissance dissipée d'éléments-R [22] 30
2.7 Schéma bloc de l'élément capacitif [22] 31
2.8 Représentation d'éléments-C dans les différents domaines physiques [22] . 31
2.9 Analogie des domaines électrique et mécanique et représentation de la puissance dissipée d'éléments-C [22] 32
2.10 Schéma bloc de l'élément inertiel 32
2.11 Représentation d'éléments-I dans les différents domaines physiques [22] . . 33
2.12 Analogie des domaines électrique et mécanique 33
2.13 Représentation des sources d'effort 34
2.14 Représentation des sources de flux 34
2.15 Exemples de transformateurs (TF) 36
2.16 Représentation du gyrateur 37
2.17 La jonction 0 dans Bond Graph 38
2.18 La jonction 1 dans Bond Graph 38
2.19 Représentation d'une liaison 39
2.20 Illustration de la causalité dans une liaison énergétique (bond) [22] 40
2.21 Exemple de chemin causal simple dans un modèle Bond Graph 42
2.22 Exemple de chemin causal mixte dans un modèle Bond Graph 43
3.1 Architecture générale d'un système de diagnostic industriel 47

3.2 Principe général de la surveillance et du diagnostic des systèmes industriels 49
3.3 Architecture fonctionnelle d'un système de diagnostic et de surveillance industrielle . . . 52
3.4 Principe général de la détection des défauts basée sur l'analyse des résidus 53
3.5 Principe de localisation des défauts à partir des signatures des résidus . . . 54
3.6 Principe général d'identification des défauts à partir des résidus . . . 55
4.1 Interface principale du logiciel SYMBOLS SHAKTI . . . 66
4.2 Modules principaux du logiciel SYMBOLS SHAKTI . . . 68
4.3 Fenêtre du module BondPad du logiciel SYMBOLS SHAKTI . . . 68
4.4 Interface du module Simulator du logiciel SYMBOLS SHAKTI . . . 69
4.5 Interface du module Controls du logiciel SYMBOLS SHAKTI . . . 70
4.6 Représentation Bond Graph du système étudié sous le module FDIPad . . . 71
4.7 Menu des outils d'analyse FDI du logiciel SYMBOLS SHAKTI . . . 71
4.8 Modèle Bond Graph compilé sous BondPad . . . 73
4.9 Enregistrement du modèle au format Capsule File . . . 73
4.10 Définition du nom et du groupe de la capsule sous SYMBOLS SHAKTI . 74
4.11 Capsule ajoutée à la bibliothèque des capsules sous SYMBOLS SHAKTI . 74
5.1 Fonctionnement Moteur - Générateur [34] . . . 78
5.2 Structure générale d'une MCC [34] . . . 78
5.3 Rotor (induit) d'un moteur à courant continu [34] . . . 79
5.4 Collecteur d'un moteur à courant continu [34] . . . 79
5.5 Système de balais du moteur à courant continu [34] . . . 80
5.6 Principe de la règle de la main droite appliqué au moteur à courant continu [32] . . . 81
5.7 Bilan des puissances dans le moteur à courant continu . . . 82
5.8 Schéma électrique du moteur à courant continu à excitation indépendante 83
5.9 Schéma électrique du moteur à courant continu à excitation série . . . 84
5.10 Schéma électrique du moteur à courant continu à excitation shunt . . . 86
5.11 Modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation indépendante . . . 88
5.12 Paramètres du moteur à excitation indépendante . . . 88
5.13 Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation indépendante (à vide) . . . 89
5.14 Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation indépendante (en charge) . . . 89
5.15 Modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série . . . 91
5.16 Paramètres du moteur à excitation série . . . 91
5.17 Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série (à vide) . . . 92
5.18 Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série (en charge) . . . 93
5.19 Modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt . . . 94
5.20 Paramètres du moteur à excitation shunt . . . 94
5.21 Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt (à vide) . . . 95
5.22 Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt (en charge) . . . 96
5.23 Modèle architectural et réalisation des capsules du MCC à excitation série 99

5.24 Propriétés de la capsule de l'induit sous FDIPad 100
5.25 Analyse de surveillabilité du moteur à excitation série sous FDIPad 100
5.26 Menu de FDIPad 101
5.27 RRAs générées du moteur à excitation série 101
5.28 Fenêtre d'analyse de surveillabilité sous FDIPad 102
5.29 Matrice de surveillabilité du moteur à excitation série sous FDIPad 103
5.30 Modèle architectural et réalisation des capsules du MCC à excitation shunt avec des détecteurs virtuels 105
5.31 RRAs générées du moteur à excitation shunt 105
5.32 Matrice de surveillabilité du moteur à excitation shunt sous FDIPad 106

Liste des tableaux

2.1 Correspondance entre les variables effort et flux selon le domaine physique [20] 26
2.2 Variables généralisées dans différents domaines physiques (pseudo Bond Graph) [18] 28
2.3 Exemples de sources d'effort et de flux dans différents domaines physiques [22] 35
3.1 Structure générale d'une matrice de signature des fautes 62
3.2 Exemple simplifié d'une matrice de signature des fautes 62
3.3 Analyse de détectabilité et d'isolabilité des défauts 62
5.1 Liste des variables associées au moteur en excitation série 101

Liste des abréviations

Abréviation	**Signification**
BG	Bond Graph
BGI	Bond Graph à causalité intégrale
BGD	Bond Graph à causalité dérivée
FDI	Fault Detection and Isolation
FTC	Fault Tolerant Control
RRA	Relation de Redondance Analytique
MSF	Matrice de Signature des Fautes
Se	Source d'effort
Sf	Source de flux
MSe	Source modulée d'effort
MSf	Source modulée de flux
SSe	Source de signal
TF	Transformateur
MTF	Transformateur modulé
GY	Gyrateur
MGY	Gyrateur modulé
De	Détecteur d'effort
Df	Détecteur de flux
MCC	Moteur à courant continu
API	Automate Programmable Industriel
IHM	Interface Homme-Machine
PC	Partie Commande
PO	Partie Opérative

Liste des symboles

Symbole	**Désignation**
e	Variable d'effort
f	Variable de flux
P	Puissance
E	Énergie
q	Déplacement généralisé
p	Quantité de mouvement généralisée
t	Temps
R	Élément résistif / Résistance
C	Élément capacitif / Capacité
I	Élément inertiel / Inductance
U	Tension électrique
i	Courant électrique
F	Force
v	Vitesse linéaire
ω	Vitesse angulaire
Γ	Couple mécanique
Q	Débit volumique
$p(t)$	Quantité de mouvement
$q(t)$	Déplacement généralisé
k	Constante / Gain / Raideur
r	Résidu
S_{ij}	Élément de la matrice de signature
y_i	Variable booléenne associée aux jonctions 0
z_j	Variable booléenne associée aux jonctions 1
n_i	Nombre de liaisons associées à une jonction 0
m_j	Nombre de liaisons associées à une jonction 1
Φ	Fonction caractéristique d'un élément
a_k	Coefficient d'orientation des liaisons
E_p	Énergie potentielle
τ	Variable temporelle d'intégration

Introduction générale

Les systèmes industriels évoluent à un rythme soutenu, présentant une complexité grandissante générée par l'intégration de divers domaines, tels que l'électricité, la mécanique et l'hydraulique. Cette complexité rend leur analyse et leur contrôle plus délicats, ce qui rend nécessaires des outils spécialisés pour garantir leur fiabilité et leur sécurité.

Dans ce cadre, la supervision industrielle revêt une importance cruciale. Elle permet de suivre en temps réel l'état des systèmes, de recueillir les données des capteurs et de détecter rapidement toute anomalie. Cette vigilance permanente participe à l'amélioration des performances des installations tout en prévenant les pannes.

En parallèle, le diagnostic des systèmes est une étape clé dans le processus de supervision. Il vise à identifier les défauts, localiser les dysfonctionnements et analyser leurs causes. Grâce à ces analyses, il devient possible de prendre des décisions appropriées pour maintenir le système en bonne condition de fonctionnement.

Parmi les méthodes de diagnostic, l'approche par Bond Graph se distingue par sa capacité à modéliser de manière cohérente des systèmes multi-domaines. Cette technique s'appuie sur l'échange d'énergie entre les composants du système, ce qui permet d'en mieux saisir le comportement global. Elle propose également des outils efficaces pour détecter et isoler les défauts.

Dans ce travail, nous nous penchons sur l'étude, la modélisation et la surveillance des systèmes industriels en utilisant l'approche Bond Graph, associée au logiciel Symbols Shakti.

Notre objectif principal est d'appliquer des techniques de modélisation et de diagnostic pour analyser le comportement des systèmes et évaluer leurs performances en situation de défauts.

Notre mémoire est organisé comme suit :

Chapitre 1 : présente les notions de base de la supervision industrielle ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.

Chapitre 2 : est consacré à la modélisation des systèmes par Bond Graph.

Chapitre 3 : traite du diagnostic et de la surveillance des systèmes à l'aide de cette approche.

Chapitre 4 : introduit la présentation et l'application du logiciel Symbols Shakti.

Chapitre 5 : est dédié à la modélisation, la simulation et la surveillance d'un moteur à courant continu.

Chapitre 1



Supervision des systèmes industriels et méthodes de diagnostic

1.1 Introduction

Dans le secteur industriel, les systèmes de production connaissent une complexification croissante, due à l'intégration de multiples technologies et de différents champs physiques tels que l'électricité, la mécanique ou encore l'hydraulique. Cette évolution accroît la difficulté de leur gestion et de leur surveillance, d'où la nécessité d'adopter des méthodes performantes pour garantir leur fonctionnement optimal [1, 2].

La supervision industrielle occupe une place centrale face à ces enjeux. Elle permet de suivre en temps réel l'état des installations, de recueillir les données provenant des capteurs et de fournir des informations pertinentes aux opérateurs. Grâce à ces retours, il devient possible de repérer rapidement les anomalies et d'agir avant qu'elles n'entraînent des pannes majeures [2, 3, 4].

En complément, le diagnostic des systèmes constitue une étape clé pour comprendre les dysfonctionnements. Il permet d'identifier les défauts, de localiser leur origine et d'analyser leurs causes. Il contribue ainsi à améliorer la maintenance des systèmes et à garantir leur fiabilité [3, 4].

Ainsi, la combinaison de la supervision et du diagnostic permet d'assurer une surveillance efficace des systèmes industriels. Elle offre une meilleure compréhension du comportement des systèmes et facilite la prise de décision en cas de problème [2, 4].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions fondamentales liées à la supervision industrielle ainsi que les principales méthodes de diagnostic utilisées dans ce domaine.

1.2 Supervision industrielle

1.2.1 Définition

La supervision industrielle est une fonction essentielle dans les systèmes automatisés. Elle consiste à surveiller, contrôler et gérer le fonctionnement d'un procédé industriel en temps réel. Son objectif principal est d'assurer le bon déroulement des opérations tout en garantissant la sécurité, la fiabilité et la performance des installations. [5, 6].

De manière générale, la supervision repose sur la collecte d'informations provenant de différents capteurs installés sur le système. Ces données, telles que la température, la pression, le débit ou encore la position, sont ensuite traitées et affichées afin de fournir une vision claire de l'état du système à l'opérateur.

La supervision permet ainsi de suivre en permanence le comportement du système, de détecter les anomalies et de réagir rapidement en cas de dysfonctionnement. Elle joue également un rôle important dans l'aide à la prise de décision, en fournissant des informations pertinentes sur le fonctionnement du procédé. [5, 6].

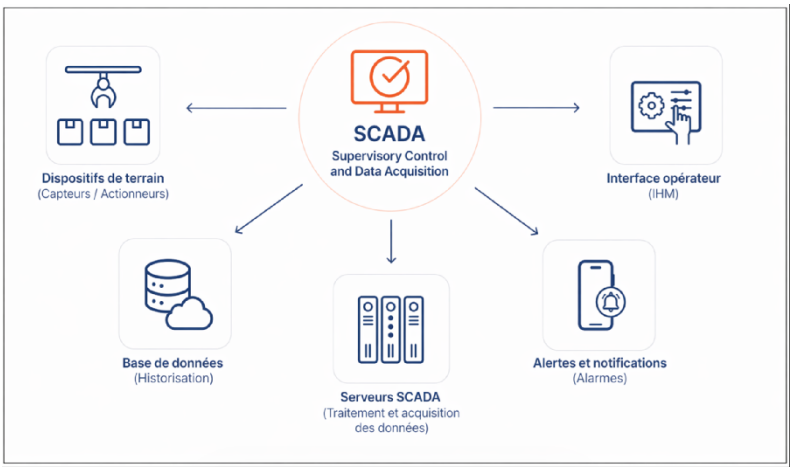


Fig. 1.1 : Schéma général d'un système de supervision industrielle [7]

1.2.2 Fonctions de la supervision

La supervision industrielle ne se résume pas simplement à observer le système. Elle englobe un ensemble de fonctions clés qui garantissent le bon déroulement des opérations dans les installations industrielles. Parmi ces fonctions, on distingue notamment :

- **La surveillance :** Il s'agit de suivre en temps réel les différentes variables du système grâce à des capteurs. Cette étape permet de repérer toute anomalie ou comportement inhabituel. Dès qu'un seuil critique est franchi, des alarmes avertissent immédiatement l'opérateur, ce qui permet une réaction rapide [5, 6].
- **Le diagnostic :** Lorsqu'une anomalie est détectée, il devient essentiel d'en rechercher l'origine. Il aide à localiser précisément les éléments défaillants et à comprendre les causes des dysfonctionnements, ce qui est indispensable pour intervenir efficacement.
- **La reconfiguration :** Le système doit souvent s'adapter pour continuer à fonctionner, même de manière dégradée. Cette adaptation peut être automatique ou demander l'intervention humaine, mais elle vise toujours à maintenir un niveau de service acceptable.

- **L'aide à la décision :** La supervision offre également un soutien précieux en synthétisant des informations claires et fiables sur l'état du système. Cela facilite le travail des opérateurs et des équipes de maintenance, qui peuvent ainsi prendre les bonnes décisions au bon moment [5, 6].

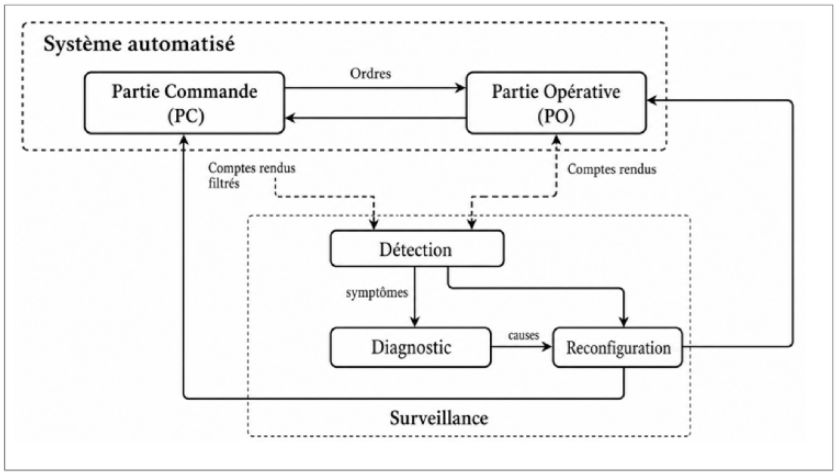


Fig. 1.2 : Structure d'un système de surveillance pour le diagnostic des défaillances [8]

Pour un système automatisé, la partie commande (PC) envoie des ordres à la partie opérative (PO), qui exécute les actions demandées. En retour, la PO fournit des informations de fonctionnement, appelées comptes rendus, permettant d'évaluer l'état du système.

Le module de surveillance exploite ces informations afin de détecter d'éventuelles anomalies. La détection génère des symptômes qui sont ensuite analysés par le module de diagnostic pour identifier les causes des défaillances [8, 9].

En fonction des résultats du diagnostic, une étape de reconfiguration peut être mise en œuvre afin d'adapter le fonctionnement du système et maintenir ses performances. Ainsi, la boucle de surveillance assure un fonctionnement fiable et sécurisé du système en présence de défauts [9].

1.3 Méthodes de diagnostic

Le diagnostic des systèmes industriels est une étape essentielle dans le cadre de la supervision. Il permet de détecter les anomalies, d'identifier les défauts et de localiser les éléments défaillants afin d'assurer un fonctionnement fiable du système.

Les méthodes de diagnostic peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes à base de modèles et les méthodes sans modèle [10, 11].

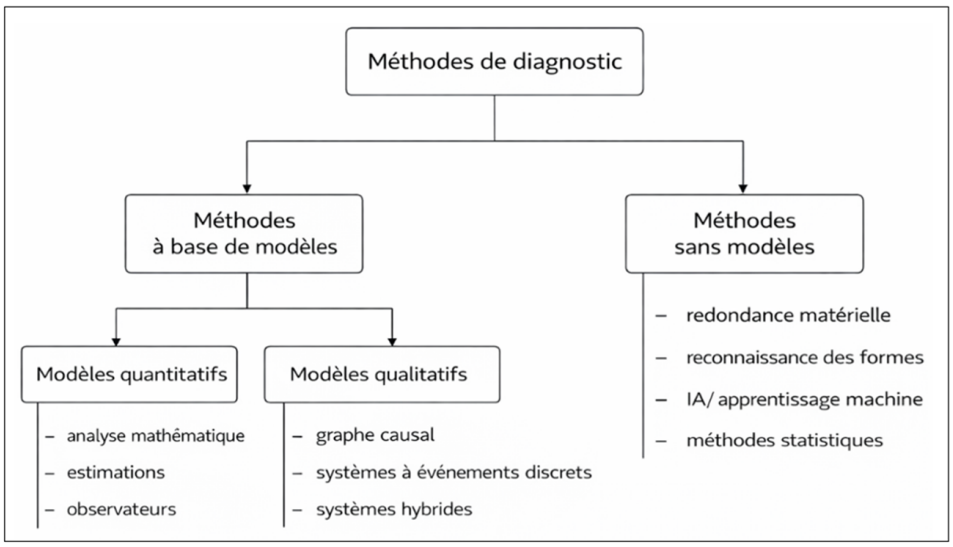


Fig. 1.3 : Classification des méthodes de diagnostic [9]

1.3.1 Méthodes à base de modèles

Les méthodes de diagnostic à base de modèles reposent sur la comparaison entre le comportement réel du système et celui d'un modèle de référence représentant son fonctionnement normal. Toute différence entre ces deux comportements peut indiquer la présence d'un défaut.

Dans ce type d'approche, un modèle du système est préalablement établi à partir de relations mathématiques ou structurelles. Ensuite, les données mesurées sur le système réel sont comparées aux résultats fournis par ce modèle. L'écart entre ces deux informations est appelé résidu [10, 11, 12].

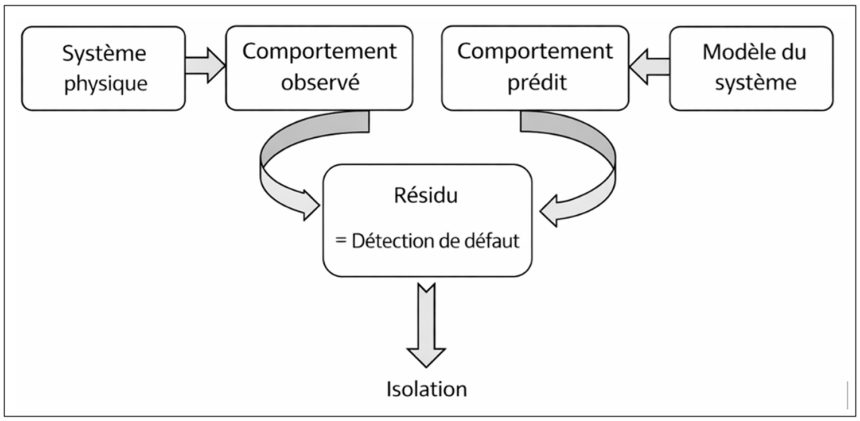


Fig. 1.4 : Principe du diagnostic à base de modèle

Lorsque le système fonctionne normalement, le résidu reste proche de zéro. En revanche, en présence d'un défaut, ce résidu devient significatif, ce qui permet de détecter l'anomalie et d'identifier la défaillance [10, 11].

Les méthodes de diagnostic à base de modèles sont classées en deux catégories :

- **Les approches quantitatives :** reposent sur des modèles mathématiques précis du système. Elles permettent une analyse détaillée et une localisation précise des défauts.
- **Les approches qualitatives :** s'appuient sur des représentations simplifiées telles que les graphes ou les modèles symboliques. Elles offrent une vision globale du comportement du système [12].

Ces méthodes sont largement utilisées dans le domaine industriel en raison de leur efficacité. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite une connaissance approfondie du système à modéliser [12].

1.3.2 Méthodes sans modèles

Dans certaines applications industrielles complexes, il peut être difficile, voire impossible, de disposer d'un modèle précis du système. Cette difficulté est souvent liée à la complexité des procédés, notamment lorsque ceux-ci subissent des modifications fréquentes ou des reconfigurations au cours de leur fonctionnement [13].

Dans ce type de situation, les méthodes de diagnostic sans modèle constituent une solution adaptée. Ces approches reposent principalement sur l'analyse des données mesurées et sur l'expérience acquise à partir du fonctionnement du système [13].

Parmi les principales techniques utilisées, on peut citer :

- **La méthode du seuillage :** consiste à comparer les signaux mesurés à des seuils prédéfinis, qui peuvent être fixes ou adaptatifs. Lorsque ces seuils sont dépassés, cela indique la présence d'une anomalie. Dans certains cas, plusieurs niveaux de seuils sont utilisés afin de distinguer entre un défaut probable et un défaut critique.
- **Les méthodes statistiques :** reposent sur l'analyse des caractéristiques statistiques des signaux, telles que la moyenne ou la variance. Une variation significative de ces paramètres peut indiquer un dysfonctionnement. Ainsi, ces méthodes permettent de détecter des anomalies en suivant l'évolution des données mesurées [13].
- **La reconnaissance des formes :** cette technique utilise des algorithmes de classification pour analyser les signaux issus du système. Elle permet d'identifier des comportements anormaux en comparant les données actuelles à des modèles connus, qu'ils soient continus ou discrets [13].

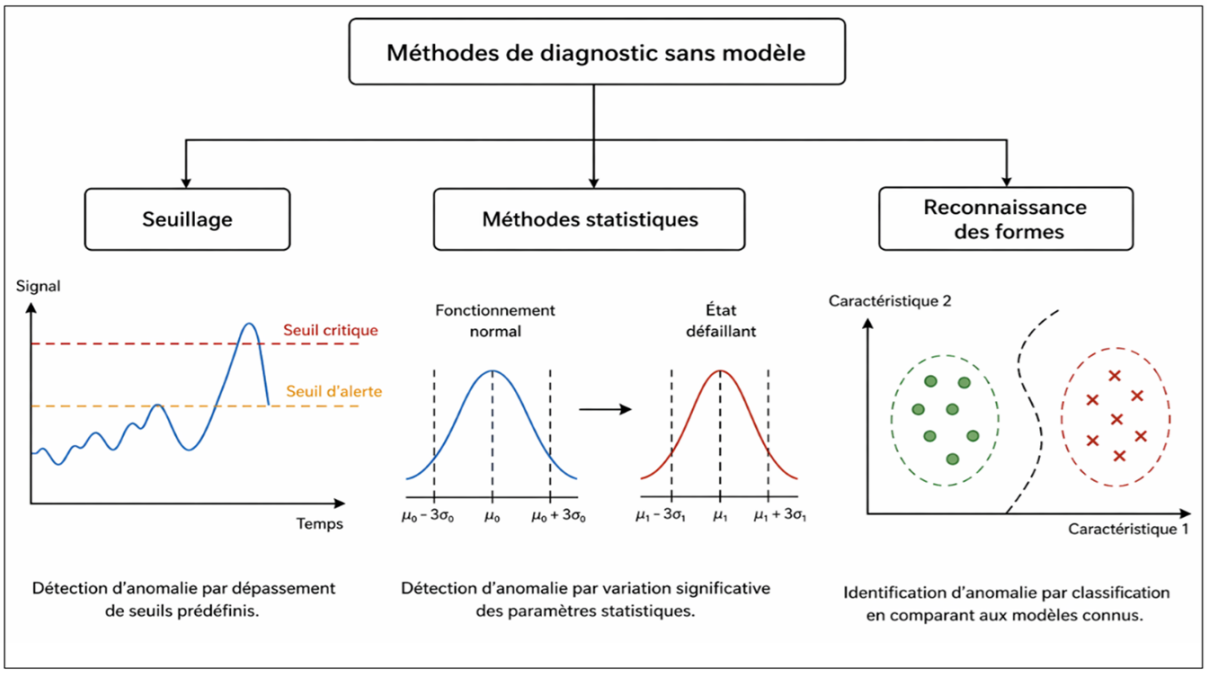


Fig. 1.5 : Représentation des principales méthodes de diagnostic sans modèle

1.4 Notions de base sur la surveillance des systèmes

1.4.1 Rôle des capteurs

Les capteurs jouent un rôle fondamental dans la surveillance des systèmes industriels. Ils permettent de mesurer différentes grandeurs physiques du système, telles que la température, la pression, le débit, la position, ainsi que la vitesse. Ces informations sont indispensables pour connaître l'état réel du système à chaque instant.

Les données fournies par les capteurs servent à analyser le comportement du système et à détecter d'éventuelles anomalies. Sans mesures fiables, il devient difficile, voire impossible, de surveiller correctement un système ou de diagnostiquer ses défauts.

Le choix judicieux et le positionnement approprié des capteurs sont essentiels. Un capteur inadapté ou mal positionné par rapport à la grandeur à mesurer peut fournir des données imprécises ou incomplètes, compromettant ainsi la fiabilité de la surveillance et du diagnostic. À l'inverse, une sélection rigoureuse et un placement réfléchi des capteurs renforcent la capacité à détecter et à localiser les défauts, ce qui améliore l'efficacité du système de supervision. [14].

Ainsi, les capteurs constituent une source essentielle d'information pour les systèmes de supervision et de diagnostic, représentant le lien direct entre le système physique et les outils d'analyse [14].

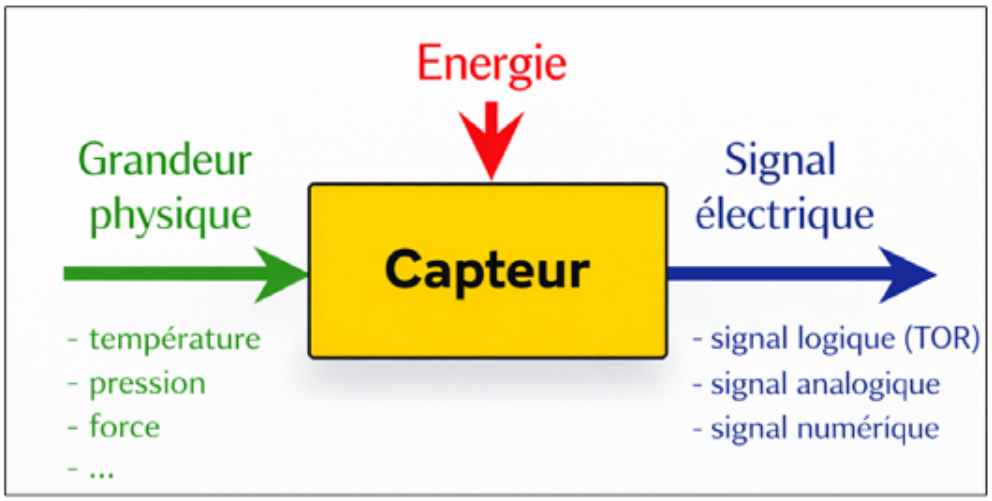


Fig. 1.6 : Principe de fonctionnement d'un capteur [15]

1.4.2 Détection des défauts

La détection des défauts est une étape fondamentale dans la surveillance des systèmes industriels. Elle consiste à repérer toute anomalie en comparant le comportement réel du système à son fonctionnement normal [16, 17].

Cette détection repose sur l'analyse des données issues des capteurs. Toute variation significative des mesures, notamment à travers des indicateurs comme les résidus ou les seuils, peut révéler la présence d'un défaut [10, 17].

Elle permet ainsi d'intervenir rapidement afin d'éviter l'apparition de pannes critiques et d'améliorer la fiabilité du système. Toutefois, son efficacité dépend de la qualité des données et des méthodes utilisées.

La détection constitue donc la première étape du diagnostic, précédant la localisation et l'identification des défauts [17].

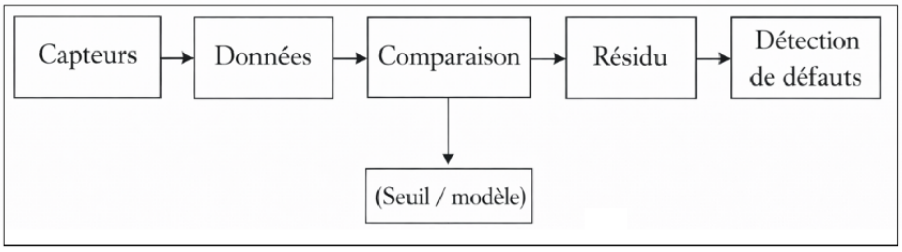


Fig. 1.7 : Principe de la détection des défauts dans les systèmes industriels

Cette figure présente le principe de la détection des défauts dans un système industriel. Le processus commence par l'acquisition des grandeurs physiques à l'aide des capteurs, qui fournissent les données nécessaires à l'analyse.

Ces données sont ensuite comparées à un comportement de référence, défini par un modèle ou des seuils de fonctionnement normal, afin de mettre en évidence d'éventuels écarts.

Le résultat de cette comparaison, appelé résidu, reste faible en fonctionnement normal et devient significatif en cas de défaut. Ainsi, l'analyse du résidu permet de détecter les anomalies et constitue la première étape du diagnostic des systèmes industriels [17].

