

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

## **MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du Diplôme de**  
**MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE**

**Option : Réseaux Electriques**

**Par**

**BOUKAROURA Abdelkader**

**Thème**

**Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé**  
**par l'Approche Bond-Graph**

**Soutenu le 02/ 12 / 2009**

**Devant le Jury**

<b>A. LAMAMRA</b>	<b>M.C</b>	<b>Université de Sétif</b>	<b>Président</b>
<b>M. KHEMLICHE</b>	<b>M.C</b>	<b>Université de Sétif</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>B. SAIT</b>	<b>M.C</b>	<b>Université de Sétif</b>	<b>Examineur</b>
<b>F. KHABER</b>	<b>M.C</b>	<b>Université de Sétif</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. ABDELAZIZ</b>	<b>M.C</b>	<b>Université de Sétif</b>	<b>Examineur</b>

# REMERCIEMENTS

---

*Mes remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage pour réaliser ce travail.*

*Ce mémoire a été préparé au sein du Laboratoire d'Automatique (LAS) au département d'électrotechnique de l'université Ferhat Abbas de Sétif.*

*Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur docteur **KHEMLICHE Mabrouk**, Maître de conférences à l'Université de Sétif, pour la confiance qu'il m'a prodigué pour la direction et tout l'aide qu'il m'a apporté durant toute la durée de ce travail de recherche.*

*Je tiens à remercier également le président et les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et leurs commentaires constructifs.*

*J'adresse aussi mes remerciements à tous mes amis et collègues surtout ceux qui m'ont apporté un soutien moral, une amitié inoubliable et précieuse et un dévouement qui fut particulièrement indispensable.*

*Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel et toute personne ayant contribué pour la réalisation de ce projet.*

# TABLE DES MATIÈRES

# TABLE DES MATIÈRES

---

---

<b>NOMENCLATURE</b> .....	1
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	2
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	4
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	6
<b>Chapitre 01</b> <i>Description de l'onduleur</i>	
1.1. Introduction .....	9
1.2. Définition de l'onduleur.....	9
1.3. Types d'onduleurs.....	10
1.3.1. Onduleur autonome .....	10
1.3.2. Onduleur nom autonome .....	10
1.4. Principe générale de fonctionnement .....	10
1.5. Les applications des onduleurs.....	11
1.5.1. Applications .....	11
1.5.1.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone .....	11
1.5.1.2. Alimentation de secours .....	12
1.5.1.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes .....	12
1.6. Onduleur de tension .....	13
1.7. Onduleur de courant .....	14
1.8. Onduleur à résonance .....	15
1.8.1. Onduleur à résonance parallèle .....	15
1.8.2. Onduleur à résonance série .....	15
1.9. Onduleur de tension triphasé.....	16
1.9.1. Le fonctionnement conventionnel .....	17
1.9.2. Les caractéristiques .....	21
1.9.2.1. Tension de sortie .....	21
1.9.2.2. Courant d'entrée .....	21
1.9.2.3. Courant dans les interrupteurs .....	21
1.9.3. Stratégies de commande .....	23
1.9.3.1. Commande 180° .....	23
1.9.3.2. Commande 120° .....	23
1.9.3.3. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) .....	24
1.9.3.3.1. Modulation sinusoïdale (MLIS) .....	24
1.9.3.3.2. Modulation vectorielle (SVM) .....	25

1.10. Conclusion.....	25
-----------------------	----

## **Chapitre 02**      *Modélisation bond graph de l'onduleur*

2.1. Introduction.....	26
2.2. Éléments bond graph.....	27
2.2.1. Représentation de l'outil Bond graph.....	27
2.2.1.1. Représentation des transferts de puissance .....	27
2.2.1.2. Les variables mises en jeu.....	28
Variables de puissance .....	28
Variables d'énergie. ....	28
2.2.2. Les éléments bond graphs .....	29
2.2.2.1. Éléments passifs .....	29
L'élément <i>R</i> .....	30
L'élément <i>C</i> .....	31
L'élément <i>I</i> .....	32
2.2.2.2. Éléments actifs_ .....	33
2.2.2.3. Détecteurs .....	33
2.2.2.4. Éléments des jonctions.....	34
Jonction 0 .....	34
Jonction 1.....	35
Transformateur <i>TF</i> .....	35
Gyrateur <i>GY</i> .....	36
2.2.3. Notion de causalité.....	36
2.2.3.1. Analyse de la causalité .....	37
2.2.3.2. Procédure d'affectation de la causalité.....	38
2.2.4. Matrice de transfert .....	39
2.2.5. Fonction de transfert.....	40
2.2.6. Equation d'état .....	40
2.2.6.1. Etablissement de l'équation d'état .....	40
2.2.6.2. Propriétés.....	40
2.2.7. Procédure (méthode systématique) .....	40
2.3. Procédure de construction de modèle bond-graph_.....	41
2.3.1. Système électrique.....	41
2.3.2. Système mécanique.....	41
2.3.3. Système hydraulique .....	43