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales liées à la supervision des systèmes industriels ainsi qu'aux différentes méthodes de diagnostic. Nous avons tout d'abord introduit le concept de supervision industrielle, en mettant en évidence son rôle essentiel dans la surveillance, le contrôle et l'optimisation du fonctionnement des systèmes.

Nous avons ensuite étudié les principales méthodes de diagnostic, en distinguant les approches à base de modèles et les approches sans modèles. Cette classification a permis de mieux comprendre les principes de chaque méthode, ainsi que leurs avantages et leurs limites. Le choix de l'approche la plus adaptée dépend en effet de la complexité du système, de la disponibilité des données et du niveau de précision recherché.

Par ailleurs, nous avons abordé les notions de base relatives à la surveillance des systèmes, en insistant sur le rôle des capteurs dans l'acquisition des informations et sur l'importance de la détection des défauts. Ces étapes constituent un élément clé pour garantir un diagnostic rapide, fiable et efficace.

Ainsi, ce chapitre a permis d'établir un cadre théorique solide pour la suite de ce travail. Les concepts présentés serviront de base à l'étude des méthodes de modélisation, notamment l'approche par Bond Graph, ainsi qu'aux techniques de diagnostic qui seront développées dans les chapitres suivants.

Chapitre 2



Modélisation des systèmes par Bond Graph

2.1 Introduction

La modélisation des systèmes constitue une étape essentielle dans l'analyse, la commande et le diagnostic des systèmes industriels. Elle permet de représenter le comportement d'un système réel à l'aide de modèles mathématiques ou graphiques, facilitant ainsi sa compréhension et son étude [18].

Dans le cas des systèmes industriels complexes, caractérisés par l'interaction de plusieurs domaines physiques tels que l'électrique, le mécanique et l'hydraulique, les méthodes de modélisation classiques peuvent présenter certaines limites. Il devient alors nécessaire d'adopter une approche capable de représenter ces interactions de manière cohérente [18].

L'approche Bond Graph se distingue par sa capacité à modéliser des systèmes multi-domaines en se basant sur les échanges d'énergie entre les différents composants. Cette méthode offre une représentation unifiée des systèmes, indépendamment de leur nature physique, en utilisant des concepts communs tels que l'effort et le flux [19].

Grâce à cette approche, il est possible de construire des modèles structurés permettant non seulement l'analyse du comportement du système, mais aussi l'application de méthodes de diagnostic et de surveillance [18].

Dans ce chapitre, nous présentons les principes fondamentaux de la modélisation par Bond Graph, ainsi que ses différents éléments et règles de construction.

2.2 Principe du Bond Graph

Le Bond Graph est une méthode de modélisation qui s'appuie sur l'analyse des transferts d'énergie au sein des systèmes physiques. Fondée sur le principe de conservation de l'énergie, cette approche permet de représenter de façon cohérente des systèmes issus de différents domaines physiques [20].

Dans ce formalisme, les interactions entre composants sont décrites par des liaisons appelées « bonds », qui matérialisent le transfert de puissance entre deux éléments. Chaque bond est défini par deux variables conjuguées : l'effort $e(t)$ et le flux $f(t)$, dont le produit donne la puissance échangée dans le système [18, 20].

Un des atouts majeurs de cette méthode est de fournir une représentation unifiée des systèmes multi-domaines (électriques, mécaniques, hydrauliques, etc.), tout en mettant en lumière les échanges énergétiques entre leurs différentes parties [20].

Par ailleurs, le Bond Graph simplifie l'analyse structurelle et dynamique des systèmes, ce qui s'avère particulièrement utile pour les applications de diagnostic et de surveillance. Il permet en effet d'identifier les relations entre variables et de générer des modèles pertinents pour la détection de défauts.

2.2.1 Notion d'énergie

L'énergie constitue une grandeur fondamentale dans l'étude des systèmes physiques. Elle représente la capacité d'un système à produire un travail ou à provoquer une transformation. Dans tout système, l'énergie peut être stockée, dissipée ou transférée entre différents éléments [21].

Le principe de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale d'un système reste constante. Elle ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre [20, 21].

Selon le domaine considéré, l'énergie peut apparaître sous différentes formes, telles que l'énergie électrique, mécanique ou hydraulique. L'analyse de ces différentes formes permet de mieux comprendre le fonctionnement global du système.

Ce principe fondamental peut être exprimé par la relation suivante :

$$E_{\text{totale}} = \text{constante}$$

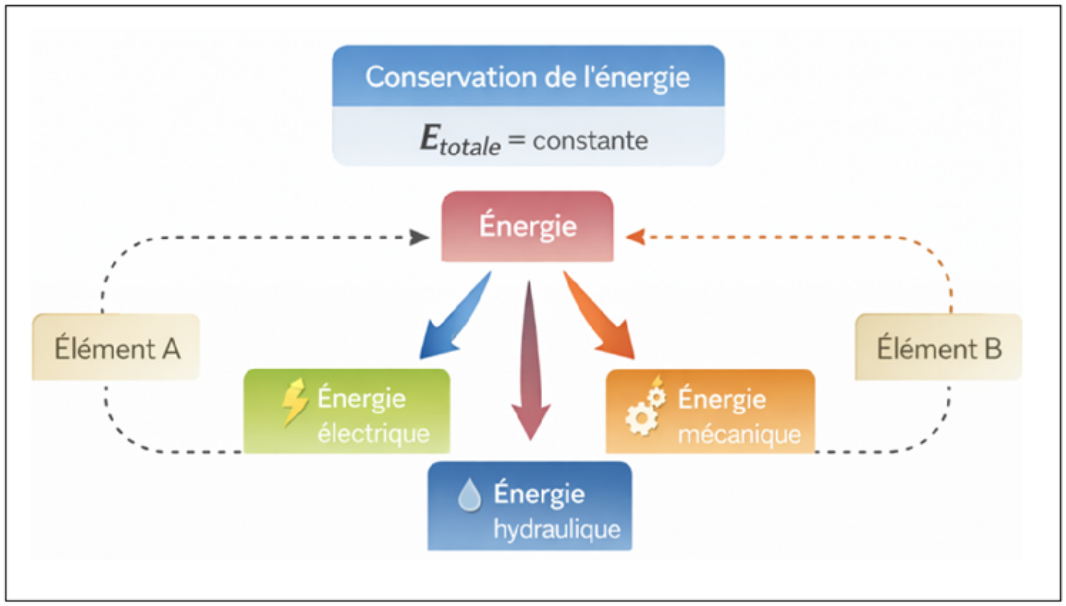


Fig. 2.1 : Représentation des échanges d'énergie entre les composants d'un système

2.2.2 Variables effort et flux

Dans le formalisme Bond Graph, les échanges d'énergie entre les différents composants d'un système sont décrits à l'aide de deux variables fondamentales appelées effort et flux.

- **L'effort :** représente une grandeur associée à une force ou à une contrainte appliquée sur un élément. Par exemple, il peut s'agir d'une tension dans un système électrique, d'une force dans un système mécanique ou encore d'une pression dans un système hydraulique.
- **Le flux :** correspond à une grandeur liée au mouvement ou à l'écoulement. Il peut représenter le courant électrique, la vitesse ou le débit selon le domaine physique considéré [20, 22].

Ces deux variables sont dites conjuguées, car leur produit correspond à la puissance échangée entre les composants du système :

$$P(t) = e(t) \times f(t)$$

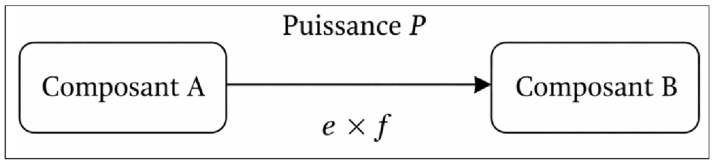


Fig. 2.2 : Représentation des variables effort et flux dans un échange de puissance

Cette relation constitue la base de la modélisation énergétique en Bond Graph, puisqu'elle permet de décrire de manière unifiée les échanges de puissance dans différents domaines physiques. [18].

Domaine physique	**Effort (e)**	**Flux (f)**
Électrique	Tension [V]	Courant [A]
Mécanique (translation)	Force [N]	Vitesse [m/s]
Mécanique (rotation)	Couple [N.m]	Vitesse angulaire [rad/s]
Hydraulique	Pression [Pa]	Débit volumique [m^3/s]
Thermique	Température [K]	Flux thermique [W]
Chimique (transformation)	Potentiel chimique [J/mol]	Flux molaire [mol/s]
Chimique (cinétique)	Affinité chimique [J/mol]	Vitesse de réaction [mol/s]

Tab. 2.1 : Correspondance entre les variables effort et flux selon le domaine physique [20]

Le moment généralisé et le déplacement généralisé sont définis respectivement par :

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

$$q(t) = q_0 + \int_{t_0}^{t} f(\tau)\, d\tau$$

Les relations différentielles associées sont :

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

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

Ces relations montrent que :

- l'effort est la dérivée du moment ;
- le flux est la dérivée du déplacement.

Ainsi :

- $p(t)$ représente une quantité accumulée liée à l'effort ;
- $q(t)$ représente une quantité accumulée liée au flux [18].

2.2.3 Énergie du système

L'énergie échangée dans le système peut être exprimée à partir de la puissance, qui correspond au produit de l'effort et du flux :

$$E(t) = E_0 + \int_{t_0}^{t} e(\tau)\, f(\tau)\, d\tau$$

L'énergie peut également être exprimée en fonction des variables généralisées q ou p, ce qui permet de simplifier l'analyse des systèmes énergétiques.

$$E(q) = E(q_0) + \int_{q_0}^{q} e(q)\, dq$$

$$E(p) = E(p_0) + \int_{p_0}^{p} f(p)\, dp$$

Dans le cas d'un système mécanique, comme un ressort de raideur k, la force est proportionnelle au déplacement :

$$F = kx$$

L'énergie potentielle stockée dans ce ressort est donnée par :

$$E_p = \int_{x_0}^{x_1} kx\, dx = \frac{1}{2}k(x_1^2 - x_0^2)$$

Cette relation montre que l'énergie stockée dans le ressort dépend du carré du déplacement. En effet, lorsque le déplacement augmente, l'énergie ne croît pas de manière linéaire mais quadratique. Ainsi, si le déplacement est multiplié par deux, l'énergie est multipliée par quatre. Cela s'explique par le fait que la force appliquée est proportionnelle au déplacement. Par conséquent, une augmentation du déplacement entraîne une accumulation rapide de l'énergie [22].

2.3 Éléments du Bond Graph

Les systèmes modélisés par Bond Graph sont constitués d'un ensemble d'éléments interconnectés qui permettent de représenter les différents phénomènes physiques. Chaque élément joue un rôle spécifique dans le stockage, la dissipation ou la transformation de l'énergie.

Ces éléments sont reliés entre eux par des liaisons énergétiques appelées *bonds*, qui assurent le transfert de puissance entre les composants. L'ensemble de ces éléments permet ainsi de construire un modèle global représentant le comportement dynamique du système [18].

Dans le formalisme Bond Graph, les éléments peuvent être classés en plusieurs catégories principales :

- **Éléments actifs :** (Se, Sf)
- **Éléments passifs :** (R, C, I)
- **Éléments de transformation :** (TF, GY)
- **Jonctions :** (0 et 1) [18]

Chaque catégorie correspond à une fonction physique particulière, ce qui permet de représenter de manière structurée et cohérente les systèmes multi-domaines. Dans cette section, nous allons présenter en détail les différents éléments du Bond Graph ainsi que leurs rôles dans la modélisation des systèmes.[18]

Domaine	**Effort (e)**	**Flux (f)**	**Déplacement (q)**	**Impulsion (p)**
Chimique	Concentration [mol/m^3]	Flux molaire [mol/s]	Nombre de moles (n)	—
Hydraulique	Pression [Pa]	Débit massique [kg/s]	Masse (m) [kg]	Impulsion de pression
Thermique (convection)	Température [K]	Flux d'enthalpie [J/s]	Énergie interne [J]	—
Thermique (conduction)	Température [K]	Flux thermique [J/s]	Quantité de chaleur [J]	—

Tab. 2.2 : Variables généralisées dans différents domaines physiques (pseudo Bond Graph) [18]

Les variables généralisées présentées dans ce tableau permettent d'établir une correspondance entre les différents domaines physiques en utilisant une approche unifiée basée sur l'énergie. Chaque domaine est caractérisé par un couple de variables effort et flux, dont le produit représente la puissance échangée.

Les variables de déplacement et d'impulsion correspondent aux grandeurs intégrées du flux et de l'effort respectivement. Elles jouent un rôle essentiel dans la modélisation des phénomènes de stockage d'énergie.

Cette représentation facilite l'analyse des systèmes multi-domaines en offrant une vision cohérente des échanges énergétiques, même lorsque les phénomènes physiques impliqués sont de nature différente [18].

2.3.1 Éléments passifs (1-port)

Les éléments passifs dans le formalisme Bond Graph sont des composants qui ne produisent pas d'énergie. Leur rôle se limite à stocker ou dissiper l'énergie au sein du système. Ces éléments sont dits *1-port* car ils sont connectés au reste du système par un seul port énergétique (un seul bond).

On distingue trois éléments passifs fondamentaux : l'élément résistif R, l'élément capacitif C et l'élément inertiel I [18].

Chacun d'eux correspond à un comportement physique spécifique que l'on retrouve dans plusieurs domaines (électrique, mécanique, hydraulique, etc.).

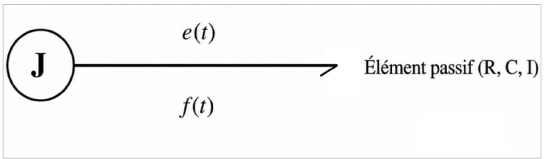


Fig. 2.3 : Schéma des éléments passifs à 1 port [18]

Élément résistif (R)

L'élément résistif représente les phénomènes de dissipation d'énergie dans un système. Il modélise les pertes irréversibles dues, par exemple, aux frottements mécaniques ou à l'effet Joule dans les circuits électriques.

Cet élément ne stocke pas d'énergie mais la transforme en une autre forme, généralement sous forme de chaleur [22].

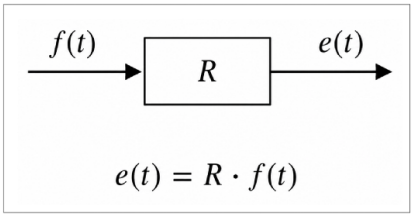


Fig. 2.4 : Schéma bloc de l'élément résistif [22]

Propriétés de l'élément résistif :

L'équation caractéristique de l'élément résistif s'écrit :

$$e(t) = R\, f(t)$$

L'effort est proportionnel au flux, ce qui traduit une perte d'énergie dans le système.

La puissance dissipée par ce composant est donnée par :

$$P = e\, f = R\, f^2 = \frac{e^2}{R} \geq 0$$

Cette expression montre que la puissance dissipée est toujours positive ou nulle, ce qui signifie que l'énergie est constamment extraite du système.

Ainsi, l'élément résistif est considéré comme un élément passif et irréversible, jouant un rôle essentiel dans la modélisation des pertes énergétiques [22].

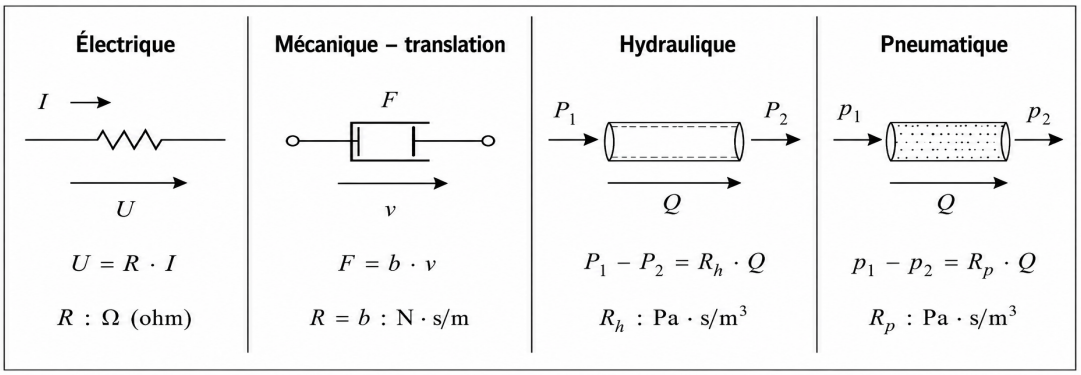


Fig. 2.5 : Représentation d'éléments-R dans les différents domaines physiques [22]

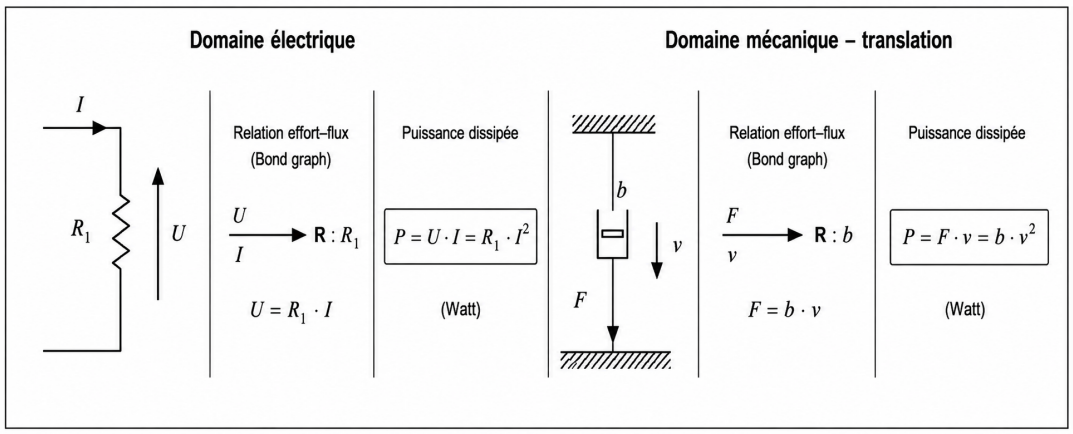


Fig. 2.6 : Analogie des domaines électrique et mécanique et représentation de la puissance dissipée d'éléments-R [22]

- **Élément capacitif (C)**

L'élément capacitif est utilisé pour modéliser le stockage de l'énergie sous forme potentielle dans un système physique.

Contrairement à l'élément résistif, il ne dissipe pas l'énergie mais la conserve temporairement.

Il est associé à des composants capables d'accumuler de l'énergie, comme un condensateur dans le domaine électrique ou un ressort dans le domaine mécanique.

Son comportement dépend de l'historique du système, ce qui introduit une mémoire dans la dynamique [22].

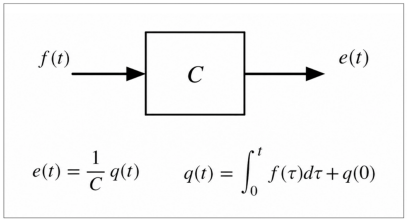


Fig. 2.7 : Schéma bloc de l'élément capacitif [22]

Propriétés de l'élément capacitif :

L'équation caractéristique de l'élément capacitif s'écrit :

$$e(t) = \frac{1}{C}\, q(t)$$

Avec :

$$q(t) = \int f(t)\, dt$$

L'effort dépend de l'accumulation du flux dans le temps, ce qui traduit un phénomène de stockage d'énergie dans le système.

L'énergie emmagasinée par cet élément est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2}\, C\, e^2$$

Cette expression montre que l'énergie stockée est toujours positive ou nulle, ce qui signifie que l'énergie est conservée dans le système.

Ainsi, l'élément capacitif est considéré comme un élément passif et réversible, jouant un rôle essentiel dans la modélisation des phénomènes de stockage d'énergie [22].

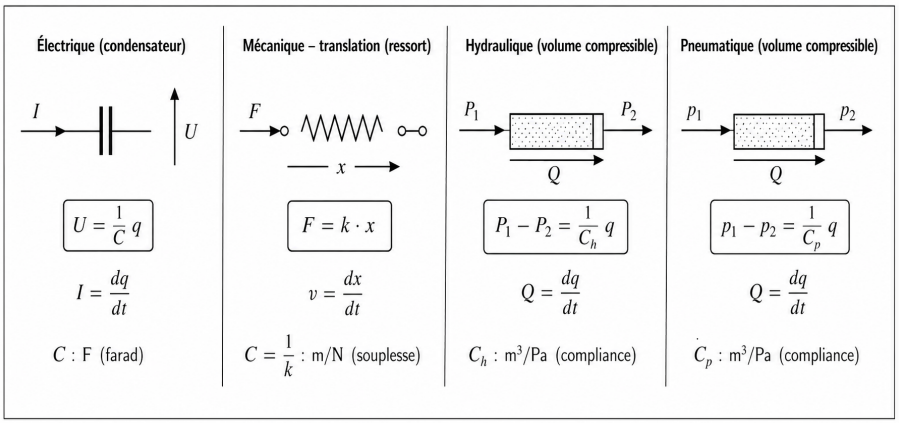


Fig. 2.8 : Représentation d'éléments-C dans les différents domaines physiques [22]

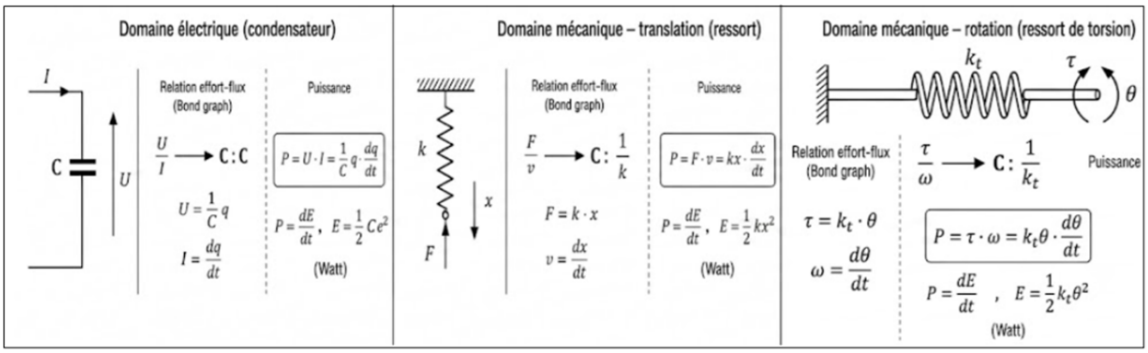


Fig. 2.9 : Analogie des domaines électrique et mécanique et représentation de la puissance dissipée d'éléments-C [22]

Élément inertiel (I)

L'élément inertiel permet de modéliser le stockage de l'énergie sous forme cinétique dans un système physique. Il est associé à des phénomènes d'inertie, comme une masse en mécanique ou une inductance en électricité [22].

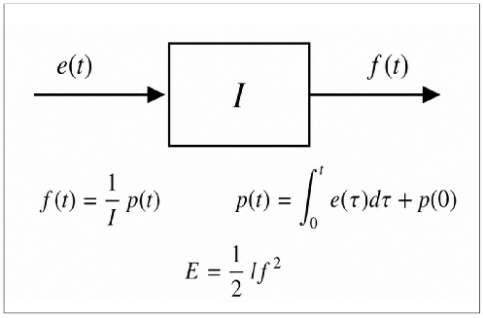


Fig. 2.10 : Schéma bloc de l'élément inertiel [22]

Propriétés de l'élément inertiel :

L'équation caractéristique de l'élément inertiel s'écrit :

avec :

$$f(t) = \frac{1}{I}\, p(t)$$

$$p(t) = \int e(t)\, dt$$

Le flux dépend de l'accumulation de l'effort dans le temps, ce qui traduit un phénomène de stockage d'énergie cinétique dans le système [22].

L'énergie emmagasinée par cet élément est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2} I f^2$$

Cette expression montre que l'énergie stockée est toujours positive ou nulle, ce qui signifie que l'énergie est conservée dans le système.

Ainsi, l'élément inertiel est considéré comme un élément passif et réversible, jouant un rôle essentiel dans la modélisation des phénomènes dynamiques [22].

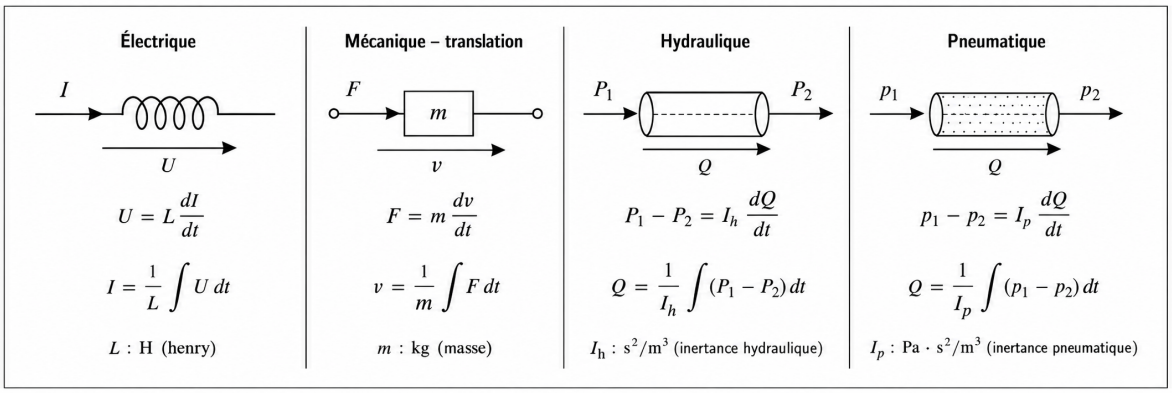


Fig. 2.11 : Représentation d'éléments-I dans les différents domaines physiques [22]

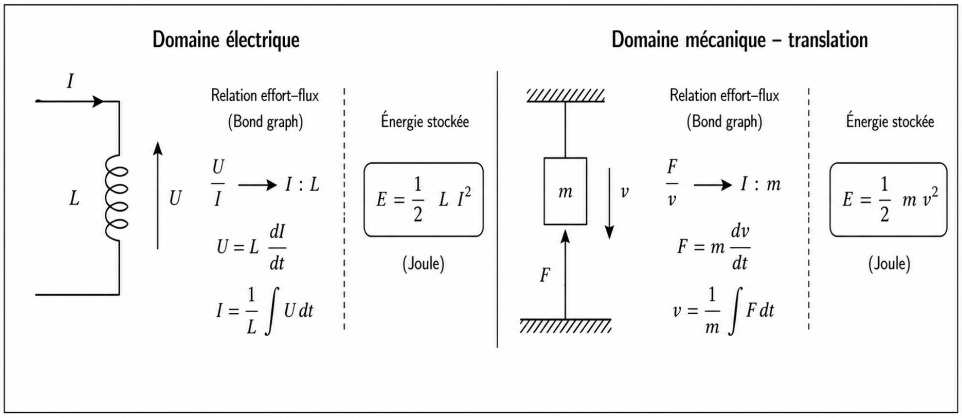


Fig. 2.12 : Analogie des domaines électrique et mécanique et représentation de la puissance échangée par d'éléments-I [22]

2.3.2 Éléments actifs

Les éléments actifs dans le formalisme Bond Graph sont des composants capables de fournir de l'énergie au système. Contrairement aux éléments passifs, qui se limitent au stockage ou à la dissipation, les éléments actifs imposent une grandeur indépendante, ce qui permet de modéliser les sources externes.

Ces éléments jouent un rôle essentiel dans la représentation des systèmes réels, car ils traduisent l'action des générateurs ou des excitations extérieures, telles que les sources électriques, les forces appliquées ou encore les débits imposés. [22].

Dans le modèle Bond Graph, on distingue principalement deux types d'éléments actifs [22] :

Source d'effort (Se)

La source d'effort notée Se, impose une valeur d'effort au système indépendamment des autres éléments.

Cette grandeur peut représenter selon le domaine physique considéré : une tension en électricité, une force en mécanique ou une pression en hydraulique.

Dans ce cas, l'effort est fixé par la source, tandis que le flux dépend du comportement global du système.

Son équation caractéristique s'écrit :

$$e(t) = e_s(t)$$

L'effort est fixé par la source et reste indépendant des autres éléments du système. En revanche, le flux s'adapte en fonction des interactions et du comportement global.

Pour le cas d'une source modulée, l'effort dépend d'un signal de commande externe u_c [22].

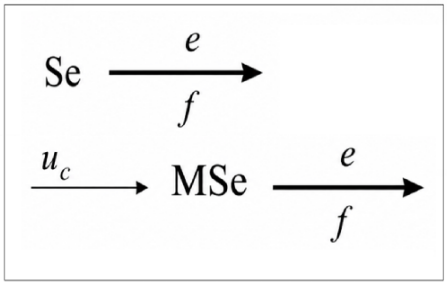


Fig. 2.13 : Représentation des sources d'effort indépendante (Se) et modulée (MSe)

Source de flux (Sf)

La source de flux, notée Sf, agit comme un élément imposant un flux. Elle injecte dans le système une valeur bien définie indépendamment des autres éléments.

Selon le domaine physique, ce flux peut prendre différentes formes : un courant électrique en électricité, une vitesse mécanique ou encore un débit hydraulique.

Ici, le flux est fixé par la source, tandis que l'effort dépend du comportement global du système.

Son équation caractéristique s'écrit :[22].

$$f(t) = f_s(t)$$

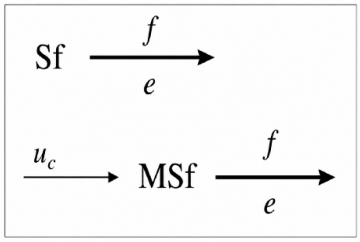


Fig. 2.14 : Représentation des sources de flux indépendante (Sf) et modulée (MSf) [22]

Le tableau suivant présente différents exemples de sources d'effort et de flux dans plusieurs domaines physiques, ainsi que leurs équations caractéristiques.