2.4. Modélisation par bond graph.....	44
2.4.1. Organigramme de modélisation .....	44
2.4.2. Niveaux de modélisation.....	45
2.4.2.1. Le niveau technologique .....	45
2.4.2.2. Le niveau physique.....	45
2.4.2.3. Le niveau mathématique .....	45
2.3.2.4. Le niveau algorithmique.....	46
2.5. L'onduleur .....	46
2.6. Modélisation de l'onduleur monophasé par bond-graph .....	46
2.6.1. Schéma de principe .....	46
2.6.2. Bond graph à mots.....	47
2.6.3. Modèle bond-graph .....	48
2.6.4. Application .....	49
2.6.4.1. Application sur un modèle bond-graph.....	49
2.6.4.2. Variation de courant de la charge.....	50
2.6.4.3. Variation de tension de la charge .....	50
2.7. Modélisation de l'onduleur triphasé par bond-graph.....	51
2.7.1. Schéma de principe .....	51
2.7.2. Bond graph à mots.....	52
2.7.3. Modèle bond-graph .....	52
2.7.4. Application .....	53
2.7.4.1. Application sur un modèle bond-graph .....	53
2.7.4.2. Variation de courant de la charge.....	54
2.7.4.2. Variation de courant de la charge.....	55
2.8. Conclusion.....	56

## **Chapitre 03**      *Diagnostic de l'onduleur*

3.1. Introduction .....	58
3.2. Terminologies de base.....	58
3.3. Diagnostic des systèmes : concepts généraux.....	59
3.4. Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision .....	60
3.4.1. Classification des méthodes de surveillance .....	60
3.4.2. Méthodes de surveillance .....	62
3.4.2.1. Les approches de la surveillance sans modèle analytique .....	62
3.4.2.1.1. Analyse fréquentielle (Filtrage) .....	63
3.4.2.1.2. Redondance matérielle .....	63

3.4.2.1.3. Capteurs spécifiques (capteurs-détecteurs) .....	63
3.4.2.1.4. Réseaux de neurones artificiels (RNA).....	63
3.4.2.1.5. Systèmes d'Inférence Flous .....	64
3.4.2.2. Les approches de la surveillance à base de modèle analytique.....	65
3.4.2.2.1. Espace de parité.....	67
3.4.2.2.2. Observateurs .....	68
3.4.2.2.3. Estimation paramétrique .....	69
3.4.2.2.4. Graphes causaux .....	70
3.5. Génération des <i>RRAs</i> par les approches classiques.....	71
3.6. Etat de l'art sur la surveillance des systèmes par bond graph .....	71
3.6.1. Intérêt des modèles bond graphs couplés pour le diagnostic .....	71
3.6.2. Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic .....	72
3.6.3. Diagnostic par Bond graph quantitatif .....	72
3.6.3.1. Connaissance de la structure du modèle .....	73
3.6.3.2. Représentation matricielle .....	74
3.6.3.3. Parcours des chemins causaux .....	75
3.6.3.4. Placement de capteurs pour la surveillabilité des sources .....	75
3.6.3.5. Surveillance des composants .....	76
3.6.3.6. Informatisation des procédures d'analyse structurelle pour la surveillance des systèmes physiques par bond graph .....	77
3.7. Algorithme de placement de capteurs .....	77
3.7.1. Contraintes pour la surveillance des composants .....	77
3.8. Description du processus .....	79
3.8.1. Onduleur monophasé.....	79
3.8.2. Onduleur triphasé.....	81
3.9. Relations de redondance analytique des résidus .....	83
3.10. Application.....	87
3.10.1. Essais sur le processus et résultats .....	87
3.10.1.1. Défaillance sur le processus.....	87
3.11. Conclusion.....	96
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>97</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>99</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>103</b>

# NOMENCLATURE

## NOMENCLATURE

---

Symboles [Unités]	Description
<i>e</i> -	Effort.
<i>f</i> -	Flux.
<i>p</i> -	Variable de moment.
<i>q</i> -	Variable de déplacement.
<b>P</b> [Watt]	Puissance.
<b>E</b> [Joule]	Energie.
<b>i</b> [Ampère]	Intensité électrique.
<b>U</b> [Volt]	Tension.
<i>De</i> -	Détecteur (capteur) d'effort.
<i>Df</i> -	Détecteur (capteur) de flux.
<i>MSe</i> -	Source d'effort modulée.
<i>MSf</i> -	Source de flux modulée.
<b>r</b> -	Résidu.

# LISTE DES FIGURES

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure 1.1</b> : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	9
<b>Figure 1.2</b> : Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome_.....	10
<b>Figure 1.3</b> : $K$ en position (1) .....	11
<b>Figure 1.4</b> : Tension avec $K$ en position (1) et (2).....	11
<b>Figure 1.5</b> : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone_ .....	12
<b>Figure 1.6</b> : Alimentation de secours_.....	12
<b>Figure 1.7</b> : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes_.....	13
<b>Figure 1.8</b> : Onduleur de tension en pont Monophasé_ .....	13
<b>Figure 1.9</b> : Signaux de commande_ et forme d'onde des tensions de sortie_ .....	13
<b>Figure 1.10</b> : Onduleur de courant en_pont monophasé .....	14
<b>Figure 1.11</b> : Signaux de commande et forme d'onde des courants .....	14
<b>Figure 1.12</b> : Onduleur à résonance parallèle (Monophasée) .....	15
<b>Figure 1.13</b> : Signaux de commande_ et forme d'onde des courants_ .....	15
<b>Figure 1.14</b> : Onduleur à résonance_série (Monophasée).....	16
<b>Figure 1.15</b> : Signaux de commande et forme d'onde des tensions_.....	16
<b>Figure 1.16</b> : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé_ .....	17
<b>Figure 1.17</b> : Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge $RL$ montée en étoile (Commande $180^\circ$ ).....	20
<b>Figure 1.18</b> : Commande $180^\circ$ .....	23
<b>Figure 1.19</b> : Commande $120^\circ$ .....	23
<b>Figure 2.1</b> : Bond graph : transfert de puissance de A vers B .....	28
<b>Figure 2.2</b> : Représentation générale d'un bond.....	28
<b>Figure 2.3</b> : Tétraèdre de Paynter .....	30
<b>Figure 2.4</b> : Elément $R$ .....	30

<b>Figure 2.5</b> : Élément $C$ .....	31
<b>Figure 2.6</b> : Élément $I$ .....	32
<b>Figure 2.7</b> : Représentation graphique des sources $Se, Sf$ .....	33
<b>Figure 2.8</b> : Représentation graphique des détecteurs $De, Df$ .....	34
<b>Figure 2.9</b> : Représentation de la jonction $0$ .....	35
<b>Figure 2.10</b> : Représentation de la jonction $I$ .....	35
<b>Figure 2.11</b> : Représentation de la jonction $TF$ .....	35
<b>Figure 2.12</b> : Représentation de la jonction $GY$ .....	36
<b>Figure 2.13</b> : Causalités en bond-graph et le schéma bloc .....	36
<b>Figure 2.14</b> : Exemple de non unicité de la causalité entre les éléments $R1$ et $R2$ .....	37
<b>Figure 2.15</b> : Causalité unique.....	37
<b>Figure 2.16</b> : Système électrique et modèle bond-graph équivalent_ .....	41
<b>Figure 2.17</b> : Schéma mécanique et Modèle bond-graph équivalent_.....	42
<b>Figure 2.18</b> : Système électromécanique_.....	42
<b>Figure 2.19</b> : Modèle bond-graph équivalent_.....	43
<b>Figure 2.20</b> : Système hydraulique_.....	43
<b>Figure 3.21</b> : Modèle bond-graph équivalent_.....	44
<b>Figure 2.22</b> : Les étapes de modélisation par bond graph_.....	44
<b>Figure 2.23</b> : Modélisation technologique.....	45
<b>Figure 2.24</b> : Schéma de principe de l'onduleur monophasé.....	47
<b>Figure 2.25</b> : Bond-graph à mots de l'onduleur monophasé.....	48
<b>Figure 2.26</b> : Représentation vectorielle d'un modèle bond graph de l'onduleur.....	48
<b>Figure 2.27</b> : Modèle bond graph de l'onduleur monophasé .....	49
<b>Figure 2.28</b> : Courant de la charge .....	50
<b>Figure 2.29</b> : Tension de la charge .....	51
<b>Figure 2.30</b> : Schéma de principe de l'onduleur triphasé .....	51
<b>Figure 2.31</b> : Bond graph à mots de l'onduleur triphasé.....	52
<b>Figure 2.32</b> : Modèle bond graph de l'onduleur triphasé.....	53
<b>Figure 2.33</b> : Courant de la charge de la phase (1).....	54
<b>Figure 2.34</b> : Courant de la charge de la phase (2) .....	55
<b>Figure 2.35</b> : Courant de la charge de la phase (3).....	55
<b>Figure 2.36</b> : Tension de la charge de la phase (1).....	55
<b>Figure 2.37</b> : Tension de la charge de la phase (2) .....	56
<b>Figure 2.38</b> : Tension de la charge de la phase (3).....	56
<b>Figure 3.1</b> : Modules d'une procédure de surveillance .....	60