Domaine physique	**Type**	**Bond Graph**	**Équation**	**Signification physique**
Électrique	Source d'effort	Se	$e = e_s(t)$	Tension imposée
Électrique	Source de flux	Sf	$f = f_s(t)$	Courant imposé
Mécanique (translation)	Source d'effort	Se	$e = F_s(t)$	Force appliquée
Mécanique (translation)	Source de flux	Sf	$f = v_s(t)$	Vitesse imposée
Mécanique (rotation)	Source d'effort	Se	$e = C_s(t)$	Couple imposé
Mécanique (rotation)	Source de flux	Sf	$f = \omega_s(t)$	Vitesse angulaire imposée
Hydraulique / Pneumatique	Source d'effort	Se	$e = P_s(t)$	Pression imposée
Hydraulique / Pneumatique	Source de flux	Sf	$f = Q_s(t)$	Débit imposé

Tab. 2.3 : Exemples de sources d'effort et de flux dans différents domaines physiques [22]

2.3.3 Éléments de transformation

Les éléments de transformation dans le formalisme Bond Graph permettent de représenter le transfert d'énergie entre différents domaines physiques, tout en conservant la puissance. Contrairement aux éléments passifs, ils ne stockent ni ne dissipent l'énergie, mais assurent sa conversion d'une forme à une autre.

Ces éléments sont particulièrement utiles pour modéliser les systèmes multi-domaines, tels que les systèmes électromécaniques ou électrohydrauliques. [18]

Transformateur (TF)

Le transformateur noté TF, est un élément à deux ports qui permet de représenter la transmission de puissance au sein d'un même domaine physique. Il intervient dans des systèmes tels que les transformateurs électriques, les mécanismes d'engrenages ou encore les bras de levier [18].

Lorsque le coefficient de transformation n'est pas constant, le transformateur est dit modulé et est alors noté mTF.

Le transformateur assure la conservation de la puissance entre ses deux ports, ce qui implique :

$$e_1 f_1 = e_2 f_2$$

Cette relation conduit à :

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

avec m représentant le rapport de transformation.

Les équations caractéristiques du transformateur s'écrivent alors : [18]

$$e_1 = m\, e_2$$

$$f_2 = m\, f_1$$

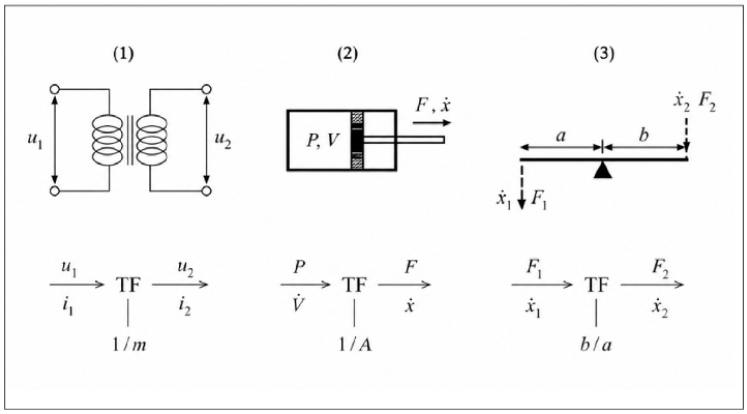


Fig. 2.15 : Exemples de transformateurs (TF) appliqués à différents systèmes physiques [18]

Cette figure illustre trois applications du transformateur (TF) dans différents domaines physiques. Dans chaque cas, cet élément relie deux ports en assurant le transfert d'énergie sans perte, tout en adaptant les variables effort et flux.

Elle met ainsi en évidence le rôle du transformateur dans la modélisation des échanges énergétiques tout en respectant la conservation de la puissance.

Exemple (1) : il s'agit d'un transformateur électrique, où les tensions et les courants sont liés par un rapport de transformation.

Exemple (2) : illustre un système hydraulique de type piston, dans lequel la pression et le débit sont reliés par la surface du piston.

Exemple (3) : correspond à un système mécanique de type levier, où les forces et les vitesses sont liées par les longueurs des bras de levier.

Gyrateur (GY)

Le gyrateur est un élément de transformation particulier qui permet d'assurer le transfert de puissance entre deux systèmes de nature différente. Contrairement au transformateur, il réalise une conversion croisée entre les variables effort et flux.

Cet élément est également conservatif, ce qui signifie qu'il ne stocke ni ne dissipe l'énergie, mais assure uniquement sa transmission entre les deux ports.

La conservation de la puissance s'exprime par la relation suivante :

$$e_1 f_1 = e_2 f_2$$

Ce qui conduit à :

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

où r représente le coefficient de gyration.

Les équations caractéristiques du gyrateur s'écrivent alors [18] :

$$e_1 = r\, f_2$$

$$e_2 = r\, f_1$$

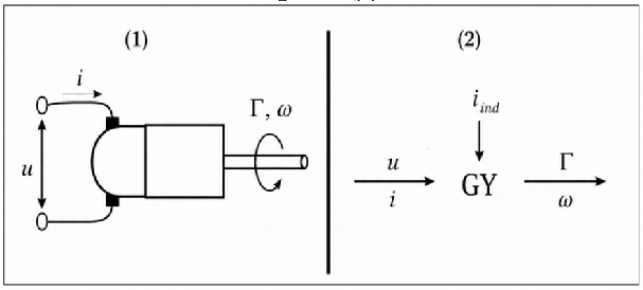


Fig. 2.16 : Représentation du gyrateur (GY) et du gyrateur modulé (MGY) [18]

Cette figure illustre deux configurations du gyrateur utilisées dans la modélisation Bond Graph.

Schéma (1) :

représente un gyrateur classique reliant un système électrique à un système mécanique, où le courant i est converti en couple Γ, tandis que la tension u est associée à la vitesse angulaire ω.

Dans ce cas, le coefficient r établit une relation de proportionnalité entre ces grandeurs, traduisant ainsi le couplage entre les deux domaines physiques.

Schéma (2) :

présente un gyrateur modulé (MGY), dans lequel le coefficient de transformation n'est plus constant mais dépend d'un signal externe.

Cette variation permet de modéliser des systèmes plus complexes où les caractéristiques évoluent en fonction des conditions de fonctionnement [18].

2.3.4 Jonctions

Les jonctions constituent des éléments fondamentaux dans le formalisme Bond Graph. Elles permettent d'assurer l'interconnexion entre plusieurs éléments tout en respectant les lois de conservation de l'énergie.

Il existe principalement deux types de jonctions : la jonction 0 et la jonction 1, chacune correspondant à une loi physique spécifique.

Dans toutes les jonctions, le principe de conservation de l'énergie est vérifié. Ainsi, la somme des puissances associées à chaque liaison est nulle, ce qui traduit l'absence de création ou de perte d'énergie au niveau de la jonction [22] :

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

Jonction 0

La jonction 0 est un élément de couplage qui permet de relier plusieurs éléments soumis à un même effort.

Les efforts aux différents ports sont identiques :

$$e_1 = e_2 = e_3 = \cdots = e$$

La somme algébrique des flux est nulle :

$$\sum f_i = 0$$

Par exemple :

$$f_1 - f_2 - f_3 = 0$$

Le bilan de puissance au niveau de la jonction est nul, ce qui traduit la conservation de l'énergie [22] :

$$e_1 f_1 - e_2 f_2 - e_3 f_3 = 0$$

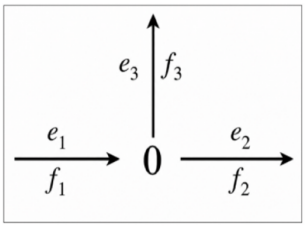


Fig. 2.17 : La jonction "0" dans Bond Graph [22]

Cette figure représente une jonction 0 dans le formalisme Bond Graph reliant trois liaisons énergétiques.

Dans cette configuration, les variables d'effort e_1, e_2 et e_3 sont identiques, tandis que les flux f_1, f_2 et f_3 se répartissent de manière à respecter la conservation de l'énergie [22].

Jonction 1

La jonction 1 est un élément de couplage qui permet de relier plusieurs éléments soumis à un même flux.

Les flux aux différents ports sont identiques :

$$f_1 = f_2 = f_3 = \cdots = f$$

La somme algébrique des efforts est nulle :

$$\sum e_i = 0$$

Par exemple :

$$e_1 - e_2 - e_3 = 0$$

Le bilan de puissance au niveau de la jonction est nul, ce qui traduit la conservation de l'énergie [22] :

$$e_1 f_1 - e_2 f_2 - e_3 f_3 = 0$$

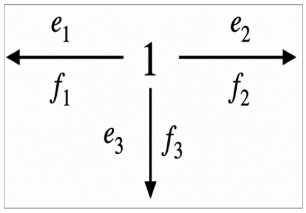


Fig. 2.18 : La jonction "1" dans Bond Graph [22]

Cette figure représente une jonction 1 dans le formalisme Bond Graph, reliant trois liaisons énergétiques.

Dans cette configuration, les variables de flux f_1, f_2 et f_3 sont identiques, ce qui traduit l'égalité des flux au niveau de la jonction.

En revanche, les efforts e_1, e_2 et e_3 se répartissent entre les différentes branches de manière à respecter la conservation de l'énergie, ce qui implique que leur somme algébrique est nulle [22].

2.3.5 Représentation des liaisons (bonds)

Dans le formalisme Bond Graph, les liaisons, appelées *bonds*, représentent les échanges d'énergie entre les différents éléments du système. Elles assurent la transmission de la puissance et permettent de relier les composants entre eux.

Chaque liaison est caractérisée par deux variables fondamentales : l'effort e et le flux f. Le produit de ces deux grandeurs correspond à la puissance échangée entre les éléments :

$$P = e\,f$$

Une liaison est représentée graphiquement par un segment orienté muni d'une demi-flèche indiquant le sens positif de transfert de puissance. Cette orientation définit une convention de signe pour les variables, sans nécessairement correspondre au sens réel de circulation de l'énergie.

Ainsi, les liaisons jouent un rôle essentiel dans la modélisation des systèmes physiques, en assurant une représentation cohérente des interactions énergétiques entre les différents composants [22].

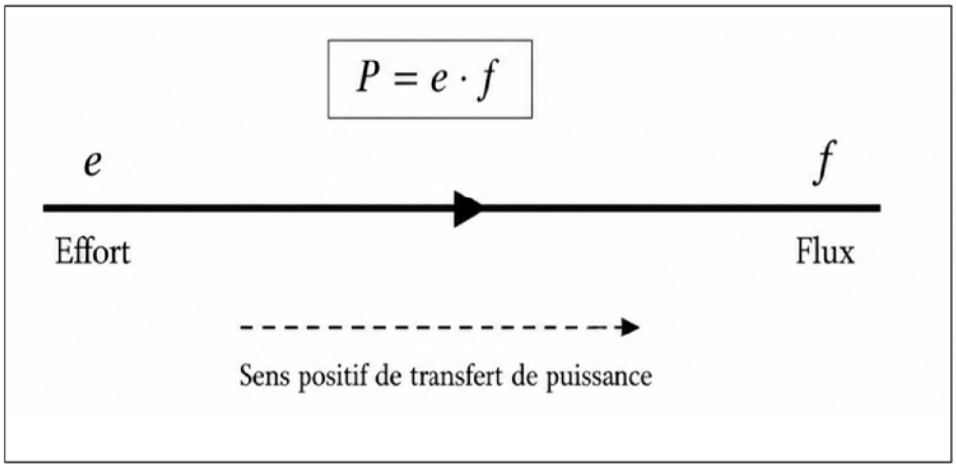


Fig. 2.19 : Représentation d'une liaison (bond) [22]

Avec les notions fondamentales associées à une liaison (*bond*) :

- e : effort (variable généralisée de type effort : force, tension, pression, etc.).
- f : flux (variable généralisée de type flux : vitesse, courant, débit, etc.).
- P : puissance instantanée échangée entre les deux éléments reliés par la liaison.
- La flèche (orientation) : placée sur la liaison indique le sens positif de transfert de puissance ; elle définit une convention de signe pour le flux et l'effort.
- Les variables réelles : peuvent prendre des valeurs positives, négatives ou nulles, en fonction du sens réel des échanges énergétiques et du comportement du système [22].

2.4 Causalité

2.4.1 Définition

Dans le formalisme Bond Graph, la causalité exprime le lien de cause à effet entre les variables d'un système. Pour chaque liaison, elle détermine quelle variable (effort ou flux) est imposée par un élément et laquelle en découle. Elle est fondamentale pour la modélisation : elle guide l'établissement des équations et en simplifie la résolution.

Graphiquement, sur un *bond* (liaison), la causalité se signale par un trait perpendiculaire placé à une extrémité. Ce trait signifie que l'élément situé de ce côté impose l'effort, le flux étant alors déduit [18, 22].

En résumé :

- Côté du trait → variable imposée (effort)
- Côté opposé → variable résultante (flux)

Ainsi, la causalité clarifie le sens de calcul des variables dans le modèle et garantit une représentation cohérente du comportement du système [22].

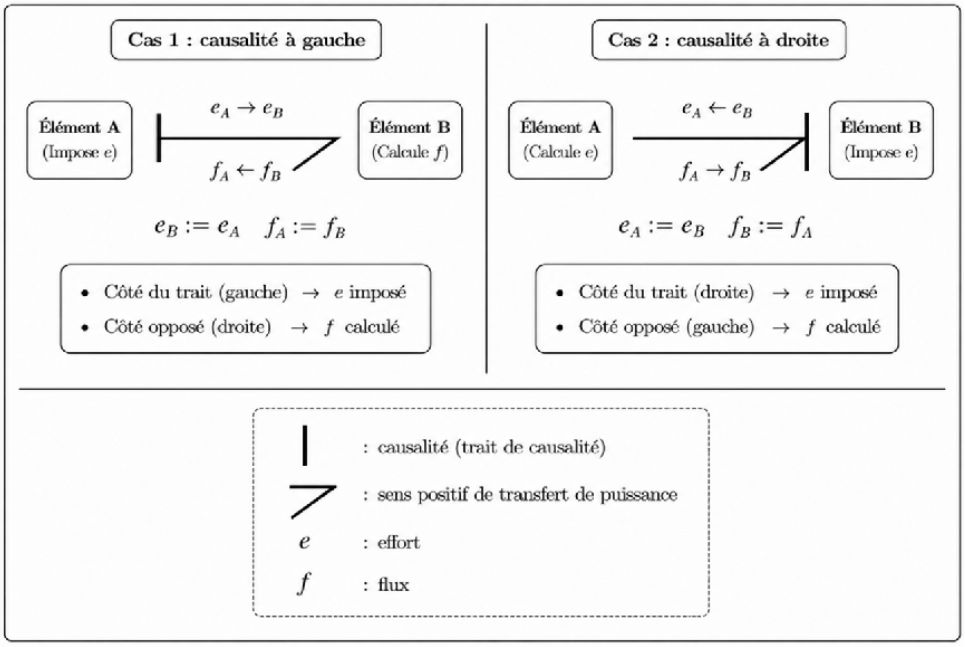


Fig. 2.20 : Illustration de la causalité dans une liaison énergétique (bond) [22]

2.4.2 Causalité intégrale et dérivée

Dans le formalisme Bond Graph, la causalité permet de définir la manière dont les variables effort et flux sont reliées dans chaque élément. Selon la nature de cette relation, on distingue deux types principaux de causalité :

- **Causalité intégrale**

La causalité intégrale correspond à une représentation dans laquelle les variables d'état du système sont obtenues par intégration. Ce type de causalité est généralement privilégié, car il reflète le comportement physique naturel des systèmes et assure une meilleure stabilité numérique.

Pour un élément capacitif C :

$$e(t) = \frac{1}{C} \int f(t)\, dt$$

Pour un élément inertiel I :

$$f(t) = \frac{1}{I} \int e(t)\, dt$$

Ainsi, la causalité intégrale permet de décrire directement les grandeurs d'état du système (charge, quantité de mouvement, etc.)

- **Causalité dérivée**

La causalité dérivée apparaît lorsque les relations entre les variables impliquent une dérivation temporelle. Dans ce cas, les variables d'état sont obtenues par dérivation, ce qui peut entraîner des difficultés d'interprétation physique ou de résolution numérique.

Pour un élément capacitif C :

$$f(t) = C\frac{de(t)}{dt}$$

Pour un élément inertiel I :

$$e(t) = I\frac{df(t)}{dt}$$

Ce type de causalité est généralement moins souhaitable, car il peut introduire des contraintes supplémentaires dans le modèle et rendre l'analyse plus complexe [20, 22].

2.4.3 Chemin causal

Dans le formalisme Bond Graph, le chemin causal représente une succession ordonnée de liaisons énergétiques reliant différents éléments du système selon une orientation imposée par la causalité.

Il est constitué d'une alternance entre les jonctions $(0, 1)$, les éléments de transformation (TF, GY) et les éléments de base (R, C, I) tout en respectant les règles de causalité du modèle.

Le chemin causal permet de suivre la propagation des variables énergétiques à travers le système, soit sous forme d'effort, soit sous forme de flux.

Cette propagation joue un rôle essentiel dans l'analyse structurelle et dans la compréhension des échanges d'énergie entre les différents composants du modèle [19, 20].

On distingue principalement deux types de chemins causaux :

Chemin causal simple

Un chemin causal est dit simple lorsque la propagation s'effectue en conservant la même variable tout au long du parcours.

Autrement dit, le chemin est suivi soit uniquement par la variable effort, soit uniquement par la variable flux.

Dans ce cas, les orientations causales restent cohérentes d'un élément à un autre, ce qui facilite l'analyse du comportement énergétique du système.

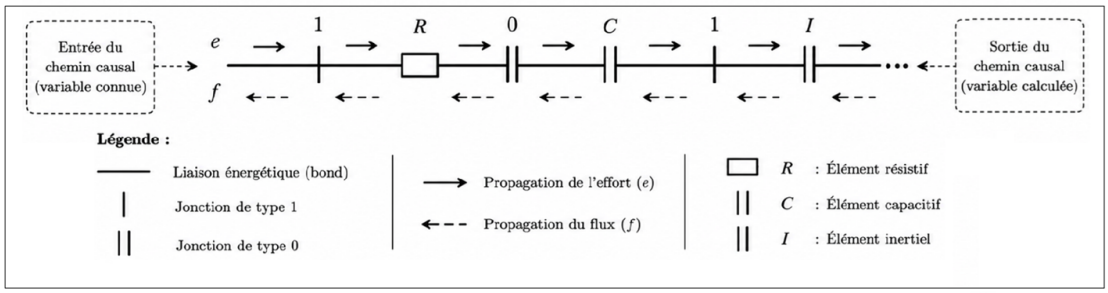


Fig. 2.21 : Exemple de chemin causal simple dans un modèle Bond Graph

Cette figure illustre un chemin causal simple dans une structure Bond Graph.

La propagation des variables énergétiques s'effectue tout au long du parcours en conservant la même variable, soit l'effort e, soit le flux f.

Les flèches indiquent le sens de transmission des informations causales entre les différents éléments et jonctions du système.

Ce type de chemin facilite l'analyse structurelle et la formulation des équations dynamiques du modèle [20].

Chemin causal mixte

Un chemin causal est qualifié de mixte lorsque la propagation des informations énergétiques ne conserve pas la même variable tout au long du parcours.

Au cours du chemin, la transmission peut passer de la variable effort à la variable flux, ou inversement.

Ce type de chemin apparaît principalement dans les systèmes comportant des éléments de couplage énergétique, comme le gyrateur GY, qui réalise une transformation entre effort et flux [20].

La présence d'un chemin causal mixte traduit généralement une interaction entre plusieurs domaines physiques.

Elle permet de représenter les échanges énergétiques complexes au sein du système, mais peut également rendre l'analyse structurelle et causale plus délicate [20, 23].

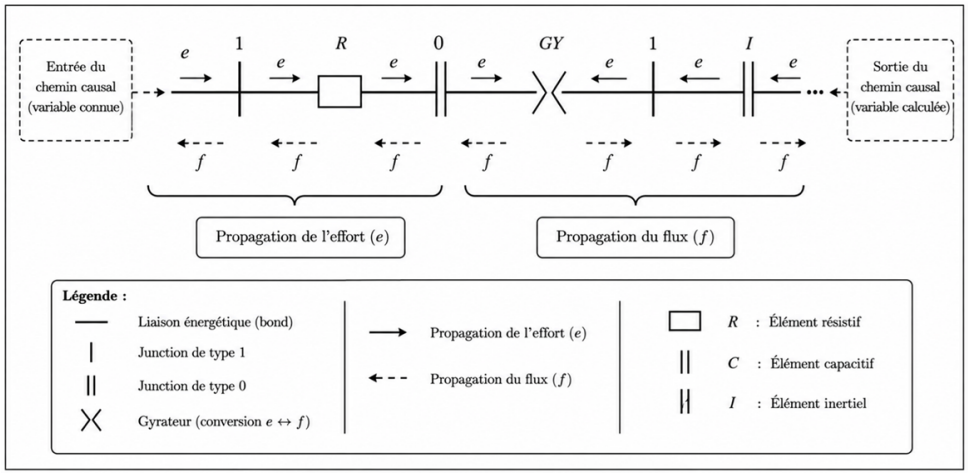


Fig. 2.22 : Exemple de chemin causal mixte dans un modèle Bond Graph

Cette figure illustre un chemin causal mixte dans une structure Bond Graph.

Contrairement au chemin causal simple, la propagation des variables énergétiques change au cours du parcours.

La transmission peut ainsi passer de la variable effort à la variable flux ou inversement, notamment en présence d'un élément de transformation tel que le gyrateur GY.

Ce type de chemin permet de représenter les interactions énergétiques entre différents domaines physiques dans les systèmes multi-énergies [20, 23].

2.5 Méthodologie de modélisation par Bond Graph

La modélisation par Bond Graph est une méthode énergétique utilisée pour représenter le comportement dynamique des systèmes physiques, quel que soit leur domaine (électrique, mécanique, hydraulique, etc.).

Elle repose sur les échanges de puissance à travers les variables effort et flux.

La démarche se déroule en plusieurs étapes principales :

1) Identification du système physique

Analyse des composants du système, des sources d'énergie, des éléments de stockage, des dissipations et des interactions entre sous-systèmes.

2) Choix des variables énergétiques

Définition des variables effort et flux selon le domaine physique (ex. : tension/courant en électrique, force/vitesse en mécanique) [19, 20].

3) Construction du Bond Graph

Représentation graphique du système à l'aide des éléments Bond Graph tels que R, C, I, Se, Sf, TF, GY et les jonctions 0 et 1 afin de modéliser les transferts de puissance.

4) Attribution de la causalité

Détermination du sens de calcul des variables effort et flux pour identifier les variables d'état et assurer la cohérence du modèle.

5) Établissement des équations dynamiques

Déduction des équations du système à partir du Bond Graph causalisé pour permettre la simulation, l'analyse énergétique, la commande et le diagnostic.

6) Validation du modèle

Vérification de la conformité du modèle par simulation, comparaison avec le comportement réel et analyse des résultats expérimentaux [18, 19, 20].

2.6 Conclusion

Le formalisme Bond Graph constitue une approche unifiée et particulièrement pertinente pour la modélisation des systèmes industriels multi-domaines, caractérisés par l'interaction simultanée de plusieurs phénomènes physiques.

Ces systèmes intègrent généralement des composants issus de diverses disciplines technologiques et sont fréquemment décrits par des équations différentielles non linéaires, rendant l'application des méthodes classiques de modélisation plus complexe.

Grâce à son approche énergétique et à sa représentation graphique, la méthodologie Bond Graph permet de structurer de manière rigoureuse les échanges de puissance entre les différents composants du système.

Elle facilite l'identification des variables d'état ainsi que la formulation des équations dynamiques à partir du modèle causal obtenu.

Cette représentation permet ainsi une compréhension approfondie du comportement global du système et simplifie l'analyse des interactions entre les différents domaines physiques.

Dans ce chapitre, nous avons exposé les concepts fondamentaux du langage Bond Graph, en mettant l'accent sur les éléments constitutifs, les jonctions, la causalité et la méthodologie de modélisation.

L'étude des propriétés structurelles et causales présentées constitue un socle indispensable pour l'analyse dynamique des systèmes complexes.

En définitive, la méthode Bond Graph s'impose comme un outil puissant pour la modélisation, la simulation et l'analyse énergétique des systèmes industriels.

Par ailleurs, ses propriétés structurelles et son architecture fonctionnelle offrent des perspectives intéressantes dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des systèmes, notamment pour la génération des relations de redondance analytique, l'implantation des capteurs et la détection des défauts, thématiques qui seront approfondies dans le chapitre suivant [19, 20, 23].

Chapitre 3



Diagnostic et surveillance des systèmes par Bond Graph

3.1 Introduction

Dans les systèmes industriels modernes, l'apparition de défauts ou de dysfonctionnements peut entraîner une dégradation des performances, des arrêts de production ainsi que des risques pour la sécurité des installations.

Il devient donc indispensable de mettre en œuvre des méthodes efficaces de surveillance et de diagnostic afin d'assurer un fonctionnement fiable, sécurisé et continu des systèmes industriels.

La surveillance des systèmes consiste à suivre en permanence l'évolution des grandeurs physiques et à analyser le comportement du procédé afin de détecter rapidement toute anomalie susceptible d'affecter son fonctionnement normal.

Le diagnostic permet ensuite d'identifier les défauts, de localiser leurs origines et d'évaluer leurs conséquences sur le comportement global du système.

Parmi les différentes approches développées dans ce domaine, la méthode Bond Graph occupe une place importante grâce à sa représentation énergétique et structurelle des systèmes multi-domaines.

En exploitant les propriétés causales et structurelles du modèle Bond Graph, il devient possible de générer des relations analytiques permettant la détection et la localisation des défauts [18, 24].

Cette approche facilite également l'étude de la surveillabilité du système ainsi que l'analyse de la détectabilité et de l'isolabilité des défauts [18, 24].

Elle constitue ainsi un outil particulièrement adapté aux applications de supervision, de surveillance et de diagnostic des systèmes industriels complexes.

Dans ce chapitre, nous présenterons les notions fondamentales liées au diagnostic et à la surveillance des systèmes par Bond Graph.

Nous aborderons notamment les concepts de défaut, de défaillance, de panne et de résidu, ainsi que le principe général de la surveillance des systèmes et les différentes étapes du diagnostic appliqué aux systèmes industriels [23].

3.2 Notions de base

Le diagnostic et la surveillance des systèmes industriels reposent sur plusieurs notions fondamentales permettant de comprendre le comportement des systèmes en présence d'anomalies.

Ces concepts jouent un rôle essentiel dans l'analyse des défauts, l'évaluation des performances et la mise en œuvre des méthodes de détection et d'isolation[23].

Dans cette section, nous présenterons les principales notions utilisées dans le domaine du diagnostic des systèmes, notamment les concepts de défaut, de défaillance, de panne et de résidu.

La compréhension de ces notions constitue une étape indispensable pour l'étude des méthodes de surveillance basées sur le formalisme Bond Graph [23].

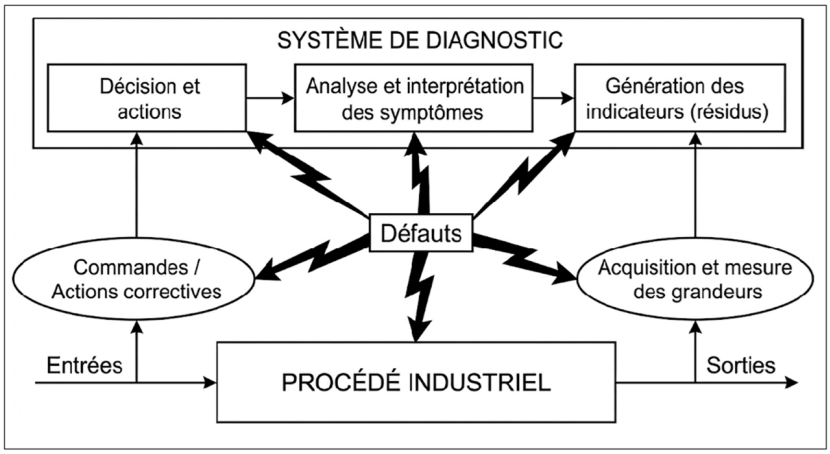


Fig. 3.1 : Architecture générale d'un système de diagnostic industriel

Cette figure illustre l'architecture générale d'un système de diagnostic appliqué à un procédé industriel soumis à de multiples défauts. Le processus repose sur un flux bidirectionnel et continu d'informations : les grandeurs physiques du procédé sont d'abord acquises pour générer des résidus (indicateurs d'anomalies). Ces derniers sont ensuite analysés et interprétés afin d'identifier et de localiser précisément les différents défauts. Enfin, cette analyse permet la prise de décision et le déploiement d'actions correctives adaptées sur le procédé pour garantir sa sécurité et son bon fonctionnement [23].

3.2.1 Défaut

Dans le domaine du diagnostic des systèmes industriels, un défaut correspond à une anomalie ou à une modification anormale affectant le comportement d'un système ou de l'un de ses composants.

Il peut être provoqué par une imperfection physique, une erreur de conception, une perturbation externe ou une variation anormale des paramètres du système. Un défaut apparaît généralement lorsqu'une grandeur observée ou un paramètre dépasse les limites de fonctionnement admissibles [23].

Cette situation crée un écart entre le comportement réel du système et son fonctionnement nominal.

Si le défaut n'est pas détecté à temps, il peut entraîner une dégradation progressive du système et conduire à une défaillance [23].

3.2.2 Défaillance

Une défaillance correspond à l'incapacité d'un système ou d'un composant à assurer correctement la fonction pour laquelle il a été conçu.

Elle se traduit par une altération du fonctionnement normal du procédé et peut provoquer une diminution des performances ou une interruption du service.

La défaillance résulte généralement de l'évolution d'un ou de plusieurs défauts non détectés ou non corrigés.

Elle représente ainsi une anomalie fonctionnelle affectant le comportement global du système [23].

3.2.3 Panne

Une panne désigne l'état d'un système devenu incapable d'assurer totalement ou partiellement sa fonction.

Elle apparaît généralement à la suite d'une défaillance importante empêchant le fonctionnement normal du dispositif.

Contrairement au défaut, qui peut être présent sans arrêter immédiatement le système, la panne se manifeste souvent par un arrêt du procédé ou par une perte significative de performances.

Ainsi, une panne constitue généralement la conséquence directe d'une défaillance non traitée [23].