<b>Figure 3.2</b> : Etape du diagnostic à base du modèle analytique.....	65
<b>Figure 3.3</b> : Forme de calcul et d'évaluation des résidus .....	66
<b>Figure 3.4</b> : Méthodes utilisées en diagnostic à base de modèles analytiques .....	67
<b>Figure 3.5</b> : Approche de l'espace de parité dans un format entrée-sortie .....	68
<b>Figure 3.6</b> : Schéma fonctionnel d'un observateur générateur de résidu .....	69
<b>Figure 3.7</b> : Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts.....	70
<b>Figure 3.8</b> : Représentation vectorielle d'un modèle bond graph .....	74
<b>Figure 3.9</b> : Placement de capteurs sur le modèle bond graph d'un onduleur monophasé .....	79
<b>Figure 3.10</b> : Placement de capteur sur le modèle de l'onduleur monophasé cas $K_1$ et $K_2'$ fermé.....	80
<b>Figure 3.11</b> : Placement de capteur sur le modèle de l'onduleur monophasé cas $K_1'$ et $K_2$ fermé.....	80
<b>Figure 3.12</b> : Placement de capteur sur le modèle de phase de l'onduleur triphasé cas $K_1$ et $K_1'$ fermé.....	81
<b>Figure 3.13</b> : Sensibilité du $RAA1$ et $RAA2$ à la défaillance du capteur $Df_1$ .....	87
<b>Figure 3.14</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA3$ et $RAA4$ .....	88
<b>Figure 3.15</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA5$ et $RAA6$ .....	88
<b>Figure 3.16</b> : Sensibilité du $RAA2$ et $RAA3$ représentée par le capteur $Df_2$ .....	89
<b>Figure 3.17</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA1$ et $RAA4$ .....	89
<b>Figure 3.18</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA5$ et $RAA6$ .....	89
<b>Figure 3.19</b> : Défaillance dans le résidu $RAA1$ et fonctionnement normal du résidu $RAA2$ .....	90
<b>Figure 3.20</b> : Défaillance dans le résidu $RAA3$ et fonctionnement normal du résidu $RAA4$ .....	90
<b>Figure 3.21</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA5$ et $RAA6$ .....	91
<b>Figure 3.22</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA1$ et $RAA2$ .....	91
<b>Figure 3.23</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA3$ et défaillance dans le résidu $RAA4$ .....	92
<b>Figure 3.24</b> : Défaillance dans le résidu $RAA5$ et fonctionnement normal du résidu $RAA6$ .....	92
<b>Figure 3.25</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA1$ et $RAA2$ .....	93
<b>Figure 3.26</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA3$ et $RAA4$ .....	93
<b>Figure 3.27</b> : Défaillance dans le résidu $RAA5$ et résidu $RAA6$ .....	93
<b>Figure 3.28</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA1$ et $RAA2$ .....	94
<b>Figure 3.29</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA3$ et défaillance dans le résidu $RAA4$ .....	94
<b>Figure 3.27</b> : Fonctionnement normal du résidu $RAA5$ et défaillance dans le résidu $RAA6$ .....	95

# LISTE DES TABLEAUX

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1.1</b> : Les tensions et les courants correspondants à chaque état de commutation de l'onduleur .....	19
<b>Tableau 2.1</b> : Equivalences des variables généralisées dans des domaines physiques .....	29
<b>Tableau 2.2</b> : Eléments de la base du bond-graph.....	34
<b>Tableau 2.3</b> : Règles d'affectation de la causalité.....	39
<b>Tableau 2.4</b> : Caractéristiques de l'onduleur monophasé .....	50
<b>Tableau 2.5</b> : Caractéristiques de l'onduleur triphasé.....	54
<b>Tableau 3.1</b> : Matrice de signature de défaillances .....	84
<b>Tableau 3.2</b> : Matrice de signatures de défaillances .....	84
<b>Tableau 3.3</b> : Matrice de signatures de défaillances .....	85
<b>Tableau 3.4</b> : Matrice de signatures de défaillances .....	86
<b>Tableau 3.5</b> : Recherche du placement de capteurs optimal .....	86