3.2.4 Résidu

Le résidu est un indicateur utilisé dans les méthodes de surveillance et de diagnostic pour mettre en évidence la présence d'un défaut.

Il représente l'écart entre les informations mesurées sur le système réel et les valeurs estimées à partir du modèle du système.

En fonctionnement normal, le résidu reste proche de zéro ou à l'intérieur d'un intervalle admissible. En revanche, l'apparition d'un défaut provoque une variation significative du résidu, ce qui permet de détecter et éventuellement de localiser l'anomalie dans le système [18, 25].

3.3 Principe de la surveillance des systèmes

La surveillance des systèmes industriels consiste à suivre en permanence le comportement d'un procédé afin de détecter toute anomalie susceptible d'altérer son fonctionnement normal.

Elle vise principalement à garantir la sécurité, la fiabilité et la disponibilité des installations industrielles par la détection précoce des défauts et des dysfonctionnements.

Le principe de la surveillance repose sur l'acquisition des grandeurs physiques du système à l'aide de capteurs, puis sur l'analyse des informations mesurées [25].

Les données obtenues sont comparées aux valeurs de référence ou aux résultats fournis par un modèle représentant le fonctionnement nominal du système.

Toute différence significative entre le comportement réel et le comportement attendu peut révéler la présence d'un défaut [25].

Dans les approches basées sur les modèles, cette comparaison permet de générer des indicateurs appelés résidus.

En fonctionnement normal, les résidus restent faibles ou proches de zéro, tandis que l'apparition d'un défaut entraîne une variation importante de ces indicateurs, permettant ainsi la détection de l'anomalie et l'engagement d'une procédure de diagnostic [18, 25].

La surveillance des systèmes comprend généralement plusieurs étapes essentielles :

- Acquisition des mesures
- Traitement des données
- Génération des résidus
- Détection des anomalies
- Analyse et interprétation des défauts

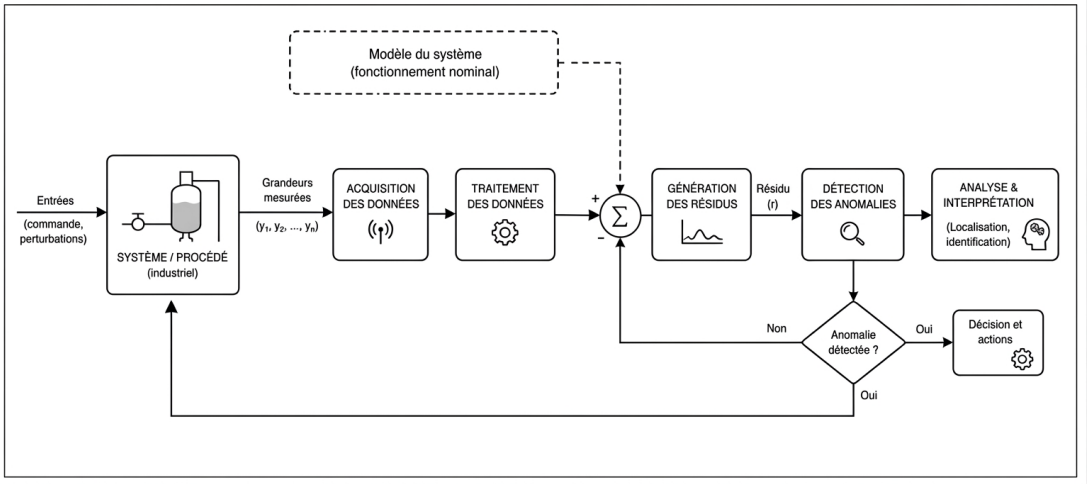


Fig. 3.2 : Principe général de la surveillance et du diagnostic des systèmes industriels

Cette figure présente les différentes étapes du processus de surveillance et de diagnostic appliqué aux systèmes industriels.

Les grandeurs physiques du procédé sont d'abord acquises à l'aide des capteurs afin de collecter les mesures nécessaires au suivi du fonctionnement du système.

Les données obtenues sont ensuite traitées à travers des opérations de filtrage, de mise à l'échelle et de prétraitement afin d'améliorer leur exploitation.

Par la suite, les mesures réelles sont comparées au comportement attendu fourni par le modèle du système afin de générer des résidus.

Ces résidus correspondent à l'écart entre le fonctionnement réel et le fonctionnement nominal du procédé.

L'analyse des résidus permet alors de détecter l'apparition d'une variation anormale indiquant la présence éventuelle d'un défaut [18, 25].

Une fois l'anomalie détectée, une phase d'analyse et d'interprétation est menée afin de localiser et d'identifier le défaut.

Enfin, des décisions et des actions correctives appropriées peuvent être mises en œuvre pour maintenir le bon fonctionnement, la sécurité et la fiabilité du système industriel [18, 25].

3.4 Diagnostic des systèmes

Dans les systèmes industriels modernes, les techniques de commande et de régulation sont largement maîtrisées.

Toutefois, la surveillance en ligne reste souvent limitée au suivi de certains paramètres ou à la gestion des alarmes à partir de seuils prédéfinis.

Avec l'augmentation de la complexité des procédés industriels, il devient nécessaire de développer des méthodes de diagnostic capables de détecter et d'isoler rapidement les défauts afin d'assurer la sécurité, la fiabilité et la continuité de fonctionnement des systèmes [18].

Le diagnostic des systèmes industriels regroupe l'ensemble des méthodes permettant de détecter, localiser et identifier les anomalies susceptibles d'affecter le comportement d'un procédé.

Les techniques de détection et d'isolation des défauts, connues sous l'appellation Fault Detection and Isolation (FDI), occupent une place importante dans les stratégies de surveillance industrielle et contribuent à améliorer la sûreté de fonctionnement des installations [24, 26].

Les systèmes de surveillance ont pour objectif de fournir à tout instant une description de l'état de fonctionnement des différents composants du système [18].

Dans ce contexte, l'opérateur de supervision exploite généralement deux approches complémentaires :

- Détection et isolation des défauts (FDI)
- Commande tolérante aux fautes (FTC : Fault Tolerant Control)

L'approche FDI permet de détecter la présence des défauts, d'identifier leurs origines et de localiser les éléments défaillants du système.

La commande tolérante aux fautes, quant à elle, vise à maintenir le fonctionnement du procédé malgré l'apparition des anomalies, soit en adaptant la commande, soit en arrêtant le système lorsque cela devient nécessaire [27, 28].

La commande tolérante aux fautes peut être réalisée selon deux approches principales :

- Approche passive basée sur la commande robuste, dans laquelle les régulateurs sont conçus pour être peu sensibles aux défauts et aux perturbations [29]
- Approche active exploitant en temps réel les informations fournies par le module FDI afin d'adapter le comportement du système en présence de défaillances [26]

Dans les approches basées sur les modèles, le diagnostic repose généralement sur la génération de résidus représentant les écarts entre les mesures réelles et les valeurs estimées par le modèle du système.

L'analyse de ces résidus permet alors de détecter les anomalies et de localiser les défauts [18, 24].

Grâce à ses propriétés structurelles et causales, le formalisme Bond Graph constitue un outil particulièrement adapté au diagnostic des systèmes multi-domaines [18].

Il facilite notamment la génération des relations de redondance analytique ainsi que l'étude de la détectabilité et de l'isolabilité des défauts [28].

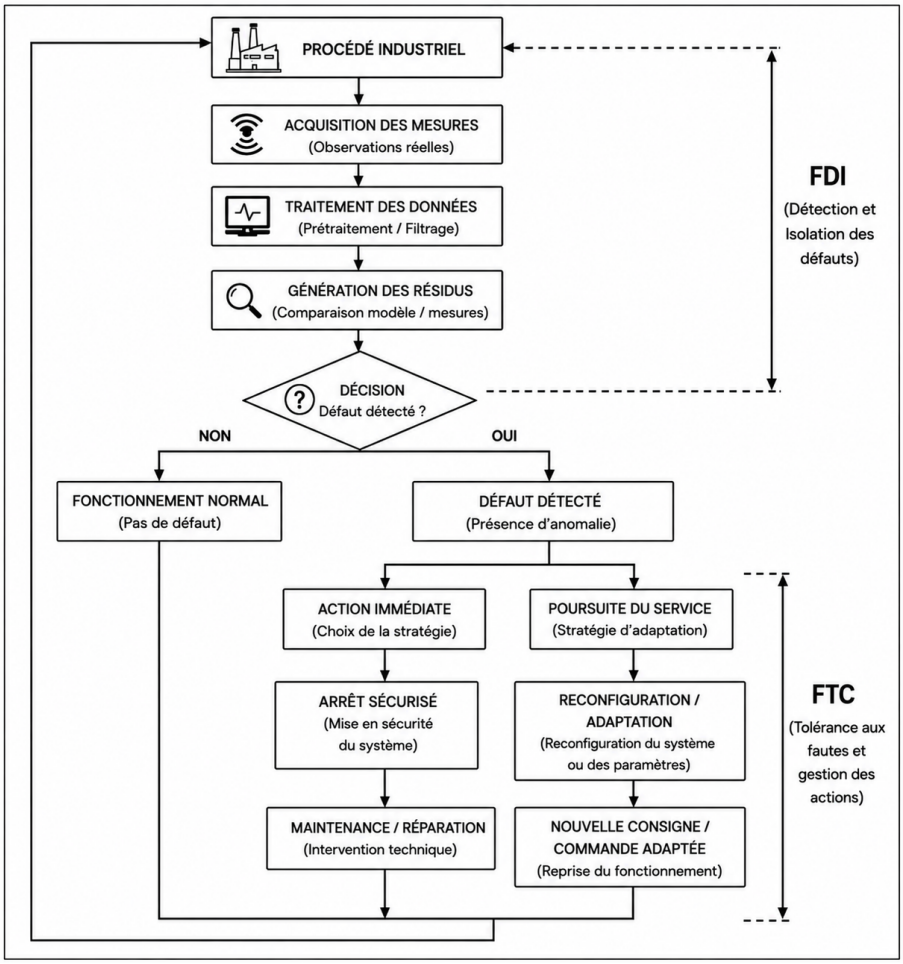


Fig. 3.3 : Architecture fonctionnelle d'un système de diagnostic et de surveillance industrielle

La figure 3.3 formalise l'architecture intégrée du système de surveillance, structurée en deux niveaux :

- **Le FDI (Surveillance Globale) :** Il supervise l'intégralité de la chaîne. Il gère la perception (acquisition, filtrage, génération des résidus), la décision (détection du défaut) et l'aiguillage final vers la stratégie de sécurité (arrêt et maintenance).
- **Le FTC (Module d'Adaptation) :** Entièrement imbriqué sous le contrôle du FDI, ce bloc s'active uniquement en présence d'un défaut surmontable. Son rôle se limite à l'évaluation de la sévérité et à la reconfiguration dynamique des lois de commande pour réinjecter une consigne adaptée et assurer la continuité de service.

3.4.1 Détection

La détection constitue la première étape du processus de diagnostic des systèmes industriels. Elle vise à déterminer si le système fonctionne normalement ou présente une anomalie susceptible d'altérer ses performances.

Dans les approches de diagnostic fondées sur les modèles, la détection s'appuie sur l'analyse des résidus, issus de la comparaison entre les mesures réelles du système et les valeurs prédites par un modèle de référence.

En fonctionnement normal, ces résidus demeurent faibles ou proches de zéro, tandis que l'apparition d'un défaut entraîne une variation notable de ces indicateurs [18].

En réalité, les mesures sont fréquemment affectées par le bruit, les perturbations et les incertitudes liées à la modélisation.

Ainsi, des seuils de décision ou des méthodes statistiques sont employés pour distinguer les variations normales des anomalies réelles.

Dans le cadre du formalisme Bond Graph, les propriétés structurelles et causales du modèle facilitent la génération de Relations de Redondance Analytique (RRA),

ce qui permet une détection efficace des défauts dans les systèmes multi-domaines [18, 25, 24].

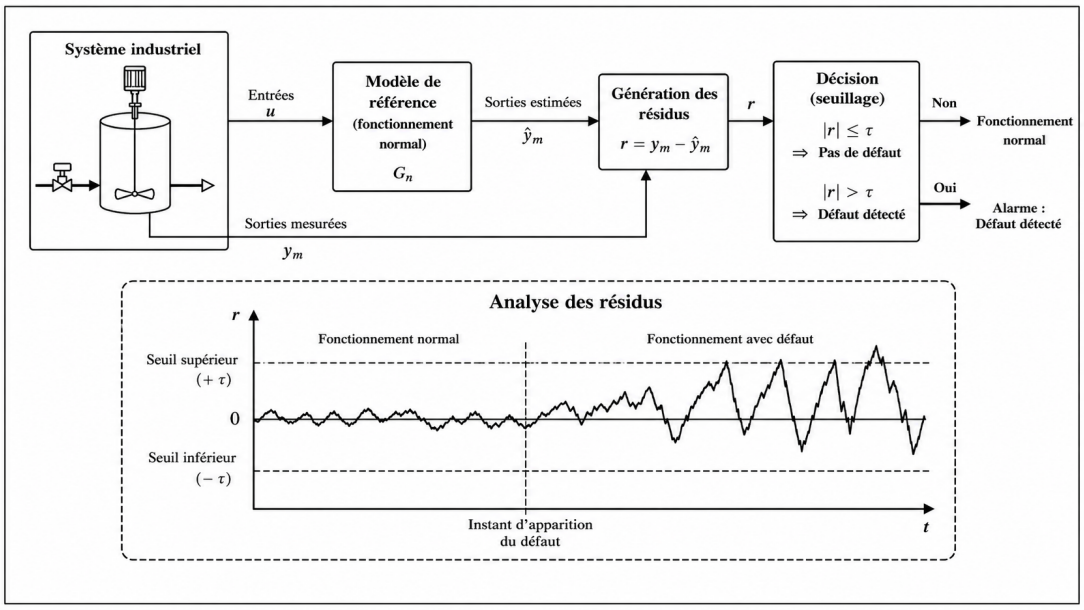


Fig. 3.4 : Principe général de la détection des défauts basée sur l'analyse des résidus

3.4.2 Localisation

La localisation intervient après la phase de détection des défauts.

Son objectif est d'identifier l'élément ou le composant responsable de l'anomalie détectée dans le système.

Cette étape repose généralement sur l'analyse des résidus obtenus lors de la phase de détection. En étudiant la manière dont chaque défaut influence les différents résidus, il devient possible d'associer une anomalie observée à un composant particulier du système.

L'ensemble des effets produits par un défaut sur les résidus constitue sa signature.

La localisation permet ainsi de remonter des effets observés vers la cause réelle du dysfonctionnement.

Elle joue un rôle essentiel dans les opérations de maintenance et de supervision, puisqu'elle facilite l'identification rapide de l'élément défaillant et réduit les temps d'arrêt du système [25, 24].

Dans le cadre du formalisme Bond Graph, les propriétés structurelles et causales du modèle facilitent l'établissement des signatures de défauts ainsi que l'analyse de l'isolabilité des anomalies dans les systèmes multi-domaines [18].

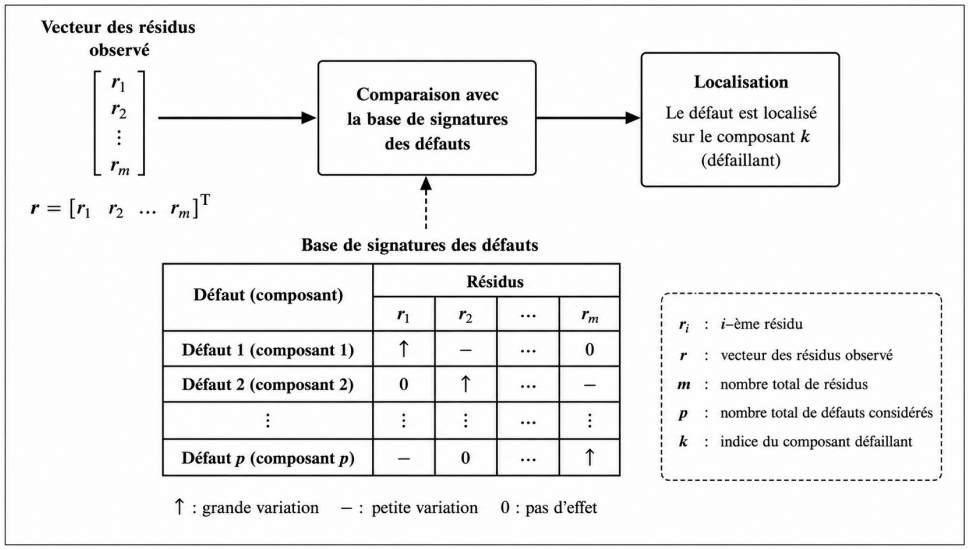


Fig. 3.5 : Principe de localisation des défauts à partir des signatures des résidus

3.4.3 Identification

L'identification intervient après les étapes de détection et de localisation des défauts.

Elle consiste à déterminer avec précision la nature, l'origine ainsi que l'importance du défaut affectant le système.

Cette étape repose généralement sur l'analyse des résidus et sur l'exploitation des informations fournies par le modèle du système.

L'identification permet notamment d'évaluer l'évolution du défaut et d'estimer les paramètres associés à l'anomalie détectée [18, 25].

Dans les systèmes industriels, l'identification joue un rôle important dans la prise de décision et la mise en œuvre des actions correctives adaptées.

Elle permet ainsi d'améliorer la maintenance, de réduire les risques de panne et de garantir la continuité de fonctionnement du procédé.

Dans le cadre du formalisme Bond Graph, les propriétés structurelles et causales du modèle facilitent l'analyse des défauts et l'identification des composants défaillants dans les systèmes multi-domaines.

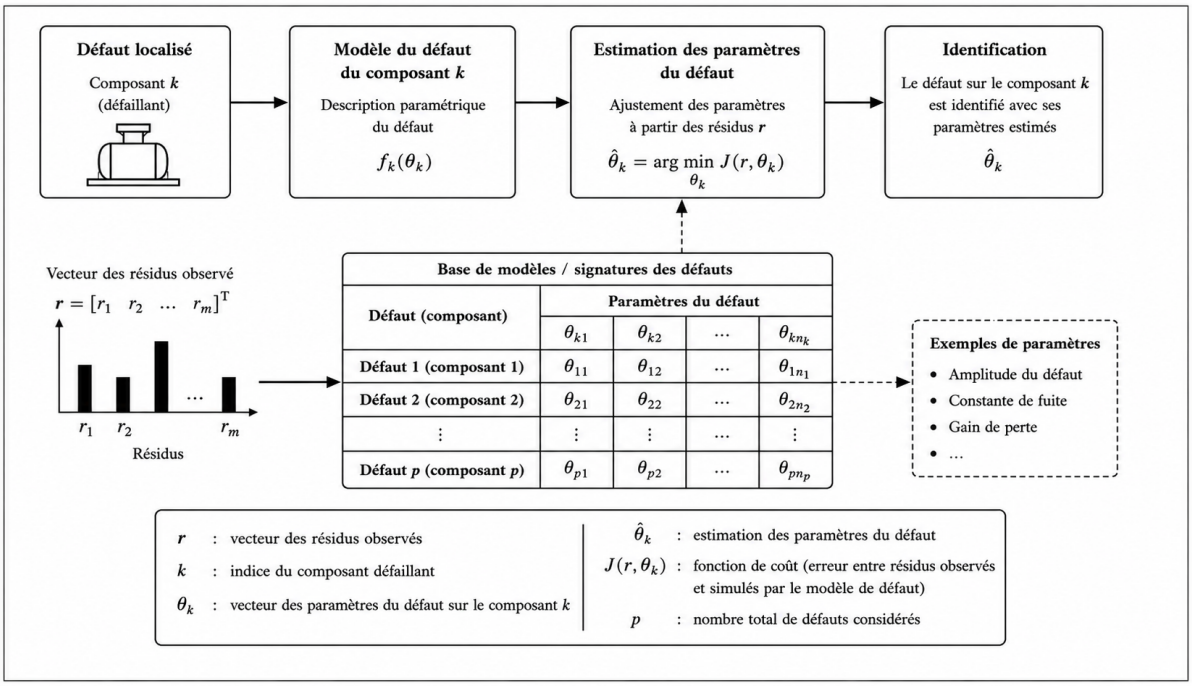


Fig. 3.6 : Principe général d'identification des défauts à partir des résidus

3.5 Diagnostic par Bond Graph

Le formalisme Bond Graph constitue une approche particulièrement adaptée au diagnostic des systèmes multiphysiques.

Contrairement aux méthodes classiques qui traitent séparément les domaines électrique, mécanique ou hydraulique, il propose une représentation unifiée exploitant les propriétés causales et structurelles du modèle pour générer automatiquement les indicateurs de défauts.

Grâce à sa représentation énergétique unifiée et multidisciplinaire, cette méthode permet de modéliser de manière cohérente les échanges de puissance entre les différents composants du système.

Les propriétés structurelles et causales des Bond Graph facilitent ainsi la génération systématique des indicateurs de défauts et des Relations de Redondance Analytique (RRA) utilisées dans les tâches de surveillance et de diagnostic.

L'approche Bond Graph distingue généralement deux parties principales dans la représentation d'un système industriel[25, 18].

La première concerne la partie énergétique, regroupant le procédé et les actionneurs responsables du transfert de puissance et d'énergie.

Cette partie est généralement modélisée à l'aide des éléments classiques du Bond Graph tels que les éléments R, C, I, les jonctions ainsi que les sources d'effort et de flux.

La seconde partie correspond au système d'information, constitué principalement de capteurs, de systèmes de mesure et de commande [25, 24].

Dans les applications de supervision, le modèle Bond Graph permet non seulement de représenter le comportement dynamique du système, mais également de relier les aspects physiques aux fonctions assurées par le procédé industriel.

Cette représentation facilite l'analyse du comportement global du système et améliore la compréhension des interactions entre les différentes grandeurs physiques.

Le diagnostic par Bond Graph peut être réalisé selon deux approches : qualitative et quantitative [18].

3.5.1 Approche qualitative

L'approche qualitative du diagnostic par Bond Graph repose principalement sur l'analyse structurelle et causale du système sans nécessiter une connaissance précise des paramètres numériques du modèle.

Cette méthode s'intéresse essentiellement aux relations entre les différents composants ainsi qu'aux échanges d'énergie au sein du système.

Dans cette approche, le modèle Bond Graph permet d'étudier l'influence des défauts sur les variables mesurées à travers les relations causales établies entre les différents éléments du système.

L'analyse des signatures des défauts facilite ainsi la détection et la localisation des composants défaillants.

L'approche qualitative présente l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre et particulièrement adaptée aux systèmes complexes ou faiblement connus.

Elle permet également d'évaluer les propriétés de détectabilité et d'isolabilité des défauts ainsi que l'efficacité du placement des capteurs dans le système.

Cependant, cette méthode fournit généralement des informations qualitatives sur la présence et l'origine des défauts sans permettre une estimation précise de leur amplitude ou de leur évolution temporelle [18, 25, 24].

3.5.2 Approche quantitative

L'approche quantitative du diagnostic par Bond Graph repose sur l'utilisation des équations mathématiques issues du modèle causal du système.

Contrairement à l'approche qualitative, cette méthode nécessite une connaissance plus précise des paramètres physiques et des grandeurs caractérisant le fonctionnement du procédé.

Dans cette approche, les Relations de Redondance Analytique (RRA) sont générées à partir du modèle Bond Graph afin de produire des résidus sensibles aux défauts.

Ces résidus sont ensuite analysés pour détecter, localiser et identifier les anomalies affectant le système. L'approche quantitative permet d'obtenir des informations plus détaillées sur les défauts, notamment leur amplitude, leur évolution temporelle ainsi que leur influence sur les performances du système.

Elle offre ainsi une meilleure précision dans les opérations de surveillance et de diagnostic.

Cependant, cette méthode dépend fortement de la qualité du modèle mathématique et de la précision des paramètres utilisés.

Elle nécessite également des calculs plus importants et une connaissance approfondie du comportement dynamique du système [18, 25].

3.6 Placement des capteurs

La surveillabilité d'un système industriel dépend fortement du nombre et de la position des capteurs dans le système.

Grâce à sa représentation graphique et causale, le formalisme Bond Graph permet un placement explicite et optimal des capteurs afin d'améliorer la détection et la localisation des défauts [24].

Dans un modèle Bond Graph, les mesures sont réalisées à l'aide des détecteurs d'effort De et des détecteurs de flux Df, utilisés respectivement pour mesurer les variables d'effort et de flux.

Ces détecteurs sont considérés comme idéaux puisqu'ils ne consomment pas de puissance ; ils sont donc représentés par des liaisons de type signal.

L'objectif principal du placement des capteurs est d'assurer la surveillabilité des composants, c'est-à-dire garantir la détectabilité et l'isolabilité des défauts[18].

On suppose généralement que [18, 24] :

- Les défauts ne sont pas multiples
- Les capteurs sont fiables
- Les sources sont exemptes de défauts

Les variables booléennes y_i et z_j, associées au placement des capteurs sur les jonctions 0 et 1, sont définies par :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si le } i^{\text{ème}} \text{ capteur est placé sur la jonction } 0_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & \text{si le } j^{\text{ème}} \text{ capteur est placé sur la jonction } 1_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Soient :

N_0 : nombre de jonctions 0
N_1 : nombre de jonctions 1
n_i : nombre de liaisons associées à la jonction 0_i
m_j : nombre de liaisons associées à la jonction 1_j

Les équations de la $i^{\text{ème}}$ jonction 0 sont :

$$\sum_{k=1}^{n_i} a_k f_k = 0$$

$$e_k = e_{c_i} \quad ; \quad k = 1, \ldots, n_i - 1$$

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

$$\sum_{l=1}^{m_j} a_l e_l = 0$$

$$f_l = f_{c_j} \quad ; \quad l = 1, \ldots, m_j - 1$$

avec :

$$a_k = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est orientée vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases}$$

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

$$K = MSe \cup MSf \cup De \cup Df \cup Se \cup Sf$$

L'ensemble des variables inconnues X est constitué des variables énergétiques associées aux éléments R, C et I :

$$X = \{e_1, f_1\} \cup \{e_2, f_2\} \cup \cdots \cup \{e_{ne}, f_{ne}\}$$

où ne représente le nombre de liaisons de puissance dans les éléments R, C et I.

Pour un élément inertiel I relié à une jonction 1, les variables d'effort et de flux sont données par :

$$e_{Ij} = \Phi_{Ij}\left[(1 - z_j)f_{Ij} + z_j D f_j\right]$$

$$f_{Ij} = \frac{1}{s}(1 - z_j)\Phi_{Ij}^{-1}(e_{Ij}) + z_j D f_j$$

Si l'élément I est relié à une jonction 0, les relations deviennent :

$$e_{Ii} = \Phi_{Ii}(1 - y_i)f_{Ii} + y_i D e_i$$

$$f_{Ii} = \frac{1}{s}(1 - y_i)\Phi_{Ii}^{-1}(e_{Ii}) + y_i D f_i$$

Pour un élément résistif R relié à une jonction 1, on obtient :

$$e_{Rj} = \Phi_{Rj}\left[(1 - z_j)f_{Rj} + z_j D f_j\right]$$

$$f_{Rj} = (1 - z_j)\Phi_{Rj}^{-1}(e_{Rj}) + z_j D f_j$$

Enfin, si l'élément R est relié à une jonction 0, les équations deviennent :

$$e_{Ri} = \Phi_{Ri}(1 - y_i)f_{Ri} + y_i D e_i$$

$$f_{Ri} = (1 - y_i)\Phi_{Ri}^{-1}(e_{Ri}) + y_i D f_i$$

L'analyse de ces relations permet d'identifier les positions optimales des capteurs afin d'améliorer la détectabilité et l'isolabilité des défauts dans les systèmes industriels surveillés [18].

3.7 Génération des relations de redondance analytique (RRA)

Les Relations de Redondance Analytique (RRA) constituent un outil fondamental dans les méthodes de surveillance et de diagnostic basées sur les modèles.

Elles représentent des relations mathématiques établies entre les variables connues du système, telles que les entrées, les sorties mesurées et les signaux de commande.

En fonctionnement normal, ces relations doivent être satisfaites ; toute déviation significative traduit alors la présence d'un défaut.

Dans le formalisme Bond Graph, la génération des RRA repose principalement sur les propriétés structurelles et causales du modèle.

Le principe consiste à éliminer les variables inconnues présentes dans les équations des jonctions 0, 1, TF et GY en exploitant les chemins causaux du Bond Graph.

Cette approche permet ainsi d'obtenir des relations exprimées uniquement à partir des variables connues du système [18, 24].

De manière générale, une relation de redondance analytique peut être exprimée sous la forme :

$$F(K) = 0$$

où K représente l'ensemble des variables connues du système.

L'évaluation numérique d'une RRA conduit à la génération d'un résidu r défini par :

$$r = f(K) \approx 0$$

En fonctionnement normal, le résidu reste proche de zéro.

En revanche, l'apparition d'un défaut provoque une variation significative du résidu, permettant ainsi la détection de l'anomalie [18, 25].

Dans une représentation Bond Graph, les variables connues regroupent principalement :

- Les sources
- Les détecteurs
- Les signaux de commande

Les variables inconnues correspondent généralement aux variables énergétiques associées aux éléments R, C et I.

La génération des RRA à partir d'un modèle Bond Graph s'effectue généralement selon les étapes suivantes :

- Mettre le modèle Bond Graph en causalité intégrale préférentielle
- Écrire les équations du modèle obtenues à partir :
  - Des jonctions
  - Des éléments du système
  - Des sources et des détecteurs

- Éliminer les variables inconnues en parcourant les chemins causaux du Bond Graph
- Déduire les Relations de Redondance Analytique à partir des équations contenant les détecteurs
- Générer les résidus en comparant les valeurs mesurées aux valeurs estimées par le modèle

Grâce à cette approche, les *RRA* permettent la génération systématique des résidus utilisés pour la détection et la localisation des défauts dans les systèmes industriels multi-domaines [18, 25].

3.8 Matrice de signature des fautes

La matrice de signature des fautes constitue un outil essentiel dans les méthodes de surveillance et de diagnostic des systèmes industriels.

Elle permet de représenter l'influence des différents défauts sur les résidus générés à partir des Relations de Redondance Analytique (*RRA*).

La structure des *RRA* permet de construire une matrice binaire S_{ij} traduisant la sensibilité des résidus vis-à-vis des composants du système.

Les lignes de cette matrice correspondent généralement aux défauts ou aux composants surveillés, tandis que les colonnes représentent les résidus obtenus à partir des *RRA* [18, 24].

Les éléments de la matrice sont définis par :

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la } i^{\text{ème}} \text{ RRA est sensible au défaut } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La matrice de signature permet ainsi d'identifier les composants responsables des anomalies détectées.

Chaque défaut possède une signature caractéristique représentée par une combinaison particulière de résidus [25, 24].

Un défaut est considéré détectable s'il influence au moins un résidu.

Il est isolable lorsque sa signature est différente de celles des autres défauts du système.

La structure générale d'une matrice de signature des fautes peut être représentée par le tableau suivant [18] :
Ce tableau représente la structure globale de la matrice de signature.

Les lignes correspondent aux résidus issus des *RRA*, tandis que les colonnes représentent les composants ou défauts du système.

RRA / Défauts	**Comp.1**	**Comp.2**	**Comp.3**	**...**	**Comp.n**
RRA1	S_{11}	S_{12}	S_{13}	...	S_{1n}
RRA2	S_{21}	S_{22}	S_{23}	...	S_{2n}
...	...	...	...	...	...
RRAm	S_{m1}	S_{m2}	S_{m3}	...	S_{mn}

Tab. 3.1 : Structure générale d'une matrice de signature des fautes

Chaque élément de la matrice indique si un résidu est sensible à un défaut donné.

Un exemple simplifié d'une matrice de signature des fautes est présenté ci-dessous :

Résidus	**Défaut** F_1	**Défaut** F_2	**Défaut** F_3	**Défaut** F_4
r_1	1	0	1	0
r_2	0	1	1	0
r_3	1	0	0	1
r_4	0	1	0	1

Tab. 3.2 : Exemple simplifié d'une matrice de signature des fautes

Dans cet exemple, chaque colonne représente un défaut et chaque ligne un résidu.

La valeur « 1 » indique qu'un résidu est affecté par un défaut, tandis que la valeur « 0 » signifie qu'il n'existe aucune influence.

Cette représentation facilite l'identification des signatures associées aux différents défauts.

L'analyse des signatures permet également d'évaluer les propriétés de détectabilité et d'isolabilité des défauts [18].

Défaut	**Db**	**Ib**
F_1	1	1
F_2	1	1
F_3	1	0
F_4	0	0

Tab. 3.3 : Analyse de détectabilité et d'isolabilité des défauts

Ce tableau présente les propriétés de détectabilité (Db) et d'isolabilité (Ib) des défauts du système.

Une valeur $Db = 1$ signifie que le défaut peut être détecté à partir des résidus générés.

Une valeur $Ib = 1$ indique que le défaut possède une signature unique permettant son isolation.

En revanche, une valeur nulle traduit une difficulté de détection ou de localisation du défaut[18].

Ainsi, la matrice de signature des fautes constitue un outil efficace pour la localisation des anomalies et l'évaluation des performances du système de diagnostic basé sur le formalisme Bond Graph [18].

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les fondements théoriques du diagnostic et de la surveillance par Bond Graph, indépendamment de tout système particulier.

Cette méthode a permis de représenter de manière cohérente les échanges énergétiques entre les différents composants du procédé tout en mettant en évidence les relations causales nécessaires à l'analyse du comportement dynamique du système.

À partir du modèle établi, les relations de redondance analytique ont été générées afin de détecter les éventuelles défaillances pouvant affecter le fonctionnement du système.

L'étude de la matrice de signature des fautes a ensuite permis d'évaluer la capacité des résidus à distinguer les différents défauts considérés, ce qui constitue une étape essentielle dans la conception d'une stratégie de surveillance fiable et efficace.

L'utilisation du Bond Graph dans le cadre du diagnostic présente ainsi plusieurs avantages, notamment une représentation unifiée des phénomènes physiques ainsi qu'une démarche systématique pour la génération des outils de détection et d'isolation des défauts. Cette approche contribue également à améliorer la compréhension globale du système et facilite l'exploitation des informations issues des capteurs.

Les résultats obtenus dans ce chapitre constituent une base importante pour la suite du travail.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation de l'environnement logiciel SYMBOLS SHAKTI, en décrivant ses modules principaux ainsi que leurs fonctionnalités dédiées à la modélisation, la simulation et le diagnostic des systèmes Bond Graph [18, 25].

Chapitre 4

Présentation du logiciel Symbols Shakti

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le logiciel SYMBOLS SHAKTI utilisé dans cette étude pour la modélisation et la simulation des systèmes physiques à l'aide du formalisme Bond Graph.

Ce logiciel offre un environnement graphique permettant de représenter les échanges d'énergie entre les différents composants d'un système et de faciliter l'analyse de son comportement dynamique.

Dans plusieurs applications, SYMBOLS SHAKTI peut être associé à d'autres environnements de simulation tels que MATLAB/Simulink ou 20-sim afin d'améliorer l'étude et l'analyse des systèmes complexes.

Comme tout outil de simulation, ce logiciel présente plusieurs avantages liés à la modélisation, à l'analyse et à la surveillance des systèmes industriels.

Toutefois, son développement doit évoluer continuellement afin de répondre aux exigences croissantes des applications industrielles modernes et aux avancées technologiques dans différents domaines.

Grâce à son interface graphique et à ses outils intégrés, il constitue ainsi un environnement efficace pour la conception, la simulation et l'analyse des systèmes complexes [25].

4.2 Présentation du logiciel Symbols

Le logiciel SYMBOLS SHAKTI est un environnement de modélisation et de simulation dédié aux systèmes dynamiques représentés par le formalisme Bond Graph.

Il facilite la construction des modèles énergétiques grâce à une interface graphique permettant d'assembler différents composants physiques tels que les résistances, les inerties, les capacités, les sources et les jonctions.

Cette représentation graphique permet de mieux visualiser les échanges d'énergie et d'analyser le comportement dynamique du système étudié.

Le logiciel offre également plusieurs outils destinés à l'analyse structurelle et causale des modèles Bond Graph, ce qui facilite l'exploitation des propriétés du système dans les applications de surveillance et de diagnostic.

SYMBOLS SHAKTI permet la génération automatique des équations associées au modèle ainsi que la simulation temporelle du comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement.



Fig. 4.1 : Interface principale du logiciel SYMBOLS SHAKTI

4.2.1 Caractéristiques du logiciel

Le logiciel SYMBOLS SHAKTI dispose de plusieurs fonctionnalités destinées à la modélisation, à la simulation et au diagnostic des systèmes dynamiques basés sur le formalisme Bond Graph.

Il prend en compte deux types d'interconnexion : graphique et équationnel.

Le niveau graphique permet la représentation du modèle Bond Graph, tandis que le niveau équationnel assure la génération automatique des équations du système.

Le logiciel intègre également plusieurs outils utilisés dans le domaine du diagnostic industriel, notamment :

- Analyse causale des modèles Bond Graph
- Génération des Relations de Redondance Analytique (RRA)
- Construction des matrices de signature des fautes
- Étude du placement des capteurs
- Détection et localisation des défauts [25]

De plus, SYMBOLS SHAKTI adapte automatiquement la causalité lors de l'ajout ou de la suppression des composants et des capteurs.

4.2.2 Environnement Symbols

L'environnement SYMBOLS SHAKTI offre une interface graphique permettant la création et la manipulation des modèles Bond Graph de manière simple et organisée.

Il regroupe plusieurs modules et espaces de travail facilitant l'accès aux différentes fonctions de modélisation et d'analyse.

L'utilisateur peut sélectionner les composants nécessaires à partir des bibliothèques intégrées puis les assembler afin de construire le modèle du système étudié.

Le logiciel permet également la visualisation des résultats de simulation sous forme de courbes et de graphiques afin de faciliter l'interprétation du comportement du système.

Grâce à son organisation modulaire et à ses outils de visualisation, l'environnement SYMBOLS SHAKTI constitue une plateforme adaptée à l'étude et à l'analyse des systèmes dynamiques complexes.

4.3 Modules du logiciel Symbols Shakti

Le logiciel SYMBOLS SHAKTI intègre plusieurs modules et algorithmes permettant d'assurer une modélisation et une simulation efficaces des systèmes dynamiques représentés par le formalisme Bond Graph.

Grâce à ses outils intégrés, il permet d'obtenir des résultats satisfaisants tout en facilitant l'analyse du comportement des systèmes étudiés.

La construction des modèles s'effectue de manière simple à l'aide de différents modules spécialisés tels que BondPad et FDIPad.

Ces modules permettent de créer et d'assembler plusieurs sous-modèles afin d'obtenir un modèle global représentant le système complet.

Le logiciel contient également des modèles génériques appelés capsules, utilisés pour simplifier la conception des systèmes complexes et améliorer l'organisation des modèles réalisés.

Les principaux modules du logiciel SYMBOLS SHAKTI sont :

- Module BondPad pour la construction des modèles Bond Graph
- Module Simulator/Controls pour la simulation et l'analyse du comportement dynamique
- Module FDIPad dédié aux applications de surveillance et de diagnostic des défauts

Dans les sections suivantes, nous présenterons les principales fonctionnalités de chacun de ces modules.

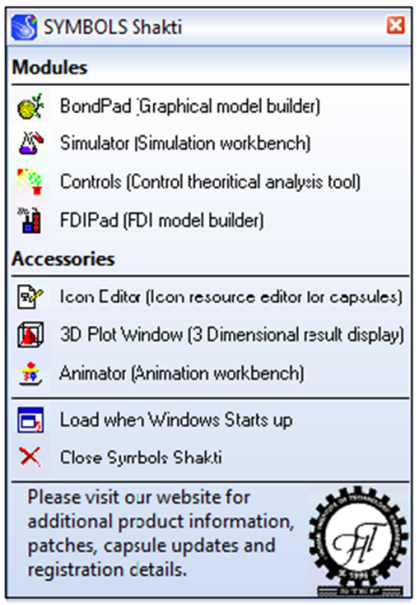


Fig. 4.2 : Modules principaux du logiciel SYMBOLS SHAKTI

4.3.1 Module BondPad

Le module BondPad est l'outil de modélisation graphique du logiciel SYMBOLS SHAKTI.

Il permet de construire les modèles Bond Graph à l'aide des différents composants énergétiques tels que les éléments R, I, C, les sources et les jonctions.

Il facilite également l'analyse causale et la génération automatique des équations du système, ce qui permet d'étudier le comportement dynamique du modèle et d'exploiter les applications de simulation et de diagnostic.

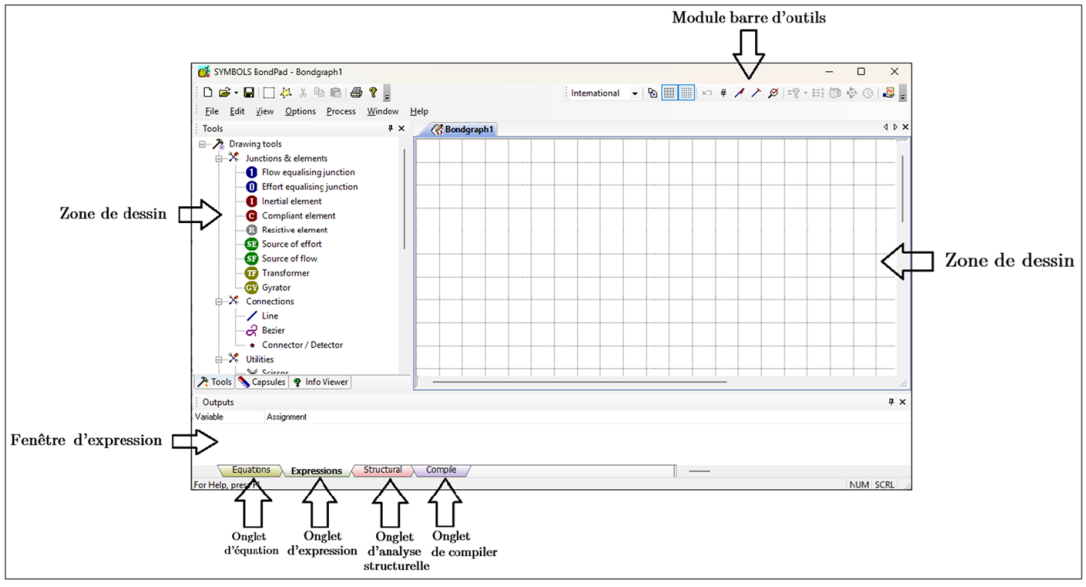


Fig. 4.3 : Fenêtre du module BondPad du logiciel SYMBOLS SHAKTI

- **Module barre d'outils :** permet d'accéder rapidement aux différentes commandes et fonctionnalités nécessaires à la création et à la modification du modèle Bond Graph.
- **Zone de dessin :** espace principal utilisé pour construire et représenter graphiquement le modèle du système étudié.
- **Zone des outils :** contient les différents composants et éléments Bond Graph pouvant être utilisés dans la modélisation.
- **Fenêtre d'expression :** permet d'afficher et de modifier les expressions et paramètres associés aux composants du modèle.
- **Onglet d'équation :** affiche les équations générées automatiquement à partir du modèle Bond Graph.
- **Onglet d'expression :** présente les relations mathématiques et expressions associées aux différents composants du système.
- **Onglet d'analyse structurelle :** permet d'effectuer l'analyse structurelle et causale du modèle afin d'étudier ses propriétés.
- **Onglet de compiler :** utilisé pour compiler le modèle et vérifier la cohérence des équations et des connexions du système.

4.3.2 Module de simulation et control

Le logiciel SYMBOLS SHAKTI contient des modules dédiés à la simulation et à l'analyse du comportement dynamique des systèmes modélisés.

Le module Simulator permet d'exécuter les simulations à partir des équations générées automatiquement par le modèle Bond Graph.

Il offre des outils permettant d'observer l'évolution des variables du système et d'analyser son comportement dans différentes conditions de fonctionnement.

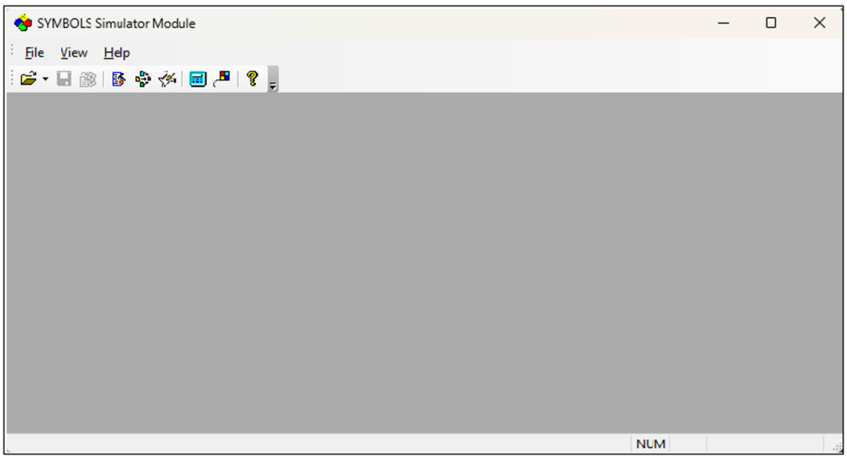


Fig. 4.4 : Interface du module Simulator du logiciel SYMBOLS SHAKTI

Le module Controls est destiné à l'étude des systèmes de commande et à l'analyse des performances dynamiques du système.

Il facilite l'exploitation des fonctions de contrôle ainsi que l'analyse des réponses du système à différentes entrées.

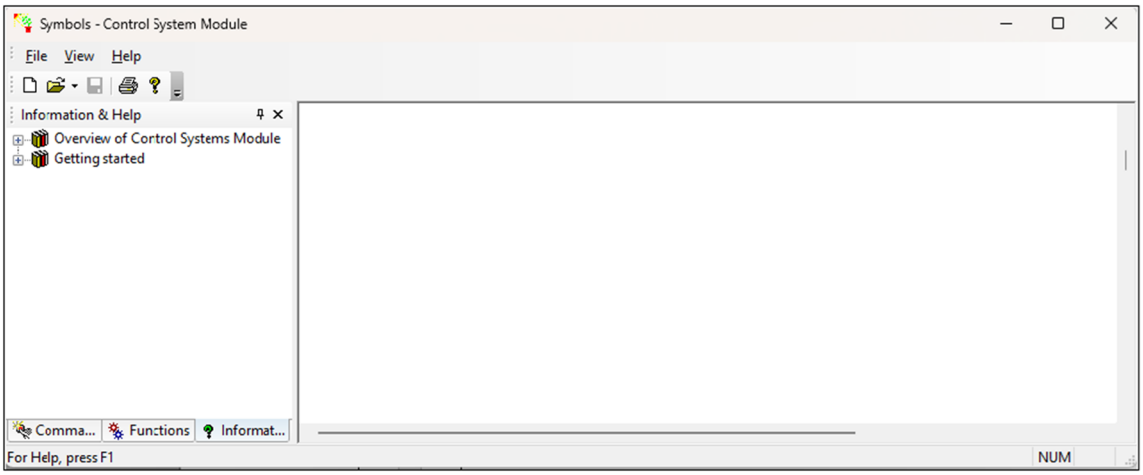


Fig. 4.5 : Interface du module Controls du logiciel SYMBOLS SHAKTI

Grâce aux modules Simulator et Controls, le logiciel permet d'effectuer des simulations numériques et d'analyser le comportement dynamique du système étudié.

Ces outils facilitent l'observation de l'évolution des grandeurs physiques ainsi que l'évaluation des performances du modèle réalisé.

4.3.3 Module FDIPad

Le module FDIPad du logiciel SYMBOLS SHAKTI est dédié aux applications de surveillance et de diagnostic des systèmes industriels.

Il permet notamment la génération des Relations de Redondance Analytique (RRA), des matrices de signature des fautes ainsi que l'étude des propriétés de détectabilité et d'isolabilité des défauts [25].

Dans ce travail, le module FDIPad a été utilisé pour analyser le modèle Bond Graph du moteur à courant continu préalablement construit sous BondPad, et générer automatiquement les Relations de Redondance Analytique (RRA) nécessaires à la détection et à la localisation des défauts.

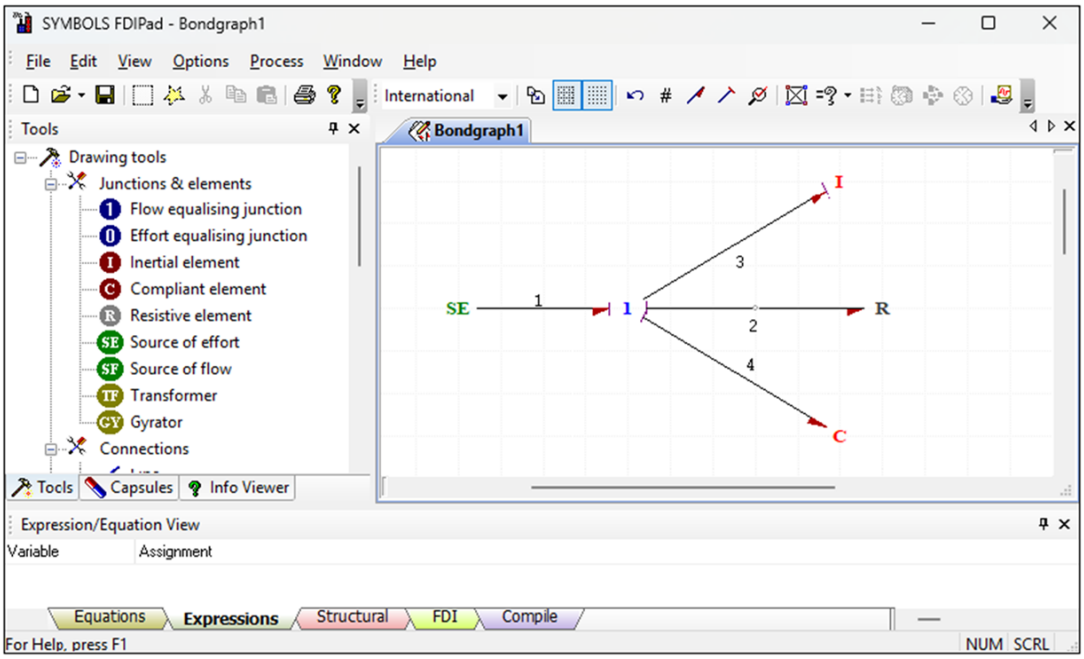


Fig. 4.6 : Représentation Bond Graph du système étudié sous le module FDIPad

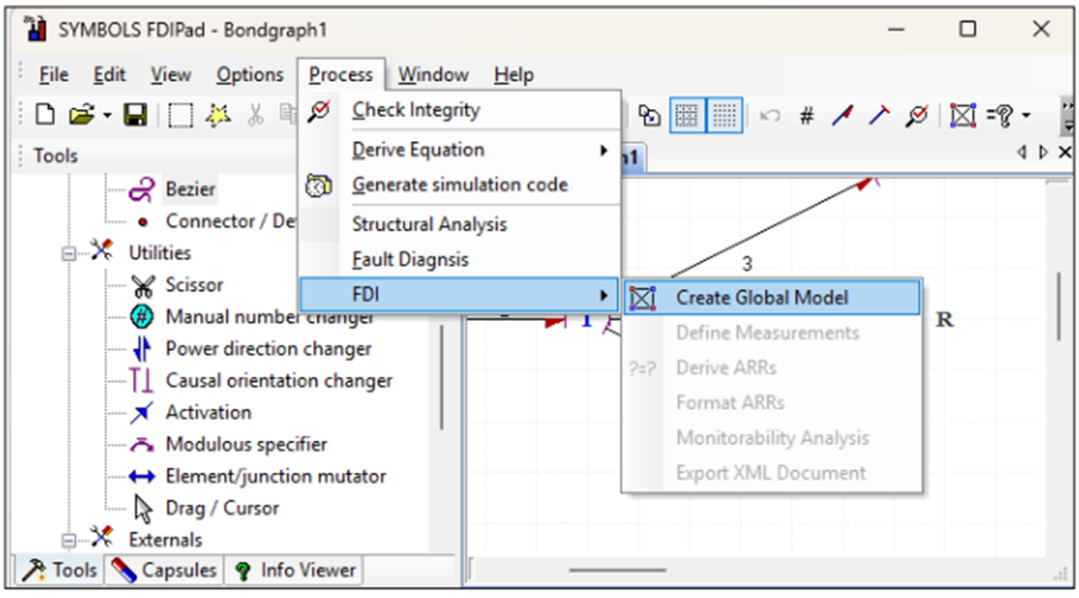


Fig. 4.7 : Menu des outils d'analyse FDI du logiciel SYMBOLS SHAKTI

Le menu FDI regroupe plusieurs outils utilisés dans les applications de surveillance et de diagnostic.

Après la vérification du modèle, l'option `Create Global Model` permet de générer le modèle global destiné à l'analyse FDI.

Le logiciel offre ensuite différentes fonctions telles que `Derive ARRs` pour la génération des Relations de Redondance Analytique (RRA), `Monitorability Analysis` pour l'étude de la monitorabilité ainsi que la construction de la matrice de signature des fautes permettant l'analyse des défauts du système.

4.4 Création et incorporation des capsules sous SYMBOLS SHAKTI

Dans le logiciel SYMBOLS SHAKTI, les capsules représentent des sous-systèmes utilisés pour simplifier la modélisation des systèmes complexes.

Elles permettent de regrouper plusieurs composants Bond Graph dans une structure unique afin d'améliorer la lisibilité et l'organisation du modèle global.

L'utilisation des capsules facilite la décomposition d'un système complexe en plusieurs sous-modèles plus simples et plus faciles à analyser.

Ces sous-systèmes peuvent ensuite être incorporés dans le modèle principal afin de réduire la complexité graphique tout en conservant les propriétés structurelles et causales du système étudié.

Les capsules constituent ainsi un outil important dans l'environnement SYMBOLS SHAKTI pour la modélisation hiérarchique, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques complexes.

4.4.1 Caractéristiques des capsules

Le logiciel SYMBOLS SHAKTI offre plusieurs fonctionnalités liées à la création et à l'utilisation des capsules.

Ces dernières possèdent plusieurs caractéristiques permettant de faciliter la modélisation et l'organisation des systèmes complexes.

Parmi les principales caractéristiques des capsules, on peut citer :

- Une capsule peut être intégrée plusieurs fois dans un même modèle
- Une capsule peut contenir d'autres capsules afin de construire des structures hiérarchiques
- Les capsules permettent de simplifier la représentation graphique des systèmes complexes
- Les échanges d'énergie et les connexions entre les composants restent conservés dans le modèle global
- Les propriétés causales et structurelles du système peuvent être exploitées à travers les capsules utilisées

Grâce à ces caractéristiques, les capsules facilitent la construction, la réutilisation et l'analyse des modèles Bond Graph dans différentes applications industrielles.

4.4.2 Étapes de création

La création d'une capsule sous SYMBOLS SHAKTI s'effectue à partir d'un modèle Bond Graph représentant le sous-système à intégrer dans le modèle global.

Cette opération permet de regrouper plusieurs composants dans une structure unique afin de faciliter l'organisation et la réutilisation du modèle.

Les principales étapes de création d'une capsule sont les suivantes :

1. Réaliser puis compiler le modèle Bond Graph sous le module BondPad afin de vérifier l'absence d'erreurs de connexion, de direction de puissance et de causalité.

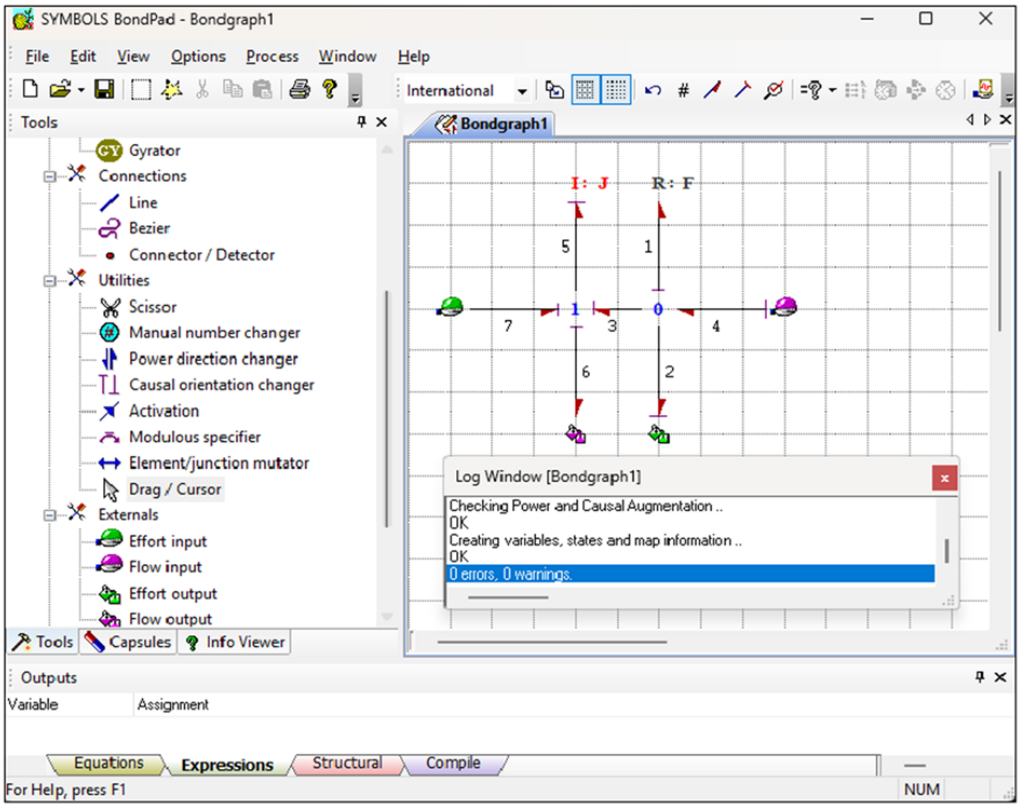


Fig. 4.8 : Modèle Bond Graph compilé sous BondPad

2. Enregistrer le modèle sous le type `Capsule File` dans le répertoire destiné aux capsules.



Fig. 4.9 : Enregistrement du modèle au format Capsule File

3. Définir le nom de la capsule et sélectionner le groupe dans lequel elle sera sauvegardée.

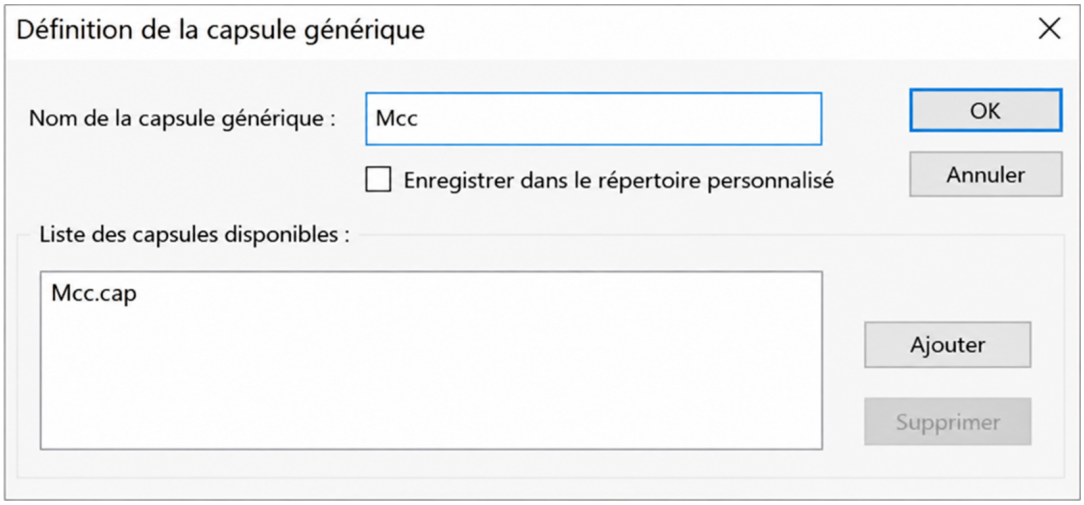


Fig. 4.10 : Définition du nom et du groupe de la capsule sous SYMBOLS SHAKTI

4. Après validation du processus de création, la capsule réalisée est automatiquement ajoutée à la bibliothèque des capsules du logiciel SYMBOLS SHAKTI.