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

La modélisation est une technique nécessaire à l'étude, l'analyse, la synthèse, le diagnostic et le contrôle des systèmes ou des unités industrielles. Cette technique prend différentes formes telle que la modélisation physique, la modélisation mathématique ou la modélisation graphique. La modélisation des systèmes en électrotechnique spécialement en électronique de puissance reste encore un domaine ouvert à cause de leur complexité et se base sur la conversion par des moyens statiques de l'énergie électrique d'une forme en une autre forme adaptée à des besoins déterminés, les moyens statiques sont les valves de puissance non commandées (diodes) ou commandées (thyristors, triacs, transistors de puissance, etc...) et les éléments statiques de l'électrotechnique classique (inductances, résistances, capacités, etc...). Le Bond Graph par sa caractéristique pluridisciplinaire répond à ce besoin d'être un outil commun entre les différents domaines (électrique, mécanique,...). Lorsque les phénomènes de transfert de puissance et de changement de la forme continue à la forme alternative, sont pris en compte, la modélisation s'implique dans une démarche d'analyse du système pour obtenir des informations sur son comportement et ses performances, ceci en toute abstraction du système réel. Cette technique prend différentes formes telle que la modélisation physique (analytique), la modélisation mathématique ou la modélisation graphique. La complexité des systèmes modernes a orienté la recherche vers l'utilisation des méthodes les mieux adaptées afin d'obtenir le modèle le plus proche du système réel. La modélisation par l'outil Bond-Graph répond particulièrement bien à ce sujet par les caractéristiques suivantes :

- Une approche énergétique qui permet une décomposition du système étudié en sous-systèmes qui échangent de la puissance, et qui structurent la procédure de modélisation.
- Une terminologie unifiée pour tous les domaines physiques, fondée sur la notion d'analogie entre phénomènes.
- Une représentation graphique pour visualiser les transferts de puissance, mais aussi pour fixer la causalité (causes à effets).
- Une souplesse inhérente qui permet de faire évoluer le modèle en ajoutant des phénomènes précédemment négligés.
- Une écriture systématique des équations mathématiques issues du modèle Bond Graph, sous forme d'équations différentielles.
- Un support pour une analyse structurelle des propriétés du modèle.

L'objectif principal de notre travail consiste en la modélisation d'un système électrique de changement de phases. Il s'inscrit dans un modèle bond graph utilisé pour décrire le système considéré. Le diagnostic des systèmes à structure rigide (électrique, mécanique) a connu d'énormes progrès dans les vingt dernières années. Par contre, la surveillance et le contrôle des convertisseurs électriques restent des domaines ouverts du fait de la difficulté de modélisation de ces systèmes fortement non linéaires, et l'impossibilité de mesurer directement un grand nombre de variables bien que ces types de processus soient présents dans de très nombreuses industries.

Le travail développé ici concerne deux volets de modélisation de l'onduleur monophasé et triphasé par l'outil bond graph.

Les systèmes électrotechniques sont régis par l'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes de différentes natures et associent des composantes technologiques qui mettent en œuvre des lois issues de disciplines différentes (mécanique, thermique, électrique, chimique,...). C'est pourquoi leur modélisation en vue de leur surveillance nécessite une approche unifiée.

L'outil Bond Graph, à vocation pluridisciplinaire apparaît le mieux adapté pour la connaissance des systèmes physiques est aussi un excellent support pour l'étude de la surveillance des modèles. Il permet par sa nature graphique à l'aide d'un langage unique, de mettre en évidence la nature des échanges de puissance dans le système, tels que les phénomènes de stockage, de transformation et de dissipation d'énergie. Outre son utilisation pour l'analyse structurelle et la simulation, la modélisation par Bond Graph apporte à la surveillance un outil permettant sur la seule analyse de sa structure graphique et causale de mettre en évidence ses propriétés de surveillabilité. La mise en œuvre sur le logiciel SYMBOLS du système de surveillance permet de détecter les principales pannes définies dans le cahier des charges. Les essais ont montré la précision du modèle et l'efficacité du système de surveillance.