Dans cette étude, nous avons choisi d'enregistrer la capsule dans le groupe `Mcc.cap` appartenant à la catégorie des capsules électriques.

La capsule créée apparaît ensuite sous le nom `Mcc` dans la bibliothèque des capsules du logiciel.

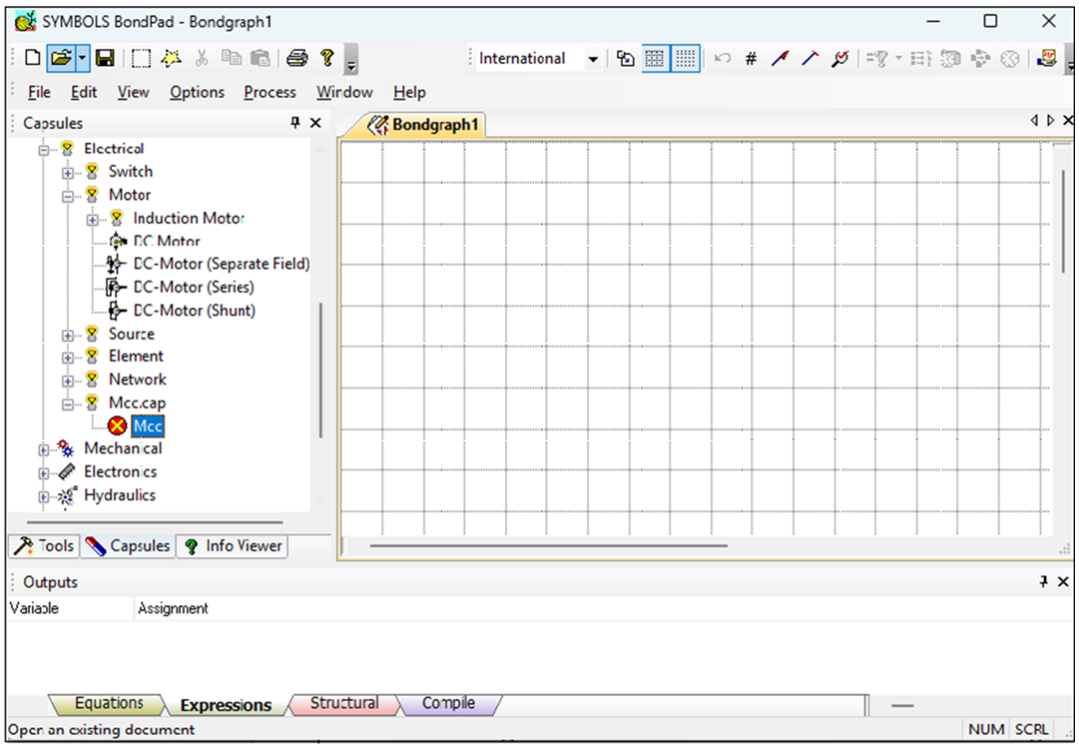


Fig. 4.11 : Capsule ajoutée à la bibliothèque des capsules sous SYMBOLS SHAKTI

Elle peut ensuite être réutilisée dans différents modèles afin de faciliter la construction hiérarchique des systèmes complexes.

Cette approche améliore l'organisation, la modularité et la réutilisation des sous-modèles dans les applications de modélisation et de simulation.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le logiciel SYMBOLS SHAKTI utilisé dans le cadre de la modélisation, de la simulation et du diagnostic des systèmes dynamiques représentés par le formalisme Bond Graph.

L'étude des différents modules du logiciel, notamment BondPad, Controls et FDIPad, a permis de mettre en évidence leurs rôles dans la construction des modèles, l'analyse causale, la simulation dynamique ainsi que les applications de surveillance et de détection des défauts.

Nous avons également décrit l'environnement de travail du logiciel ainsi que les principales fonctionnalités offertes pour la génération automatique des équations, l'analyse structurelle et l'exploitation des outils de diagnostic.

Les étapes de création et d'intégration des capsules ont aussi été présentées afin de montrer l'intérêt de la modélisation hiérarchique dans l'organisation et la réutilisation des sous-modèles complexes.

Grâce à son interface graphique et à ses outils d'analyse intégrés, SYMBOLS SHAKTI constitue une plateforme performante pour l'étude des systèmes industriels multidisciplinaires.

Les connaissances et outils présentés dans ce chapitre serviront de base pour la modélisation, la simulation et l'analyse du système étudié dans la suite de ce mémoire.

Chapitre 5



Surveillance du moteur à courant continu

5.1 Introduction

Le moteur à courant continu occupe une place importante dans les applications industrielles nécessitant une commande précise de la vitesse et du couple.

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude et la surveillance d'un moteur à courant continu à l'aide du formalisme Bond Graph et du logiciel SYMBOLS SHAKTI.

Une modélisation mathématique ainsi qu'une représentation Bond Graph du système seront développées afin de réaliser des simulations et d'analyser le comportement dynamique du moteur.

Enfin, une étude de surveillance et de diagnostic sera effectuée à travers la génération des Relations de Redondance Analytique (RRA), la construction de la matrice de signature des fautes ainsi que l'analyse des propriétés de détectabilité et d'isolabilité des défauts du système étudié [18, 30, 31].

5.2 Présentation du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu (MCC) est une machine électrique bidirectionnelle et réversible permettant la conversion d'énergie entre les domaines électrique et mécanique.

Il peut fonctionner en mode moteur, transformant l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation, ou en mode génératrice, convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le fonctionnement du MCC repose sur l'interaction entre le champ magnétique généré par les inducteurs et le courant circulant dans les conducteurs du rotor.

Ses principaux éléments sont le stator, le rotor (induit), le collecteur et les balais, qui assurent la commutation du courant.

Grâce à sa simplicité de commande et à ses bonnes performances dynamiques, le moteur à courant continu est largement utilisé dans les systèmes d'entraînement et les applications industrielles nécessitant une commande précise de la vitesse et du couple [32, 33].

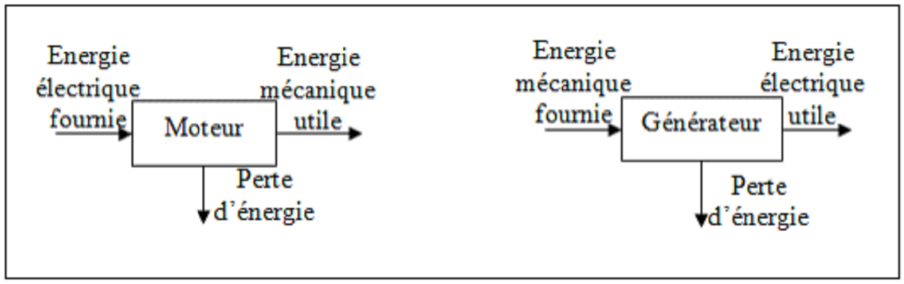


Fig. 5.1 : Fonctionnement Moteur - Générateur [34]

5.2.1 Structure

Le moteur à courant continu est constitué de deux parties essentielles : le stator représentant la partie fixe de la machine, et le rotor ou induit constituant la partie mobile.

Le stator est chargé de produire le champ magnétique nécessaire au fonctionnement du moteur grâce aux inducteurs ou aux aimants permanents.

Le rotor contient les conducteurs parcourus par le courant électrique et est monté sur un arbre assurant le mouvement de rotation.

Le moteur comporte également un collecteur associé à des balais permettant d'assurer la commutation du courant entre la partie fixe et la partie tournante.

D'autres éléments mécaniques participent au bon fonctionnement de la machine, notamment les roulements, le système de ventilation et le carter assurant respectivement le guidage, le refroidissement et la protection du moteur [32, 33].

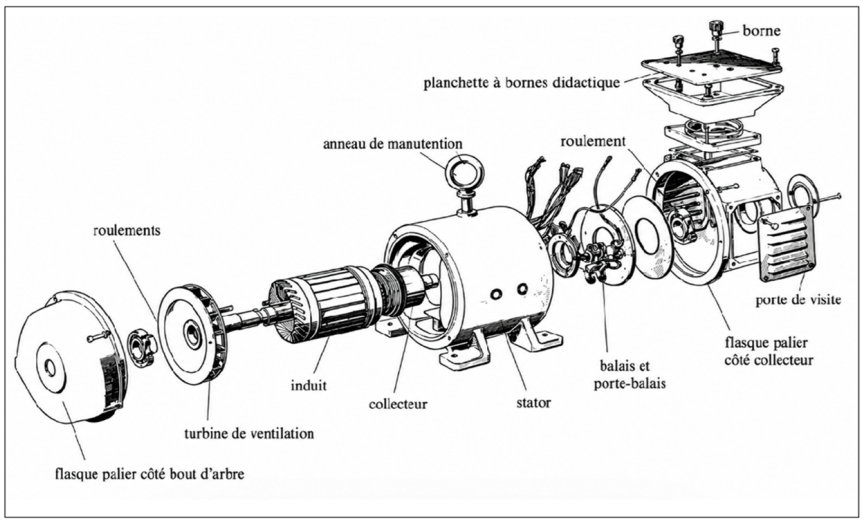


Fig. 5.2 : Structure générale d'une MCC [34]

- **Induit (Rotor) :**

L'induit, ou rotor, est la partie tournante du moteur à courant continu.

Il est constitué de conducteurs parcourus par le courant électrique et placés dans le champ magnétique créé par le stator.

L'interaction entre le courant et le champ magnétique produit le mouvement de rotation du moteur [32].

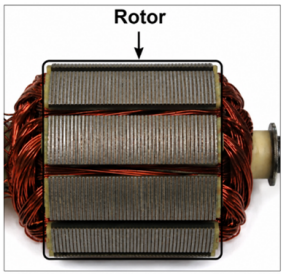


Fig. 5.3 : Rotor (induit) d'un moteur à courant continu [34]

- **Collecteur :**

Le collecteur est un élément mécanique relié au rotor du moteur à courant continu.

Il assure la commutation du courant dans les conducteurs de l'induit afin de maintenir le couple moteur dans le même sens de rotation.

Le collecteur fonctionne en contact avec les balais permettant l'alimentation électrique du rotor [34].

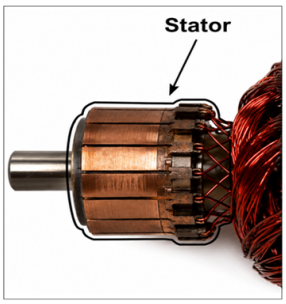


Fig. 5.4 : Collecteur d'un moteur à courant continu [34]

- **Balais :**

Les balais sont des éléments conducteurs assurant le contact électrique entre la partie fixe et le collecteur du moteur à courant continu.

Ils permettent de transmettre le courant électrique vers les conducteurs du rotor tout en maintenant la rotation de la machine [33].

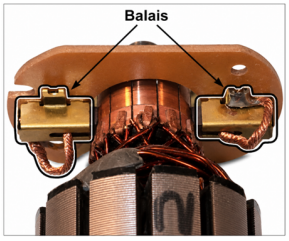


Fig. 5.5 : Système de balais du moteur à courant continu [34]

5.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du moteur à courant continu repose sur l'interaction entre le champ magnétique créé par l'inducteur et le courant circulant dans les conducteurs de l'induit.

Lorsque l'induit est alimenté en courant continu, les conducteurs placés dans le champ magnétique sont soumis à une force électromagnétique appelée force de Laplace, provoquant ainsi la rotation du rotor.

La rotation de l'induit engendre également une force électromotrice induite E, proportionnelle au flux magnétique et à la vitesse angulaire de rotation du moteur [32, 33].

Cette force électromotrice peut s'écrire sous la forme :

$$E = k\,\Phi\,\Omega$$

Où :

- E : force électromotrice induite [V] ;
- k : constante dépendant des caractéristiques du moteur ;
- Φ : flux magnétique [Wb] ;
- Ω : vitesse angulaire du rotor [rad.s^{-1}].

La puissance électromagnétique développée par le moteur est donnée par :

$$P_{em} = E \cdot I$$

Avec I le courant circulant dans l'induit.

Cette puissance peut également être exprimée en fonction du couple électromagnétique T_{em} et de la vitesse angulaire :

$$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$$

Ainsi, le couple électromagnétique du moteur s'écrit :

$$T_{em} = k\,\Phi\,I$$

Ces relations montrent que le couple développé par le moteur dépend directement du flux magnétique et du courant de l'induit [32, 33].

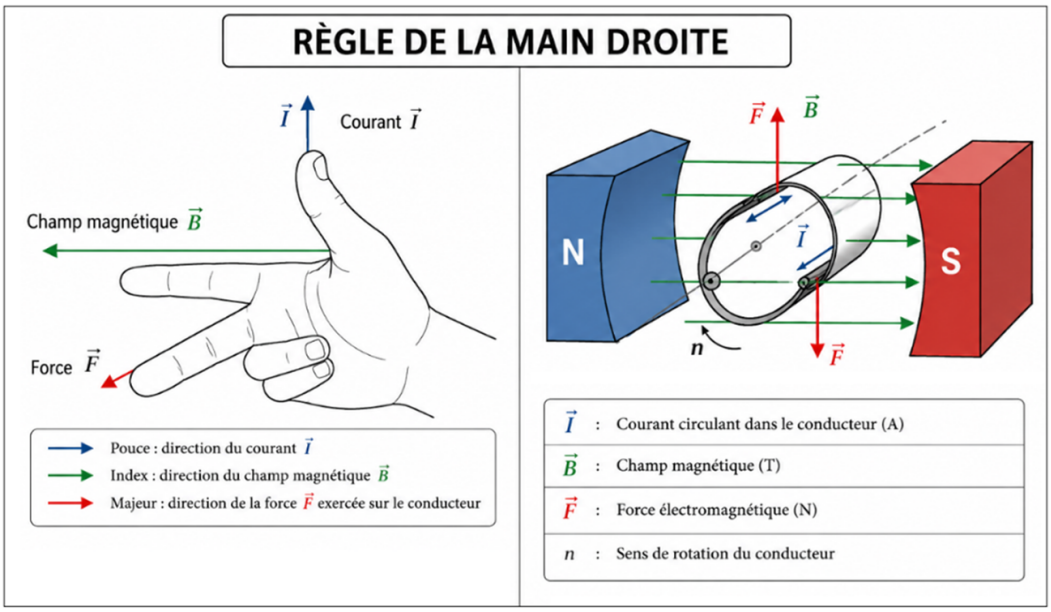


Fig. 5.6 : Principe de la règle de la main droite appliqué au moteur à courant continu [32]

La règle de la main droite permet de déterminer le sens de la force électromagnétique exercée sur un conducteur parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique.

Le pouce indique le sens du courant I, l'index représente la direction du champ magnétique B et le majeur indique le sens de la force F.

Cette règle est utilisée pour expliquer le principe de rotation du moteur à courant continu [32].

5.2.3 Bilan des puissances

Le moteur à courant continu assure la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique tout en présentant différentes pertes énergétiques.

En fonctionnement moteur, la puissance électrique absorbée par l'induit est donnée par :

$$P_{elec} = U \cdot I$$

Où U représente la tension d'alimentation et I le courant de l'induit.

La puissance mécanique développée par le moteur est exprimée par :

$$P_{meca} = C \cdot \Omega$$

Avec C le couple électromagnétique et Ω la vitesse angulaire du rotor.

Au cours du fonctionnement, une partie de l'énergie est dissipée sous forme de pertes électriques, mécaniques et magnétiques.

Le rendement du moteur peut alors être défini par le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{absorbe}}$$

Ces relations permettent d'évaluer les performances énergétiques du moteur à courant continu dans différentes conditions de fonctionnement [32, 33].

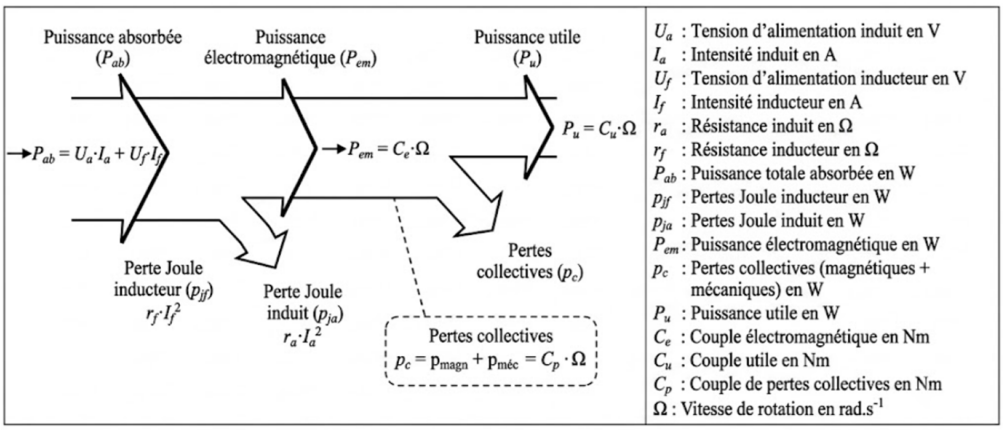


Fig. 5.7 : Bilan des puissances dans le moteur à courant continu

Cette figure présente le bilan des puissances dans un moteur à courant continu en mettant en évidence les différentes conversions d'énergie ainsi que les pertes associées au fonctionnement du système.

La puissance électrique absorbée par le moteur, exprimée par :

$$P_a = U \cdot I$$

représente l'énergie fournie par la source d'alimentation.

Une partie de cette puissance est transformée en puissance électromagnétique P_{em}, responsable de la création du couple électromagnétique permettant la rotation du rotor.

Cette puissance est donnée par :

$$P_{em} = E \cdot I = C_{em} \cdot \omega$$

Durant cette conversion, des pertes Joule apparaissent dans les enroulements de l'induit à cause de la résistance électrique.

Ces pertes sont données par :

$$P_j = r \cdot I^2$$

Le moteur subit également des pertes constantes regroupant principalement les pertes mécaniques et les pertes magnétiques.

Enfin, la puissance restante correspond à la puissance mécanique utile P_u, transmise à la charge mécanique entraînée par le moteur.

Cette analyse permet d'évaluer les performances énergétiques et le rendement global du moteur à courant continu [32].

5.3 Modes d'excitation

Le mode d'excitation d'un moteur à courant continu correspond à la manière dont le circuit inducteur est alimenté afin de produire le champ magnétique nécessaire au fonctionnement de la machine.

Selon le type de raccordement entre l'inducteur et l'induit, plusieurs modes d'excitation peuvent être distingués.

Ces configurations influencent directement les performances du moteur, notamment la vitesse, le couple et le comportement dynamique [32, 33].

5.3.1 Excitation indépendante

Dans le moteur à courant continu à excitation indépendante, l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes.

L'inducteur crée un flux magnétique pratiquement constant, tandis que l'induit reçoit une tension continue assurant la rotation du moteur.

Lorsque le moteur est alimenté, les conducteurs de l'induit placés dans le champ magnétique sont soumis à une force électromagnétique selon la loi de Laplace, produisant ainsi un couple moteur entraînant la rotation du rotor à une vitesse angulaire :

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Avec n représentant la vitesse de rotation en tr.min^{-1}.

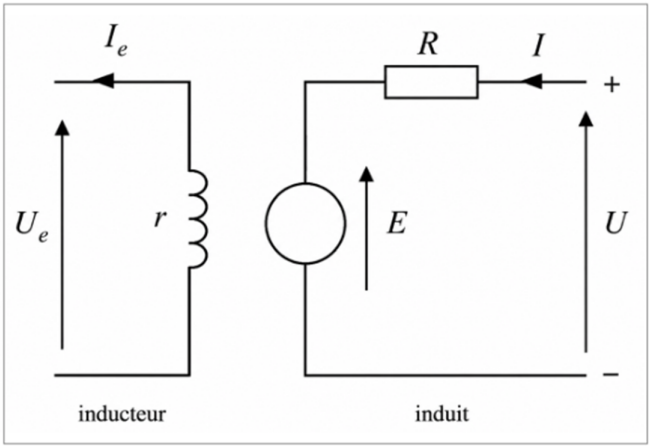


Fig. 5.8 : Schéma électrique du moteur à courant continu à excitation indépendante

Pour un flux constant, les équations caractéristiques du moteur s'écrivent :

$$U = E + RI$$

$$E = k\Phi\Omega$$

$$C_e = k\Phi I$$

Où :

- U : tension d'alimentation de l'induit ;
- E : force contre-électromotrice ;
- R : résistance de l'induit ;
- I : courant d'induit ;
- Φ : flux magnétique ;
- Ω : vitesse angulaire ;
- C_e : couple électromagnétique.

Ce mode d'excitation offre une bonne stabilité de fonctionnement ainsi qu'une commande précise de la vitesse, ce qui explique son utilisation dans les systèmes d'entraînement et les applications industrielles nécessitant de bonnes performances dynamiques [31, 32].

5.3.2 Excitation série

Dans le moteur à courant continu à excitation série, l'inducteur est monté en série avec l'induit, ce qui implique que le même courant circule dans les deux circuits :

$$I_a = I_f = I$$

Le flux magnétique dépend donc directement du courant d'alimentation.

Lorsque le courant augmente, le flux et le couple électromagnétique augmentent également, ce qui permet d'obtenir un couple de démarrage très élevé.

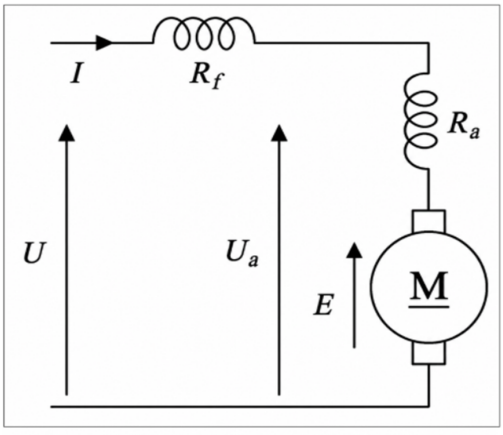


Fig. 5.9 : Schéma électrique du moteur à courant continu à excitation série

Les équations caractéristiques du moteur à excitation série sont données par :

$$U = (R_a + R_f)I + E$$

$$\Phi = M_{af} I$$

$$E = k\Phi\Omega$$

$$C_e = k\Phi I$$

Où :

- R_a : résistance de l'induit ;
- R_f : résistance de l'inducteur ;
- E : force contre-électromotrice ;
- Φ : flux magnétique ;
- Ω : vitesse angulaire ;
- C_e : couple électromagnétique.

Le moteur à excitation série présente un excellent couple au démarrage, mais sa vitesse varie fortement avec la charge et peut devenir très importante à vide.

Pour cette raison, il est principalement utilisé dans les applications nécessitant de fortes puissances de démarrage, telles que les systèmes de traction, les grues, les ascenseurs et certains équipements industriels.

5.3.3 Excitation shunt

Dans le moteur à courant continu à excitation shunt, l'inducteur est connecté en parallèle avec l'induit.

Les deux circuits sont donc soumis à la même tension d'alimentation, tandis que les courants d'induit et d'excitation restent distincts :

$$U_a = U_f = U$$

Ce mode de connexion permet de maintenir un courant d'excitation pratiquement constant, assurant ainsi un flux magnétique stable.

Le moteur présente alors une bonne stabilité de fonctionnement ainsi qu'une vitesse peu sensible aux variations de charge.

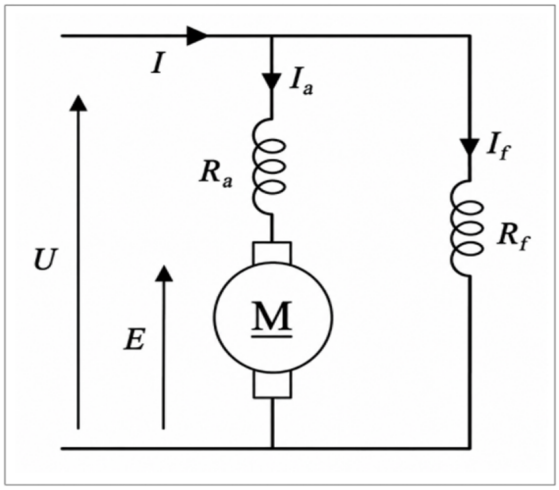


Fig. 5.10 : Schéma électrique du moteur à courant continu à excitation shunt

Les équations caractéristiques du moteur à excitation shunt s'écrivent :

$$U = R_a I_a + E$$

$$U = R_f I_f$$

$$\Phi = M_{af} I_f$$

$$E = k\Phi\Omega$$

$$C_e = k\Phi I_a$$

Où :

- R_a : résistance de l'induit ;
- R_f : résistance de l'inducteur ;
- I_a : courant d'induit ;
- I_f : courant d'excitation ;
- E : force contre-électromotrice ;
- Φ : flux magnétique ;
- Ω : vitesse angulaire ;
- C_e : couple électromagnétique.

Grâce à sa bonne régulation de vitesse et à son fonctionnement stable, le moteur à excitation shunt est largement utilisé dans les applications industrielles nécessitant une vitesse pratiquement constante, telles que les ventilateurs, les machines-outils et les systèmes d'entraînement électriques [32, 33].

5.4 Simulation par la méthode Bond Graph

La simulation du moteur à courant continu a été réalisée sous le logiciel Symbols Shakti en utilisant la méthode Bond Graph.

Cette simulation permet d'étudier le comportement dynamique du moteur ainsi que l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques telles que le courant, la vitesse et le couple.

Les résultats obtenus serviront ensuite à l'analyse et à la surveillance du système.

5.4.1 Excitation indépendante

Le modèle Bond Graph représentant le moteur à courant continu à excitation indépendante a été réalisé sous le logiciel Symbols Shakti à l'aide du module BondPad.

Le modèle obtenu est constitué de deux parties : la partie électrique et la partie mécanique.

Partie électrique :

Pour l'induit, la source d'effort U, la résistance R_a et le courant d'induit I_a sont reliées à une jonction « 1 ».

Pour l'inducteur, la source d'effort U_e, la résistance R_e et le courant d'excitation I_e sont également connectées à une jonction « 1 ».

Partie mécanique :

La partie mécanique comprend le coefficient de frottement F, l'inertie J ainsi que le couple résistant T_r, reliés à une jonction « 1 ».

Le gyrateur GY assure le couplage électromécanique et représente la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

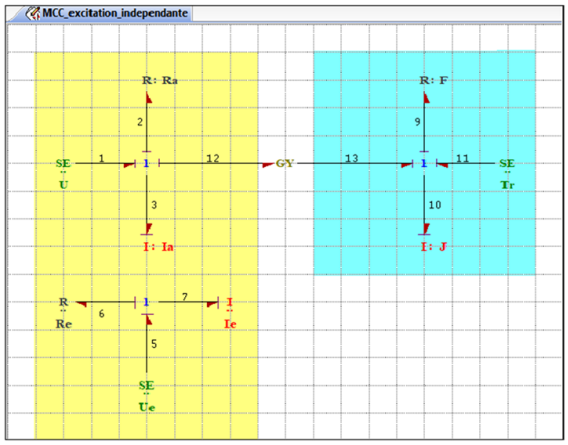
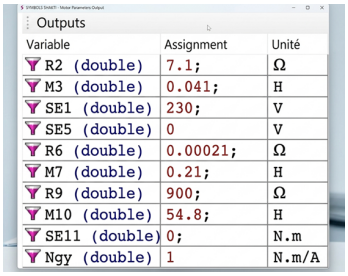


Fig. 5.11 : Modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation indépendante

Pour la simulation de ce modèle sous Symbols Shakti, les paramètres du moteur utilisés sont présentés dans le tableau des paramètres correspondant.



Outputs

Variable	Assignment	Unité
R2 (double)	7.1;	Ω
M3 (double)	0.041;	H
SE1 (double)	230;	V
SE5 (double)	0	V
R6 (double)	0.00021;	Ω
M7 (double)	0.21;	H
R9 (double)	900;	Ω
M10 (double)	54.8;	H
SE11 (double)	0;	N.m
Ngy (double)	1	N.m/A

Fig. 5.12 : Paramètres du moteur à excitation indépendante

La figure 5.12 rassemble les paramètres physiques introduits sous Symbols Shakti pour configurer le modèle Bond Graph du moteur à excitation indépendante :

- **Circuit d'induit et d'inducteur :** La variable SE1 fixe la tension d'alimentation de l'induit à 230 V. Les couples de variables (R2, M3) et (R6, M7) représentent respectivement les résistances et inductances internes de l'induit (R_a, I_a) et de l'inducteur (R_e, I_e).
- **Couplage et fonctionnement à vide :** Le paramètre Ngy (fixé à 1) détermine le gain du gyrateur (GY) assurant le couplage électromécanique. Enfin, la valeur nulle de la source d'effort mécanique SE11 (0 N.m) confirme de manière rigoureuse que la simulation est effectuée en régime de fonctionnement à vide, ce qui valide la cohérence des courbes temporelles présentées ensuite.

Une simulation du modèle a été effectuée sous Bond Simulator de Symbols Shakti afin d'étudier le comportement des grandeurs électriques et mécaniques du moteur dans différents régimes de fonctionnement.

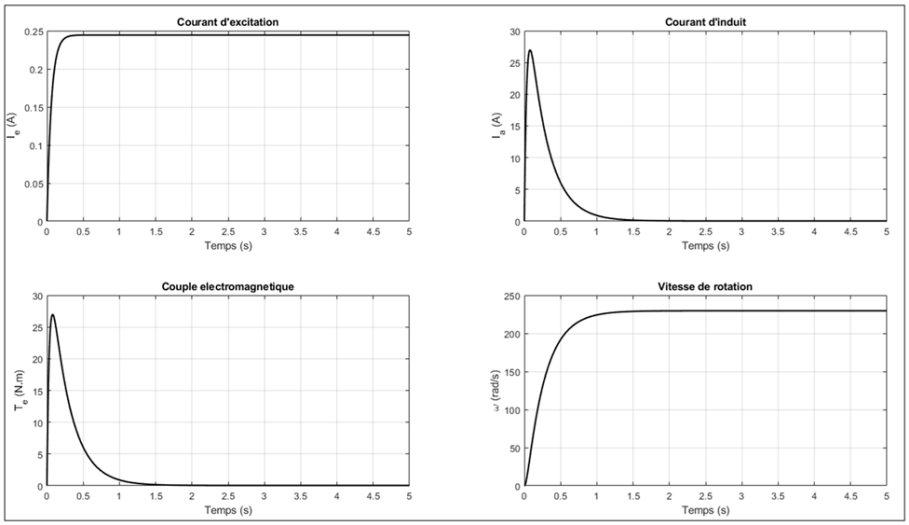


Fig. 5.13 : Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation indépendante (à vide)

Les résultats obtenus pour le fonctionnement à vide ($T_r = 0$) montrent que le courant d'excitation I_e se stabilise rapidement.
Le courant d'induit I_a et le couple électromagnétique T_e présentent un pic au démarrage avant de diminuer progressivement.
La vitesse de rotation ω augmente jusqu'à atteindre une valeur stable correspondant au régime permanent.
Pour le fonctionnement en charge, on modifie uniquement le couple résistant en prenant :

$$T_r = 10\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

Dans le tableau des paramètres, cela correspond à la modification de la valeur :

$$SE11 = 10\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

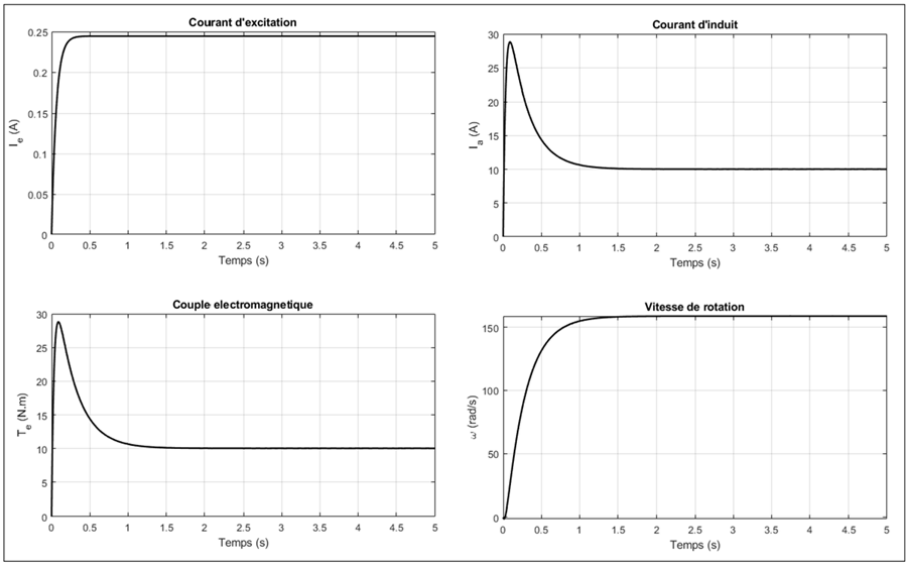


Fig. 5.14 : Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation indépendante (en charge)

Les résultats obtenus en charge ($T_r \neq 0$) montrent une augmentation du courant d'induit I_a ainsi que du couple électromagnétique T_e afin de compenser la charge appliquée au moteur.

La vitesse de rotation ω se stabilise à une valeur légèrement inférieure à celle obtenue dans le fonctionnement à vide.

5.4.2 Excitation série

Le modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série a été réalisé sous le logiciel Symbols Shakti en utilisant l'outil BondPad.

Le modèle développé comporte deux sous-ensembles principaux : une partie électrique et une partie mécanique, reliées par un gyrateur assurant la conversion électromécanique.

Partie électrique :

Dans le cas du moteur à excitation série, l'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension U.

La résistance de l'induit R_a ainsi que le courant de l'induit I_a sont connectées à une jonction de type « 1 ».

De la même manière, la résistance d'excitation R_e et le courant d'excitation I_e sont également associées à cette structure afin de représenter le comportement électrique global du moteur.

Partie mécanique :

La partie mécanique du modèle est composée de :

- Coefficient de frottement visqueux f ;
- Moment d'inertie J ;
- Couple résistant T_r.

Ces éléments sont reliés à une jonction « 1 » représentant la dynamique mécanique du système.

Le gyrateur GY assure le couplage entre les domaines électrique et mécanique en traduisant l'énergie électrique fournie par la source en énergie mécanique de rotation.

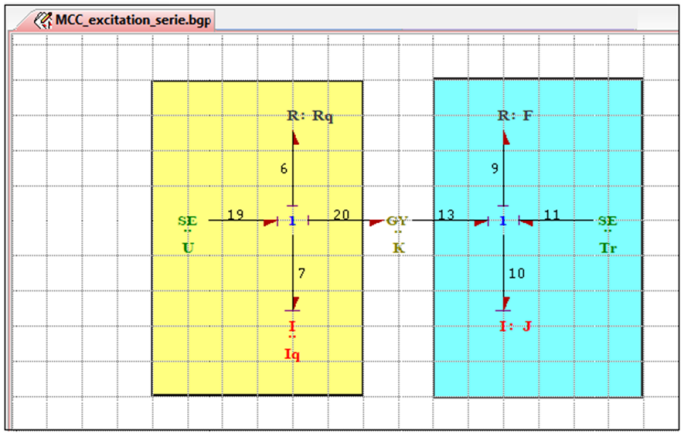


Fig. 5.15 : Modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série

La simulation du modèle Bond Graph sous Symbols Shakti a été effectuée à l'aide du module Simulator en utilisant les paramètres du moteur présentés dans le tableau correspondant.

Capsules | Tools | Info Viewer

Outputs

Variable	Assignment	Unités
R6 (double)	7.918;	Ω (Ohm)
M7 (double)	0.2848;	H (Henry)
R9 (double)	0.00019;	Ω (Ohm)
M10 (double)	0.0398;	H (Henry)
SE11 (double)	0;	N.m
SE19 (double)	220;	V (Volt)
K (double)	1;	(sans unité, sans dimension)

Fig. 5.16 : Paramètres du moteur à excitation série

La figure 5.16 regroupe les paramètres physiques et numériques introduits sous le logiciel Symbols Shakti (module Bond-Pad) pour configurer le modèle Bond Graph du moteur à excitation série :

- **Circuit électrique (Induit et Inducteur en série) :** La variable SE19 fixe la tension d'alimentation globale du moteur à 220 V. Contrairement au moteur à excitation indépendante, les propriétés électriques de l'induit et de l'inducteur forment ici un seul bloc dynamique, représenté par les couples de résistance et d'inductance associées (R6, M7) et (R9, M10).
- **Couplage et fonctionnement à vide :** Le paramètre K (fixé à 1) détermine le gain du gyrateur modulant (M_GY ou GY), indispensable pour assurer le couplage électromécanique proportionnel au courant. Enfin, la valeur nulle attribuée à la source d'effort mécanique $SE11 = 0\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$ démontre rigoureusement que la simulation est menée en régime de fonctionnement à vide.

Une simulation du modèle Bond Graph du moteur à excitation série a été réalisée à l'aide du module Bond Simulator du logiciel Symbols Shakti afin d'analyser l'évolution des différentes grandeurs électriques et mécaniques du moteur dans les divers modes de fonctionnement.

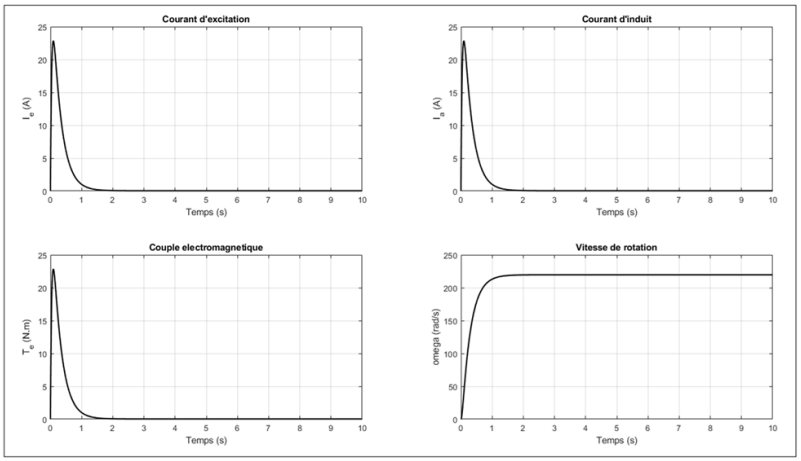


Fig. 5.17 : Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série (à vide)

Les résultats obtenus montrent que le courant d'excitation I_e ainsi que le courant d'induit I_a présentent une valeur élevée au démarrage, puis diminuent progressivement jusqu'à se stabiliser en régime permanent.

Le couple électromagnétique T_e suit la même évolution, avec un pic important au démarrage permettant d'assurer l'accélération du moteur.

La vitesse de rotation ω augmente rapidement puis atteint une valeur stable élevée, ce qui traduit le fonctionnement du moteur en absence de charge mécanique ($T_r = 0$).

Pour le fonctionnement en charge, on modifie uniquement le couple résistant en prenant :

$$T_r = 10\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

Dans le tableau des paramètres, cela correspond à la modification de la valeur :

$$SE11 = 10\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

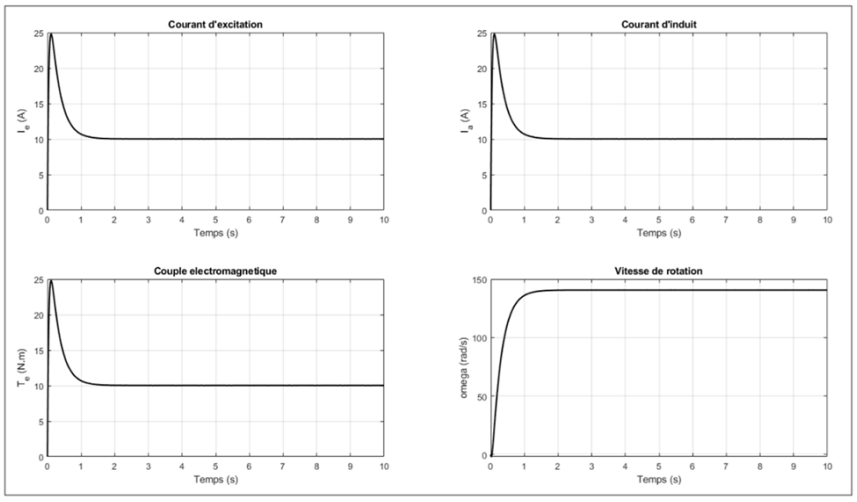


Fig. 5.18 : Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation série (en charge)

Dans le cas du fonctionnement en charge, les courants I_e et I_a se stabilisent à des valeurs plus importantes afin de fournir le couple nécessaire pour entraîner la charge appliquée au moteur.

Le couple électromagnétique T_e reste également plus élevé par rapport au fonctionnement à vide, ce qui permet de compenser le couple résistant appliqué.

Par ailleurs, la vitesse de rotation ω atteint une valeur permanente plus faible que dans le cas à vide, en raison de l'influence de la charge mécanique sur le moteur.

5.4.3 Excitation shunt

Le modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt a été réalisé sous le logiciel Symbols Shakti en utilisant l'outil BondPad.

Le modèle développé comprend deux parties principales : une partie électrique et une partie mécanique, reliées par un gyrateur assurant la conversion électromécanique.

Partie électrique :

Dans le cas du moteur à excitation shunt, l'induit et l'inducteur sont alimentés en parallèle par la même source de tension U.

Pour l'induit :

La résistance R_a et le courant d'induit I_a sont connectées à une jonction de type « 1 ».

Pour l'inducteur :

La résistance R_e ainsi que le courant d'excitation I_e sont également reliées à une jonction « 1 ». Les deux branches électriques sont alimentées par la même source d'effort, représentant ainsi le fonctionnement du moteur à excitation dérivation.

Partie mécanique :

La partie mécanique du modèle est constituée de :

- Coefficient de frottement visqueux f ;
- Moment d'inertie J ;
- Couple résistant T_r.

Ces éléments sont connectés à une jonction « 1 » représentant la dynamique mécanique du système.

Le gyrateur GY assure le couplage entre les parties électrique et mécanique en traduisant la conversion de l'énergie électrique fournie par la source en énergie mécanique de rotation.

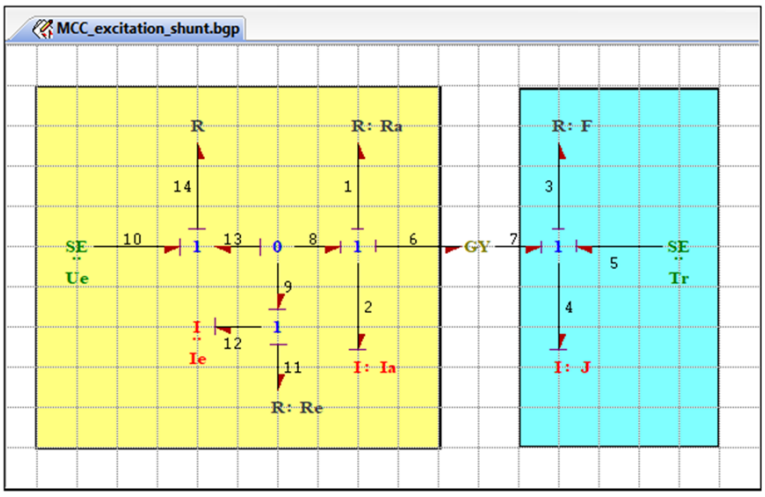


Fig. 5.19 : Modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt

Outputs

Variable	Assignment	Unités
SE5 (double)	0	N.m
R1 (double)	6.76;	Ω
M2 (double)	0.198;	H
SE10 (double)	220;	V
R11 (double)	900;	Ω
M12 (double)	54.8;	H
R3 (double)	0.00021;	Ω
M4 (double)	0.041;	H
r (double)	1	(sans unité)
R14 (double)	0	Ω

Fig. 5.20 : Paramètres du moteur à excitation shunt

La figure 5.20 représente la liste des variables et les valeurs numériques assignées sous Symbols Shakti (module Bond-Pad) pour paramétrer la simulation du moteur à excitation shunt (dérivation) :

- **Circuit électrique (Induit et Inducteur en parallèle) :** La variable SE10 définit la tension d'alimentation commune appliquée aux deux branches en parallèle, fixée ici à 220 V. La configuration en dérivation est caractérisée par la répartition des éléments résistifs et inductifs : le couple (R1, M2) modélise la résistance et le courant d'induit (R_a, I_a), tandis que les paires (R11, M12) et (R3, M4) définissent les propriétés du circuit d'excitation shunt (R_e, I_e).
- **Couplage et fonctionnement à vide :** Le paramètre r (fixé à 1) correspond au gain du gyrateur (GY), matérialisant la constante de couplage électromécanique de la machine. De même que pour les configurations précédentes, la source d'effort mécanique $SE5 = 0\,\text{N.m}$ (liée au couple résistant) indique que l'essai dynamique est réalisé en régime de fonctionnement à vide.

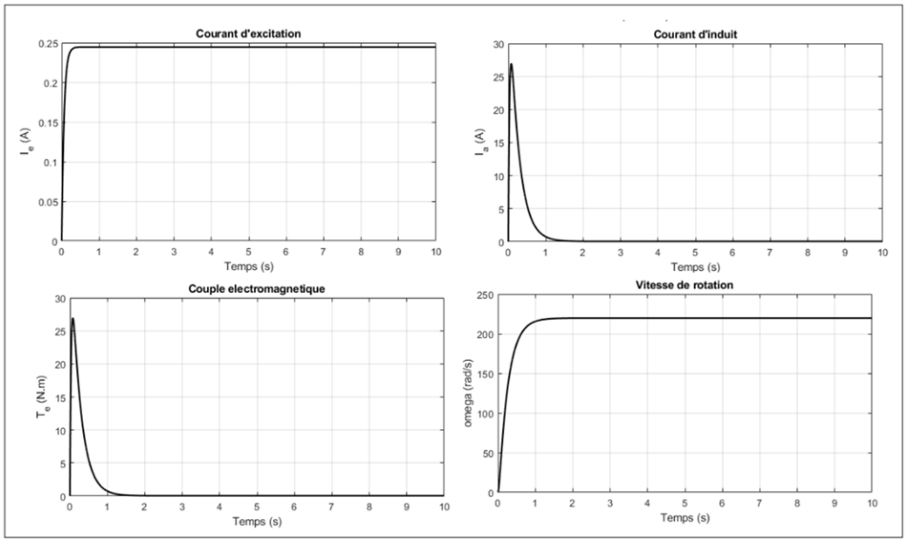


Fig. 5.21 : Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt (à vide)

Les résultats de simulation obtenus dans le cas du fonctionnement à vide ($T_r = 0$) montrent que le courant d'excitation I_e augmente rapidement puis se stabilise à une valeur constante correspondant au régime permanent.

Le courant d'induit I_a présente un courant de démarrage élevé avant de décroître progressivement lorsque le moteur atteint sa vitesse nominale.

Le couple électromagnétique T_e suit une évolution similaire au courant d'induit, avec une valeur importante au démarrage afin d'assurer l'accélération du moteur, puis une diminution progressive en régime établi.

Par ailleurs, la vitesse de rotation ω augmente rapidement jusqu'à atteindre une valeur stable élevée, traduisant le fonctionnement du moteur en absence de charge mécanique.

Pour le fonctionnement en charge, on modifie uniquement le couple résistant en prenant :

$$T_r = 10\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

Dans le tableau des paramètres, cela correspond à la modification de la valeur :

$$SE5 = 10N.m$$

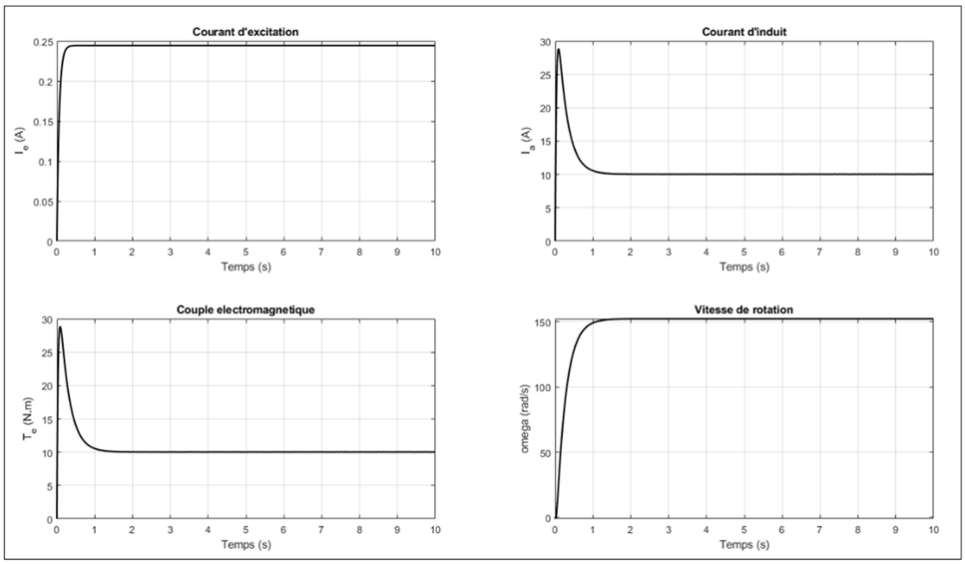


Fig. 5.22 : Simulation du modèle Bond Graph du moteur à courant continu à excitation shunt (en charge)

Dans le cas du fonctionnement en charge ($T_r \neq 0$), les résultats de simulation montrent que le courant d'excitation I_e reste pratiquement constant puisqu'il dépend principalement du circuit d'excitation.

Le courant d'induit I_a se stabilise à une valeur plus élevée afin de fournir le couple nécessaire pour compenser la charge appliquée au moteur.

Le couple électromagnétique T_e atteint également une valeur permanente plus importante comparativement au fonctionnement à vide, traduisant l'effort mécanique supplémentaire demandé au moteur.

Par ailleurs, la vitesse de rotation ω augmente progressivement puis se stabilise à une valeur inférieure à celle obtenue dans le cas à vide, en raison de l'influence du couple résistant appliqué sur l'arbre du moteur.

5.5 Surveillance et analyse temporelle du moteur à courant continu

La surveillance du moteur à courant continu est réalisée grâce à l'approche Bond Graph, qui offre une représentation claire et structurée du comportement dynamique du système.

Cette démarche facilite l'établissement des relations de redondance analytique (RRA), indispensables à la génération des résidus nécessaires à la détection des défauts.

L'utilisation de cette méthode permet également d'élaborer les matrices de signatures, outils essentiels pour identifier et analyser les défaillances susceptibles d'affecter le fonctionnement du moteur.

La stratégie de surveillance repose donc sur l'exploitation des résidus issus des variables mesurées et estimées à partir du modèle.

Pour garantir un diagnostic fiable et performant, une attention particulière doit être accordée au choix et au positionnement des capteurs au sein du système.

Un agencement optimal des capteurs améliore la précision des mesures, tout en facilitant la détection et l'isolation des défauts survenant aussi bien dans les parties électriques que mécaniques du moteur.

5.5.1 Excitation série

5.5.1.1 Génération automatique des RRAs

La génération automatique des Relations de Redondance Analytique (RRA) constitue une étape importante dans la surveillance du moteur à courant continu.

Dans cette étude, les RRAs sont obtenues à partir du modèle Bond Graph du moteur à excitation série à l'aide de l'outil FDIPad de SYMBOLS Shakti.

Cet outil permet de construire le modèle de surveillance sous forme de capsules interconnectées afin de générer automatiquement les relations utilisées pour la détection des défauts.

Le principe repose sur la comparaison entre les signaux mesurés sur le système et les valeurs estimées par le modèle mathématique.

En fonctionnement normal, les écarts restent faibles et les résidus sont proches de zéro.

En revanche, la présence d'un défaut provoque une variation significative des résidus, indiquant ainsi une anomalie dans le système.

L'expression générale d'un résidu est donnée par :

$$r(t) = y_{mes}(t) - y_{est}(t)$$

Avec :

- $y_{mes}(t)$: grandeur mesurée ;
- $y_{est}(t)$: grandeur estimée par le modèle ;
- $r(t)$: résidu généré.

Réalisation des capsules :

Le modèle du moteur à excitation série est décomposé en plusieurs capsules représentant les parties électriques et mécaniques afin de faciliter la génération automatique des RRAs.

Ces capsules sont interconnectées sous FDIPAD pour construire le modèle Bond Graph global, tandis que les liens numérotés permettent de définir les connexions entre les différents composants du système.

Partie électrique

La particularité de l'excitation série se reflète dans la mise en ligne directe des composants électriques :

- **Alimentation :** Modélisée par une source d'effort (SE) qui fournit la tension globale d'alimentation U au circuit.
- **Capsule de l'induit :** Les paramètres de l'induit, à savoir la résistance R_a et le courant d'induit I_a, sont associés à une jonction « 1 », signifiant qu'ils partagent le même flux (courant). Ce bloc reçoit l'énergie de l'alimentation en entrée et transmet directement la puissance en série vers l'inducteur. Une sortie de flux est prévue vers les capteurs de mesure (blocs Df).
- **Capsule de l'inducteur :** Placé en cascade à la suite de l'induit, ce sous-système est également structuré autour d'une jonction « 1 » regroupant sa résistance R_e et son courant d'excitation I_e. Il est traversé par le même flux que l'induit et achemine la puissance électrique vers le module de conversion.

Couplage électromécanique

- **Gyrateur (GYe) :** Placé à la suite du circuit électrique, cet élément assure la transition fondamentale entre les domaines. Il reçoit la puissance électrique (issue de l'ensemble série induit-inducteur) et la convertit en puissance mécanique (couple et vitesse angulaire) pour l'étage suivant.

Partie mécanique

La structure de la dynamique mécanique (bloc EC) permet de modéliser le comportement physique du rotor et de sa charge :

- Le phénomène de frottement visqueux f est rattaché à une jonction « 0 ».
- L'inertie du rotor j est portée par une jonction « 1 », garantissant le partage d'une vitesse angulaire commune pour l'arbre moteur.
- La charge, modélisée comme une source d'effort externe (SE) imposant le couple résistant T_r, est intégrée à cet ensemble mécanique. L'ensemble délivre enfin des signaux vers les détecteurs (De et Df) pour la mesure de l'effort (couple) et du flux (vitesse).

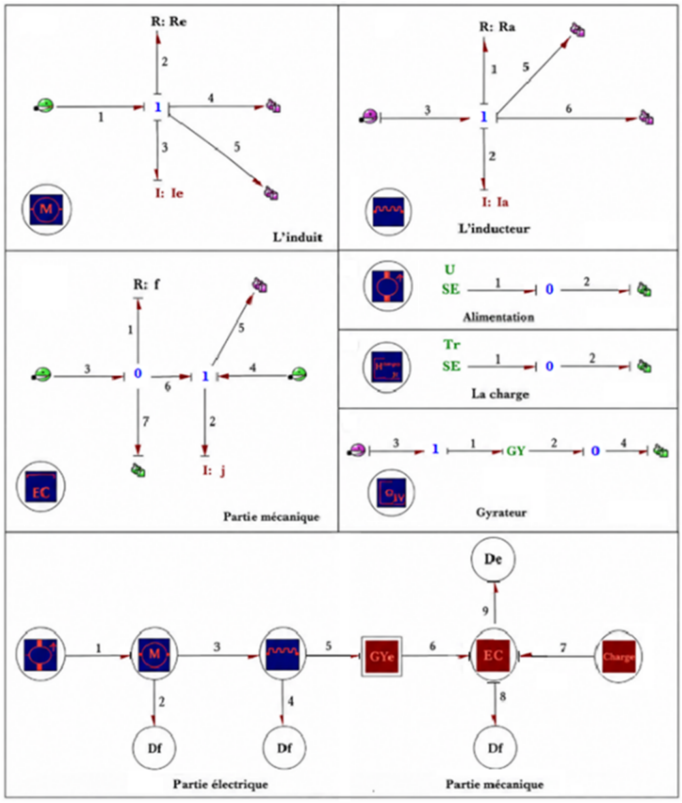


Fig. 5.23 : Modèle architectural et réalisation des capsules du MCC à excitation série

Chaque composant du modèle architectural peut être défini et relié aux autres éléments du système à l'aide d'une boîte de dialogue dédiée permettant de spécifier les différentes connexions.

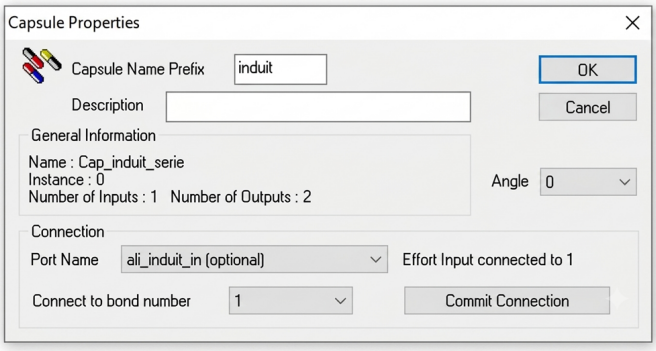


Fig. 5.24 : Propriétés de la capsule de l'induit sous FDIPad

Les connexions des capsules sont définies en précisant les ports et les numéros des liens associés, puis validées à l'aide de l'option *Commit Connection*.

Cette procédure est appliquée à l'ensemble des composants du modèle afin de générer les relations symboliques nécessaires à la surveillance sous l'environnement FDIPAD.

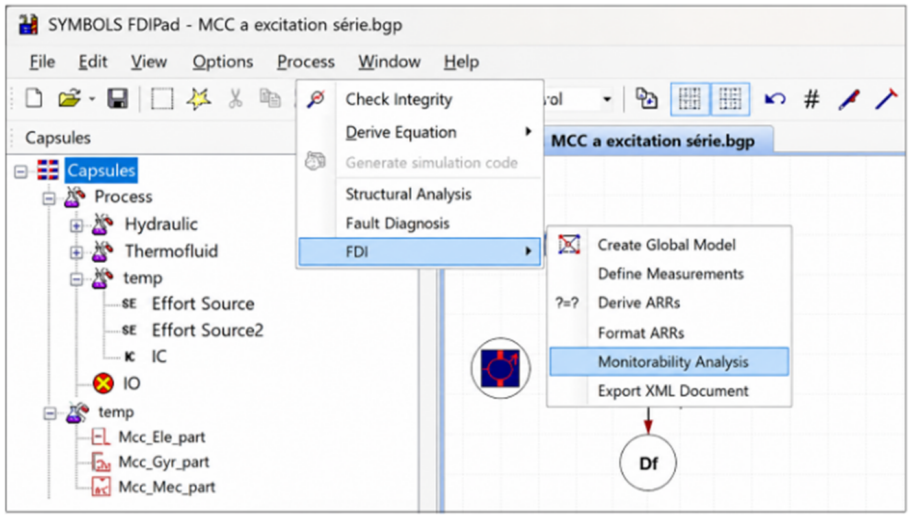


Fig. 5.25 : Analyse de surveillabilité du moteur à excitation série sous FDIPad

Après la création des différentes capsules, la commande *Create Global Model* est utilisée afin de construire le modèle Bond Graph global du moteur et d'assurer l'interconnexion des différentes parties du système.

Cette étape permet également la génération automatique des noms des variables associées au modèle.