Ce travail rentre dans la catégorie de la conception d'un système de surveillance pour un processus en électrotechnique par Bond Graph. A travers ce travail, notre objectif principal est de proposer une méthode graphique permettant une compréhension des différents phénomènes physiques concernés pour modéliser et simuler un onduleur monophasé et triphasé par l'outil Bond Graph.

Pour aboutir aux objectifs de ce travail, notre mémoire sera structuré en trois chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la description et le rôle de l'onduleur monophasé et triphasé, son principe de fonctionnement, les différents types d'onduleur, et les différents types de commande de l'onduleur triphasé.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'outil bond graph et la modélisation par cet outil de l'onduleur monophasé et triphasé et sa simulation à l'aide du logiciel SYMBOLS (System Modeling Bond graph Language Simulation) dans lequel nous avons simulé les phénomènes électriques caractérisant un onduleur.

Le troisième chapitre sera destiné à l'utilisation de l'outil bond graph dans le diagnostic de l'onduleur monophasé et triphasé. Nous illustrons la description des processus et la représentation de la méthodologie de placement de capteurs sur le modèle Bond-Graph pour montrer comment surveiller un onduleur monophasé et triphasé avec un minimum de capteurs par génération de relations de redondance analytique ainsi que leurs propriétés de détection et de localisation des défaillances à l'aide du logiciel SYMBOLS.

Enfin, on termine par une conclusion, mettant l'importance et l'intérêt de la modélisation et du diagnostic par bond-graph.

# Chapitre 01

*Description de l'onduleur*

## 1.1. Introduction

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Certaines de ces nouvelles applications, telles que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques, ou l'alimentation de machines à courant alternatif pour des applications particulières, sont très exigeantes en termes de performances dynamiques.

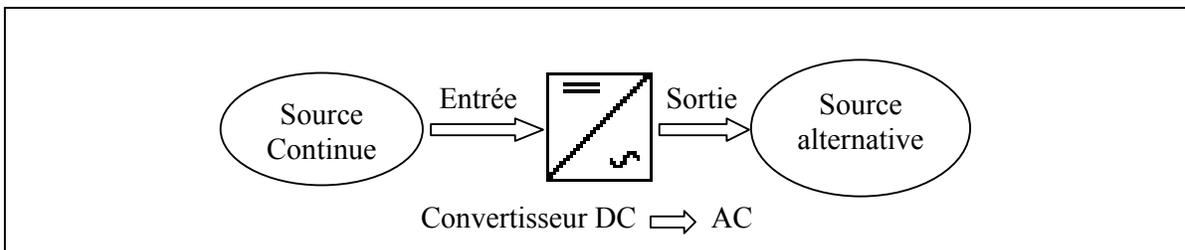
Les applications de l'électronique furent pendant longtemps limitées à la technique des hautes fréquences. Les possibilités d'application étaient limitées par le manque de fiabilité des éléments électroniques alors disponibles. Cette fiabilité était insuffisante pour répondre aux hautes exigences requises par les nouvelles applications dans le domaine industriel. Ce ne fut qu'à la suite du développement des composants électroniques spéciaux de fiabilité plus élevée et de tolérance plus restreintes, que les nouvelles techniques peuvent être envisagées, ainsi naît une nouvelle branche de l'électronique appelée l'électronique de puissance.

À la base de l'électronique de puissance se trouvent les éléments de puissance, qui peuvent être subdivisés en éléments redresseurs non contrôlables (diodes) et éléments redresseurs contrôlables (thyristors, triacs, transistors ...).

Les éléments de puissance, associés à des dispositifs auxiliaires appropriés (commande de gâchettes, radiateurs de dissipation, circuit RC de protection), composent des modules standard permettant la conversion de puissance, tel que les redresseurs, les onduleurs, les cycloconvertisseurs ... etc.

## 1.2. Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. **Figure 1.1** représente schéma de principe de l'onduleur.



**Figure 1.1** : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

Les onduleurs sont classés en deux grandes catégories :

### 1.3. Types d'onduleurs

#### 1.3.1. Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi conducteurs dans ce cas nous commandons la fréquence la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [1], [4] :

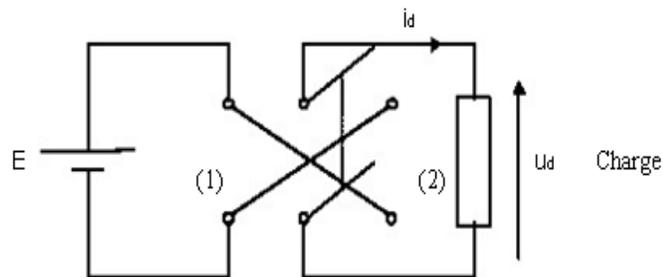
- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

#### 1.3.2. Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous les thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cycloconvertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs *MW*, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO, [1], [4].