Ensuite, la commande *Define Measurements* est employée pour modifier et attribuer des noms symboliques aux variables mesurées qui seront exploitées dans les équations des Relations de Redondance Analytique (RRA).

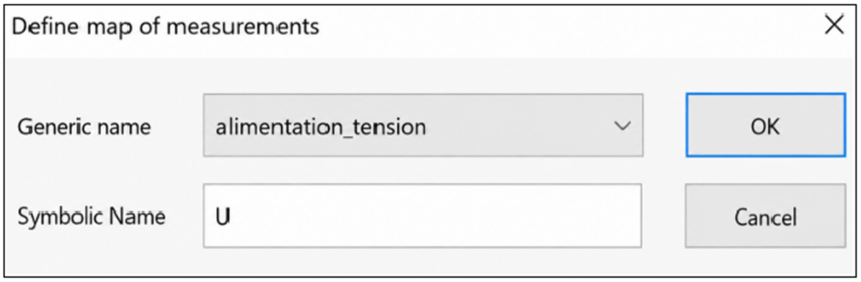


Fig. 5.26 : Menu de FDIPad

Nom automatique	**Variable utilisée**
alimentation_tension	U
Load_tension	T_r
Df_3_measurement	I_a
Df_2_measurement	I_e
Df_1_measurement	ω_r
De_1_measurement	C_e

Tab. 5.1 : Liste des variables associées au moteur en excitation série

La commande *Derive RRAs* est ensuite utilisée pour générer automatiquement les Relations de Redondance Analytique (RRA) à partir du modèle Bond Graph réalisé sous le logiciel.

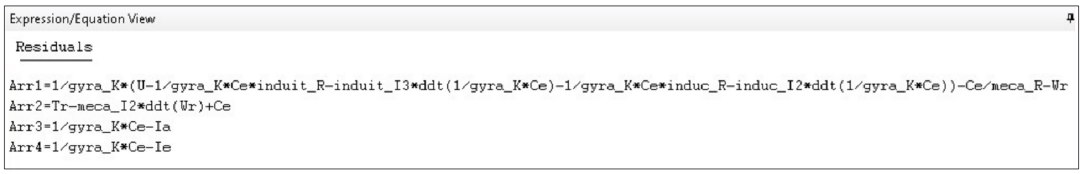


Fig. 5.27 : RRAs générées du moteur à excitation série

La figure 5.27 présente les quatre Relations de Redondance Analytique générées automatiquement par FDIPad à partir du modèle Bond Graph du moteur à excitation série. Chaque RRA produit un résidu dont la déviation par rapport à zéro signale une anomalie dans un sous-système précis du moteur.

- **Arr1 :** traduit l'équilibre électrique global en reliant la tension d'alimentation, les courants, les paramètres des deux circuits électriques et le couple électromagnétique. Elle est sensible aux dégradations des résistances et inductances d'induit et d'inducteur.

- **Arr2 :** surveille l'équilibre mécanique en reliant le couple résistant, l'inertie J et le frottement visqueux. Insensible aux défauts électriques, elle ne réagit qu'aux anomalies mécaniques permettant ainsi de discriminer les deux types de défauts.
- **Arr3 :** vérifie la cohérence entre le couple électromagnétique C_e et le courant d'induit I_a via la constante de couplage $gyra\_K$. Toute rupture de la relation $C_e = gyra\_K \cdot I_a$ révèle une dégradation du couplage électromécanique.
- **Arr4 :** établit la même cohérence entre C_e et le courant d'excitation I_e, ciblant spécifiquement le circuit inducteur et garantissant son isolabilité vis-à-vis du circuit d'induit.

5.5.1.2 Analyse de détectabilité et d'isolabilité

La surveillabilité du moteur, notamment la détectabilité et l'isolabilité des défauts, peut être évaluée à partir des RRAs générées automatiquement.

Avant de lancer cette analyse, il est nécessaire de sélectionner uniquement les composants concernés par la surveillance et d'exclure les éléments qui ne font pas partie des conditions d'étude ou des exigences du système.

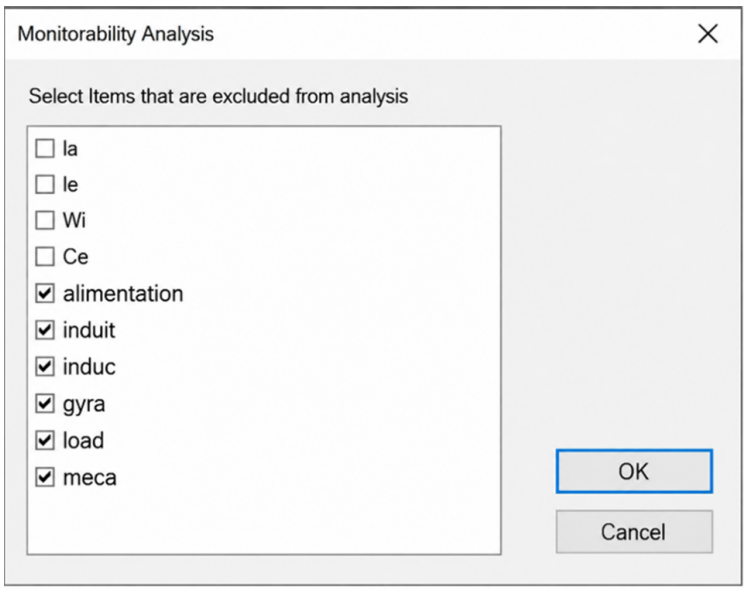
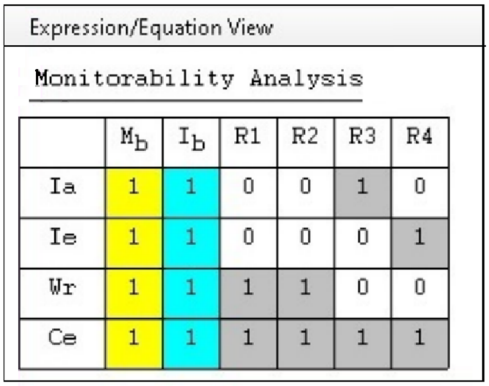


Fig. 5.28 : Fenêtre d'analyse de surveillabilité sous FDIPad

Les différentes variables de mesure, les sources ainsi que les capsules du modèle sont affichées dans la fenêtre d'analyse.

Certains éléments, tels que l'alimentation, la charge, l'induit, l'inducteur et le gyrateur, sont exclus de l'étude en considérant qu'ils ne présentent pas de défauts.

L'analyse de surveillabilité est principalement réalisée sur les variables liées au courant d'induit, au courant d'excitation, à la vitesse de rotation et au couple moteur.


Expression/Equation View

Monitorability Analysis

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

Fig. 5.29 : Matrice de surveillabilité du moteur à excitation série sous FDIPad

La figure 5.29 présente la matrice de surveillabilité du moteur à courant continu à excitation série, calculée automatiquement par le module FDIPad. Elle synthétise, pour chaque variable mesurée du système, sa capacité à être détectée (Mb) et isolée (Ib) en cas de défaut, à travers les quatre résidus R1, R2, R3 et R4 issus des RRA.

- **Le courant d'induit** I_a est détectable et isolable (Mb = Ib = 1). Il est sensible uniquement au résidu R3, ce qui signifie que tout défaut affectant le circuit d'induit notamment une variation de R_a ou I_a est capté exclusivement par cette relation de cohérence électromécanique, garantissant une isolation sans ambiguïté.

- **Le courant d'excitation** I_e est également détectable et isolable (Mb = Ib = 1), avec une sensibilité exclusive au résidu R4. Cette sélectivité confirme l'isolabilité des défauts du circuit inducteur vis-à-vis de tous les autres sous-systèmes résultat directement lié au bon placement du capteur de courant d'excitation.

- **La vitesse de rotation** ω_r est détectable et isolable (Mb = Ib = 1), activant les résidus R1 et R2. Cette double activation est cohérente avec la nature de la vitesse : grandeur mécanique influencée à la fois par la dynamique mécanique (Arr2) et par le couplage électromécanique global (Arr1). La combinaison R1 · R2 constitue sa signature unique et non partagée.

- **Le couple électromagnétique** C_e est détectable et isolable (Mb = Ib = 1), avec la signature la plus riche du système : il active les quatre résidus R1, R2, R3 et R4 simultanément. Ce résultat s'explique par le rôle central du couple dans le Bond Graph variable de couplage entre les domaines électrique et mécanique, il apparaît dans toutes les équations causales du modèle. Cette sensibilité maximale en fait le meilleur indicateur global de l'état de santé du moteur.

5.5.2 Excitation shunt et séparée

D'après les simulations des deux modes d'excitation ayant abouti à des résultats identiques, nous avons choisi de limiter notre étude au modèle du moteur à excitation shunt afin d'éviter toute redondance.

5.5.2.1 Génération automatique des RRAs

Réalisation des capsules

Partie électrique

- **Alimentation :** Cette sous-capsule modélise l'alimentation électrique du moteur à courant continu à excitation parallèle. La source d'effort représente la tension d'alimentation, tandis que la jonction 0 assure l'égalité des tensions dans les circuits d'induit et d'inducteur. Le détecteur d'effort mesure cette tension et fournit les RRAs.

- **Induit :** La capsule « Induit » contient une jonction 1 qui relie en série la résistance d'induit (R_2 : R_a) et l'inductance (I_3 : L_a). Un détecteur de flux (D_{f11}) est placé de manière appropriée pour mesurer la variable d'état correspondante, c'est-à-dire le courant d'induit (I_a).

- **Inducteur :** il utilise une jonction 1 pour connecter en série la résistance d'excitation (R_5 : R_e) et l'inductance (I_6 : L_e), associées au détecteur de flux (D_{f12}) qui mesure le courant d'excitation (I_e). Elle intègre également une jonction 0 liée au système de détection virtuelle, permettant de surveiller l'effort (tension).

Partie mécanique

- Le couplage électromécanique est assuré par le gyrateur modulé MGY_4.

- La partie mécanique comprend le frottement visqueux, l'inertie du rotor et le couple résistant, reliés par une jonction 1.

- La vitesse de rotation (ω) est mesurée par le détecteur de flux D_{f14}.

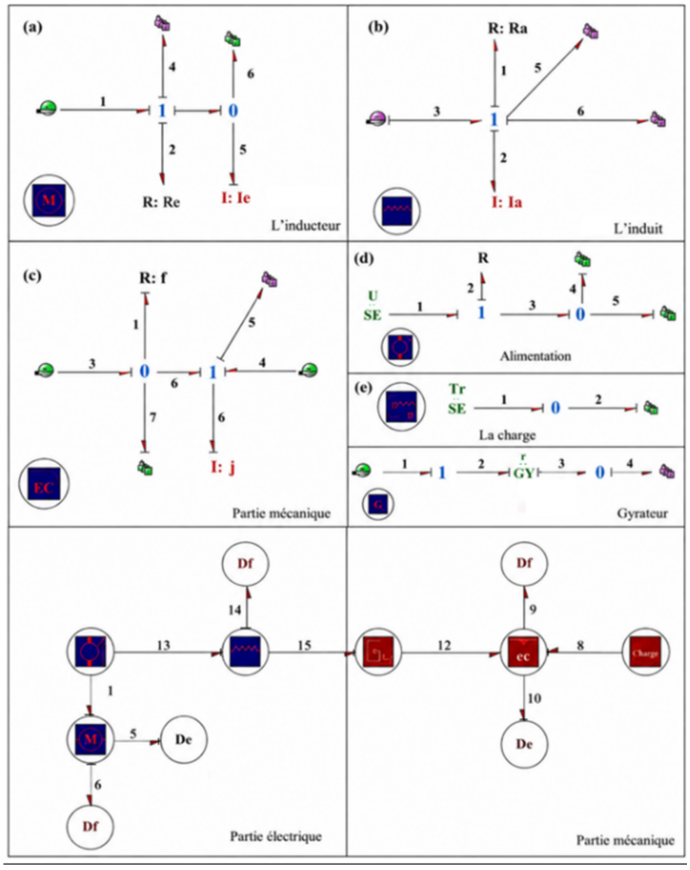


Fig. 5.30 : Modèle architectural et réalisation des capsules du MCC à excitation shunt avec des détecteurs virtuels

Le paramétrage et l'interconnexion de chaque élément du modèle architectural s'effectuent par le biais de boîtes de dialogue spécifiques. En appliquant une démarche strictement identique à celle de l'étude d'excitation précédente, les RRA (Relations de Redondance Analytique) sont ainsi générées.

```
Residuals

Arr1=Ie-1/induit_I5*intg(Ua)
Arr2=-meca_I3*ddt(Wr)+gy_r*Ia-Tr_tension
Arr3=ali_Ue-(Ia+Ie)*ali_R-Ie*induit_R-Ua
Arr4=ali_Ue-(Ia+Ie)*ali_R-induc_I3*ddt(Ia)-Ia*induc_R-gy_r*Wr
Arr5=Tr_tension-Cr
```

Fig. 5.31 : RRAs générées du moteur à excitation shunt

La figure 5.31 présente les cinq RRA générées automatiquement par FDIPad à partir du modèle Bond Graph du moteur shunt. Le moteur shunt génère 5 RRA au lieu de 4 pour le moteur série, car la séparation physique des circuits d'induit et d'inducteur alimentés en parallèle crée une contrainte analytique supplémentaire.

- **Arr1 :** surveille le circuit inducteur en vérifiant la cohérence entre le courant d'excitation I_e et l'intégrale de la tension U_a. Elle est sensible aux défauts affectant l'inductance d'excitation.
- **Arr2 :** contrôle l'équilibre mécanique en reliant l'inertie J, l'accélération angulaire $\frac{d}{dt}(\omega_r)$ et le couple résistant T_r. Insensible aux défauts électriques, elle discrimine exclusivement les anomalies mécaniques.
- **Arr3 :** traduit l'équilibre de tension du montage parallèle en impliquant les deux courants I_a et I_e simultanément. Elle est sensible aux variations des résistances des deux circuits électriques.
- **Arr4 :** est la relation la plus complète : elle intègre la dynamique du circuit d'induit avec la force contre-électromotrice $gy\_r \cdot \omega_r$. Elle réagit aux défauts sur R_a, I_a et aux variations anormales de vitesse.
- **Arr5 :** vérifie simplement l'équilibre couple moteur avec couple résistant en régime établi. C'est l'indicateur direct de toute surcharge ou anomalie mécanique de charge.

5.5.2.2 Analyse de détectabilité et d'isolabilité

L'application de la même méthodologie que celle détaillée pour l'excitation série a permis d'établir la matrice de défaillance. L'analyse de cette dernière démontre clairement que l'ensemble des variables jouit des propriétés de détectabilité et d'isolabilité. De surcroît, pour ce mode d'excitation, il s'avère que les capsules constituant chaque partie du système sont également détectables et isolables.

Monitorability Analysis

	M_b	I_b	R1	R2	R3	R4	R5
Ie	1	1	1	0	1	1	0
Ia	1	1	0	1	1	1	0
Wr	1	1	0	1	0	1	0
Cr	1	1	0	0	0	0	1
induit	1	1	1	0	1	0	0
meca	1	1	0	1	0	0	0
induc	1	1	0	0	0	1	0

Fig. 5.32 : Matrice de surveillabilité du moteur à excitation shunt sous FDIPad

La figure 5.32 présente la matrice de surveillabilité calculée par FDIPad pour le moteur à courant continu à excitation shunt. Elle évalue, pour chaque variable et composant du système, la détectabilité (Mb) et l'isolabilité (Ib) à travers les cinq résidus R1 à R5.

Le résultat global est remarquable : Mb = 1 et Ib = 1 pour l'ensemble des sept entrées, confirmant que le système de surveillance est structurellement complet.

- I_e **(courant d'excitation)** est détectable et isolable, activant R1 et R3. Cette double activation reflète la double dépendance du courant d'excitation vis-à-vis de l'inductance (Arr1) et des résistances du circuit parallèle (Arr3). Sa signature {R1, R3} est unique dans la matrice.
- I_a **(courant d'induit)** est détectable et isolable, avec une sensibilité aux résidus R2, R3 et R4. La richesse de cette signature traduit le rôle central du courant d'induit dans le modèle Bond Graph ,il intervient à la fois dans l'équilibre mécanique (Arr2), les résistances électriques (Arr3) et la dynamique d'induit (Arr4).
- ω_r **(vitesse de rotation)** est détectable et isolable, activant R2 et R4. Ces deux résidus couvrent respectivement la dynamique mécanique et la force contre-électromotrice , les deux grandeurs physiques directement liées à la vitesse dans le modèle.
- C_r **(couple résistant)** est détectable et isolable avec une activation exclusive de R5. Cette sélectivité totale fait de Arr5 un indicateur parfaitement dédié aux anomalies de charge mécanique, sans interférence avec les autres résidus.
- **Induit** est détectable et isolable, activant R1 et R3. Le composant induit influence à la fois le circuit inducteur via le bus commun de tension (Arr1) et l'équilibre résistif global (Arr3).
- **Meca (partie mécanique)** est détectable et isolable avec une sensibilité exclusive à R2. Ce résultat confirme que Arr2 est bien l'unique résidu dédié à la surveillance mécanique , toute anomalie sur J ou le frottement visqueux est capturée sans ambiguïté.
- **Inducteur** est détectable et isolable, activant R3. La variation de l'inductance d'induit perturbe l'équilibre de tension du montage parallèle, ce qui est cohérent avec la formulation de Arr3 qui intègre les deux courants simultanément.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une approche complète de modélisation et de surveillance a été développée pour le moteur à courant continu dans ses trois configurations d'excitation : série, shunt et séparée. Chaque configuration a été modélisée sous l'environnement Symbols Shakti à l'aide du module BondPad, permettant de construire un modèle Bond Graph structuré et causalement cohérent pour chacun des trois cas.

Les simulations dynamiques réalisées sous Bond Simulator ont permis d'analyser le comportement du moteur en régime à vide et en régime de charge : courant d'induit, vitesse de rotation et couple électromagnétique pour les trois configurations d'excitation. Ces résultats ont mis en évidence les caractéristiques propres à chaque montage : fort couple au démarrage pour l'excitation série, stabilité de vitesse pour l'excitation shunt, et contrôle découplé flux-couple pour l'excitation séparée.

Le modèle de chaque configuration a ensuite été décomposé en capsules représentant les parties électriques et mécaniques du moteur, afin de faciliter la génération automatique des Relations de Redondance Analytique via le module FDIPad. Ce module a permis de construire le modèle architectural global et de générer automatiquement les équations des résidus utilisées pour la détection : 4 RRA pour le moteur série et 5 RRA pour le moteur shunt, reflétant la richesse structurelle croissante de chaque configuration.

L'analyse de surveillabilité, réalisée à partir de la matrice de signatures des fautes, a démontré que les défauts affectant les composants du moteur — résistances d'induit R_a et inducteur R_e, courant d'induit I_a et courant d'excitation I_e, inertie J et coefficient de frottement f — sont entièrement détectables et isolables . Ce résultat, obtenu pour les trois configurations, confirme la robustesse et la généralité de la démarche adoptée.

Les résultats obtenus montrent que les résidus restent stables en régime sain et présentent des variations significatives lors de l'apparition d'anomalies, validant l'efficacité des RRA dans la détection et la localisation des défauts. Ainsi, l'approche Bond Graph associée à FDIPad constitue une méthode de surveillance performante, systématique et applicable à l'ensemble des configurations du moteur à courant continu, offrant une solution unifiée pour le diagnostic de ce type d'actionneur industriel.

Conclusion et perspectives

Ce mémoire a porté sur le développement d'une méthode de surveillance et de diagnostic des défauts des moteurs à courant continu à différentes excitations en s'appuyant sur la modélisation Bond Graph et l'outil Symbols Shakti. L'objectif principal consistait à assurer la détection et l'isolation des défauts électriques et mécaniques susceptibles d'altérer les performances du moteur.

L'approche Bond Graph a permis de modéliser de manière cohérente les échanges énergétiques entre les différentes parties du système et de générer les Relations de Redondance Analytique utilisées pour le diagnostic.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt de la combinaison de la modélisation Bond Graph et des outils de diagnostic pour la détection et la localisation des défauts dans les systèmes électromécaniques, tout en facilitant la représentation des systèmes multiénergétiques.

Comme perspectives, il serait intéressant d'intégrer des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique afin d'améliorer les performances du diagnostic et de développer des stratégies de maintenance prédictive plus efficaces. L'utilisation des méthodes de tendance permettrait également d'analyser l'évolution des résidus dans le temps afin d'anticiper l'apparition des défauts.

Bibliographie

[1] G. Herrera-Vidal, J. R. Coronado-Hernández, and J. Maheut. Complexity management challenges in the industry 4.0 era : a systematic review in production systems. *Results in Engineering*, 26:105329, 2025. doi : 10.1016/j.rineng.2025.105329.

[2] S. Apeiranthitis, C. Drosos, A. Chatzopoulos, M. Papoutsidakis, and E. Pallis. From corrective and preventive maintenance to prognostics : the evolution of machinery maintenance and health management for enhanced system reliability and efficiency. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 17(1), 2026.

[3] Y. Jiang, S. Yin, and O. Kaynak. Optimized design of parity relation-based residual generator for fault detection : data-driven approaches. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2) :1449–1458, 2021. doi : 10.1109/TII.2020.2987840.

[4] F. Maseda et al. Sensors data analysis in supervisory control and data acquisition (scada) systems to foresee failures with an undetermined origin. *Sensors*, 21:2762, 2021. doi : 10.3390/s21082762.

[5] R. Kumar and A. Sharma. Scada system and its applications. *International Journal of Advanced Engineering and Technology*, 4(1) :20–23, 2020.

[6] G. Yadav and K. Paul. Architecture and security of scada systems : a review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 34:100433, 2021. doi : 10.1016/j.ijcip.2021.100433.

[7] Bisaioti. Web3 dans l'industrie : révolution technologique pour l'iot, le scada, la chaîne d'approvisionnement, la fintech et autres, 2026. URL `https://bisaioti.com/web3-dalam-industri/`. [En ligne]. Consulté le 4 mai 2026.

[8] R. Saddem, A. Toguyeni, and M. Tagina. Algorithme d'interprétation d'une base de signatures temporelles causales pour le diagnostic en ligne des systèmes à événements discrets. In *9th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation*, Bordeaux, France, 2012.

[9] H. R. Hernandez de Leon. *Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable*. PhD thesis, INSA de Toulouse, Toulouse, France, 2006.

[10] P. Mercorelli. Recent advances in intelligent algorithms for fault detection and diagnosis. *Sensors*, 24(8) :2656, 2024. doi : 10.3390/s24082656.

[11] K. Tidriri, N. Chatti, S. Verron, and T. Tiplica. Bridging data-driven and model-based approaches for process fault diagnosis and health monitoring : a review of researches and future challenges. *Annual Reviews in Control*, 42:63–81, 2016. doi : 10.1016/j.arcontrol.2016.09.008.

[12] T. Escobet, A. Bregon, B. Pulido, and V. Puig. *Fault diagnosis of dynamic systems : quantitative and qualitative approaches*. Springer, Cham, 2019. doi : 10.1007/978-3-030-17728-7.

[13] T. Wu, H. Song, H. Gao, Z. Wu, and F. Han. Adaptive dynamic thresholding method for fault detection in diesel engine lubrication systems. *Machines*, 12(12) :895, 2024. doi : 10.3390/machines12120895.

[14] M. Habyarimana and A. A. Adebiyi. Selection and placement of sensors for electric motors : a review and preliminary investigation. *Energies*, 18(13) :3484, 2025. doi : 10.3390/en18133484.

[15] Altronics SAS. Capteurs de mesure, 2026. URL `https://altronics.fr/fr/guide/capteurs-de-mesure/`. [En ligne]. Consulté le 4 mai 2026.

[16] Y. Seid Ahmed, A. A. Abubakar, A. F. M. Arif, and F. A. Al-Badour. Advances in fault detection techniques for automated manufacturing systems in industry 4.0. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11:1564846, 2025. doi : 10.3389/fmech.2025.1564846.

[17] P. Du, B. Wilhite, and C. Kravaris. Model-based fault diagnosis in closed-loop safety-critical chemical reactors : an experimental study. *AIChE Journal*, 71(9) :e18906, 2025. doi : 10.1002/aic.18906.

[18] W. Borutzky. *Bond graph modelling for control, fault diagnosis and failure prognosis*. Springer International Publishing, Cham, 2021. doi : 10.1007/978-3-030-60967-2.

[19] L. S. Keizers, R. Loendersloot, and T. Tinga. Bond graphs for quantitative fault diagnostics to support bayesian filtering-based failure prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 237:113093, 2025. doi : 10.1016/j.ymssp.2025.113093.

[20] J. Broenink. Bond graphs : a unifying framework for modelling of physical systems. In *Foundations of Multi-Paradigm Modelling for Cyber-Physical Systems*. Springer, 2020. doi : 10.1007/978-3-030-43946-0_2.

[21] Y. Panta and W. Church. Synchronizing the teaching resources of energy conservation principle in mechanical engineering courses. *Proceedings of the West Virginia Academy of Science*, 94(1), 2022. doi : 10.55632/pwvas.v94i1.896.

[22] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg. *System dynamics : modeling, simulation, and control of mechatronic systems*. Wiley, Hoboken, NJ, 5 edition, 2012.

[23] J. A. T. Machado and V. M. R. Cunha. *An Introduction to Bond Graph Modeling with Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL, 1st edition, 2021. doi : 10.1201/9781003057741.

[24] A. A. Fernandes and J. W. Kimball. Structural analysis of multi-domain dynamic systems modeled via bond graphs. *IEEE Access*, 2025.

[25] Y. Lounici, Y. Touati, and S. Adjerid. Uncertain fault estimation using bicausal bond graph : Application to intelligent autonomous vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D : Journal of Automobile Engineering*, 234(10) : 2484–2498, 2020. doi : 10.1177/0959651819892379.

[26] R. J. Patton. Fault-tolerant control : The 1997 situation. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18) :1029–1051, 1997.

[27] M. Staroswiecki and A. L. Gehin. From control to supervision. *Annual Reviews in Control*, 25:1–11, 2001.

[28] C. Ziouche and M. Hamlaoui. *Surveillance des systèmes de production par Bond Graph*. PhD thesis, Université Mohamed Boudiaf – M'Sila, 2019.

[29] J. S. Eterno, J. L. Weiss, D. P. Looze, and A. Willsky. Design issues for fault-tolerant restructurable aircraft control. In *Proceedings of the 24th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 900–905. IEEE, 1985.

[30] D. Garai, R. El Harabi, and F. Bacha. Hamiltonian bond graph formalism for generating energetic redundant relations. In *2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pages 1063–1068. IEEE, 2020. doi : 10.1109/SSD49366.2020.9364213.

[31] M. O. Aguilar-Justo, A. Gárate-García, and J. L. Gallegos-Ramírez. Fault detection and isolation with hybrid bond graphs in a direct current drive. In *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pages 606–611, Venice, Italy, 2012. IEEE. doi : 10.1109/EEEIC.2012.6221448.

[32] P. C. Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 3rd edition, 2013. ISBN 9781118078877.

[33] R. M. Crowder. *Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2nd edition, 2019. ISBN 9780081028841.

[34] M. El Harzli. Structure et fonctionnement de la machine à courant continu (mcc). `https://www.elharzli.com/structureMCC.php`, 2026. Consulté le 11 avril 2026.

الملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتطوير منهجية للإشراف وتشخيص الأعطال في محركات التيار المستمر اعتمادًا على نمذجة Graph. Bond تم استخدام علاقات التكرار التحليلية للكشف عن الأعطال الكهربائية والميكانيكية وعزلها بهدف تحسين موثوقية الأنظمة الصناعية.

تم تطوير نماذج Graph Bond لمحركات التيار المستمر ذات الإثارة التسلسلية و التوازنية باستعمال برنامج Symbols Shakti، كما استُخدمت أداة FDIPad لتوليد علاقات التكرار التحليلية والمتبقيات الخاصة بالمراقبة وتحليل قابلية الكشف والعزل للأعطال.

أظهرت نتائج المحاكاة أن المتبقيات تبقى مستقرة أثناء التشغيل العادي وتظهر تغيرات واضحة عند حدوث الأعطال، مما يؤكد فعالية المنهجية المقترحة في مراقبة وتشخيص أعطال محركات التيار المستمر.

الكلمات المفتاحية : Bond ،Graph الإشراف الصناعي، تشخيص الأعطال، المتبقيات، محرك التيار المستمر، FDIPad.

Résumé

Ce mémoire présente une approche de supervision et de diagnostic des moteurs à courant continu basée sur la modélisation Bond Graph. L'objectif principal est de détecter et d'isoler les défauts électriques et mécaniques à l'aide des Relations de Redondance Analytique (RRA).

Les modèles Bond Graph des moteurs à excitation série et shunt ont été développés sous l'environnement Symbols Shakti. Les RRAs ont été générées automatiquement sous FDIPad afin de produire les résidus de surveillance et d'analyser la détectabilité ainsi que l'isolabilité des défauts.

Les résultats de simulation montrent que les résidus restent stables en fonctionnement normal et réagissent significativement lors de l'apparition des défauts, ce qui confirme l'efficacité de l'approche proposée pour la surveillance et le diagnostic des moteurs à courant continu.

Mots-clés : Bond Graph, supervision, diagnostic, RRAs, résidus, moteur à courant continu, FDIPad.

Abstract

This thesis presents a supervision and diagnosis approach for DC motors based on Bond Graph modeling. The main objective is to detect and isolate electrical and mechanical faults using Analytical Redundancy Relations (ARRs).

The Bond Graph models of series and shunt DC motors were developed using the Symbols Shakti environment. The ARRs were automatically generated under FDIPad in order to produce monitoring residuals and analyze fault detectability and isolability.

Simulation results show that the residuals remain stable under normal operating conditions and react significantly when faults occur, confirming the effectiveness of the proposed approach for DC motor supervision and diagnosis.

Keywords : Bond Graph, supervision, diagnosis, ARRs, residuals, DC motor, FDIPad.