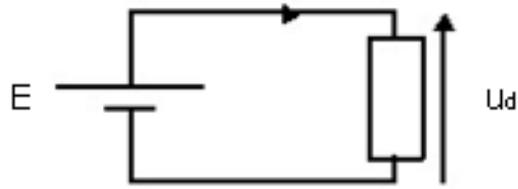
### 1.4. Principe général de fonctionnement

Pour réaliser un onduleur autonome, il suffit de disposer d'un interrupteur inverseur **K** et d'une source de tension continue  $E$  comme le montre la **Figure 1.2** :



**Figure 1.2** : Principe de fonctionnement de l'onduleur autonome

Lorsque **K** est en position (1), on obtient le montage de la **Figure 1.3** :

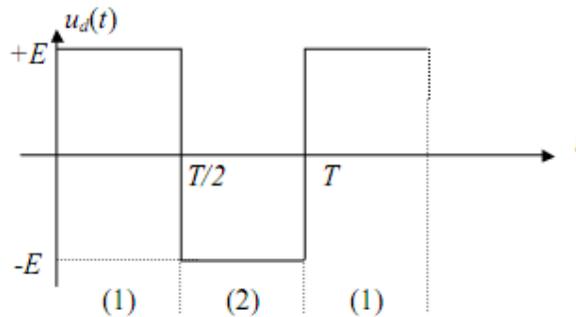


**Figure 1.3 :**  $K$  en position (1)

Soit :  $U(t) = E$

Lorsque  $K$  est en position (2), on obtient:  $U = -E$ .

La **Figure 1.4** donne la forme de  $U_d(t)$  sur une période complète de fonctionnement.



**Figure 1.4 :** Tension avec  $K$  en position (1) et (2).

## 1.5. Les applications des onduleurs

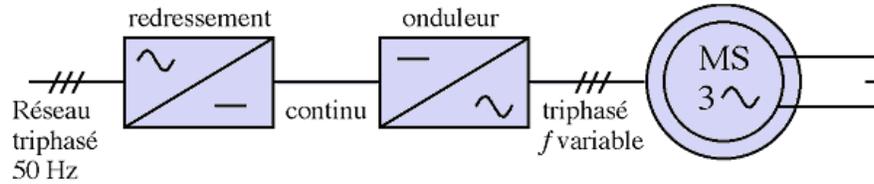
Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe a commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes [1], [4].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

### 1.5.1. Applications

#### 1.5.1.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.

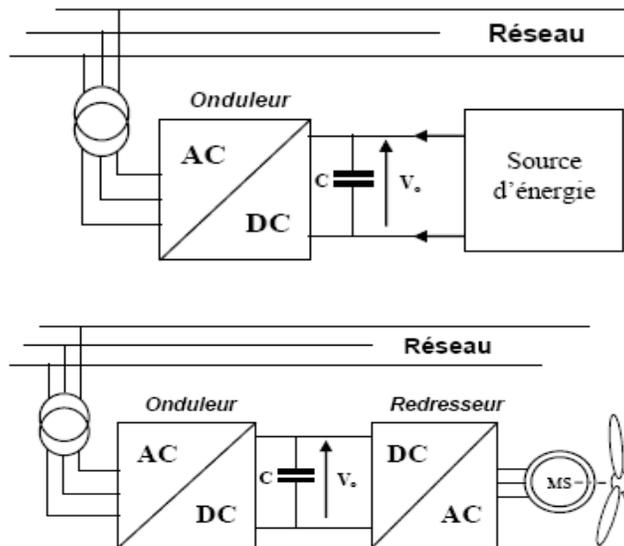


**Figure 1.5 :** Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

**Remarque :** pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut en fait conserver le rapport  $(f/V)$  constant. (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement).

### 1.5.1.2. Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [3].



**Figure 1.6 :** Alimentation de secours

### 1.5.1.3. Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

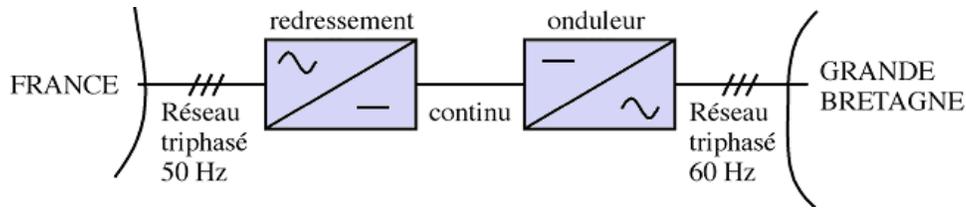


Figure 1.7 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

**1.6. Onduleur de tension**

On appelle onduleur de tension, un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue. Nous présentons le principe des onduleurs de tension dans le cas où la sortie est monophasée et utilisons l'onduleur en pont à quatre interrupteurs :  $K_1, K_2, K_1'$  et  $K_2'$ .

La Figure 1.8 représente le circuit de puissance d'un tel onduleur (pont monophasée) et la Figure 1.9 représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :

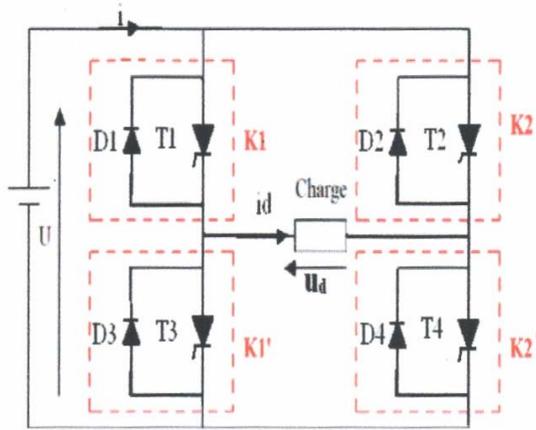


Figure 1.8 : Onduleur de tension en pont Monophasé

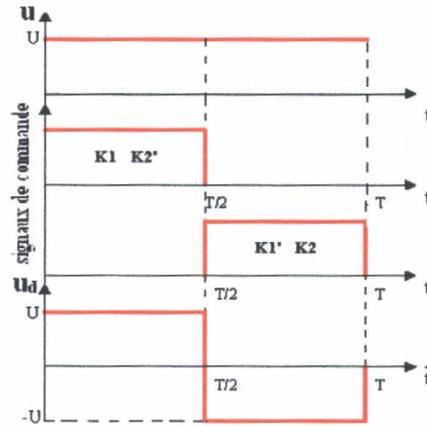


Figure 1.9 : Signaux de commande et forme d'onde des tensions de sortie

Les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $U_d(t)$  comme suit: Si la tension d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $U$ , quelque soit  $I$  on a :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs,  $K_1, K_2'$  sont fermés, et  $K_2, K_1'$  sont ouverts.

D'où:  $U_d = +U$  .....(1.1)

- Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs,  $K_2, K_1'$  sont fermés, et  $K_1, K_2'$  sont ouverts.

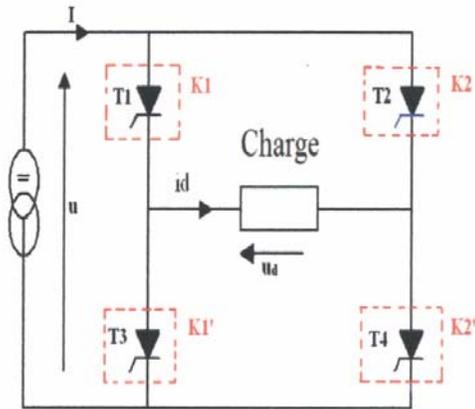
D'où:  $U_d = -U$  .....(1.2)

Le courant de la sortie est donc le courant  $I$  à l'entrée, il dépend de la charge placée du côté alternative.

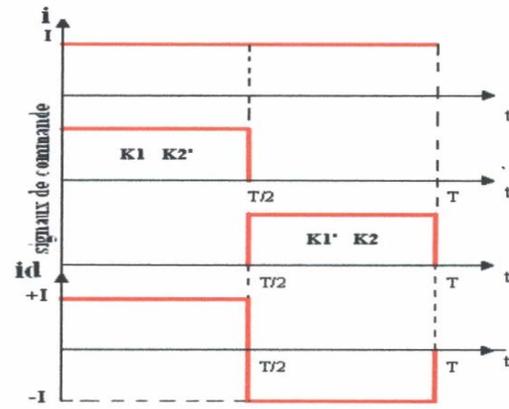
Notant que les interrupteurs  $K_i$  de l'onduleur; **Figure 1.8** sont formés par la mise en parallèle d'un semi-conducteur  $T_i$  commandé à l'ouverture et à la fermeture et d'une diode  $D_i$ . Cette dernière assure la continuité de courant permettant ainsi la conduction d'un courant négatif dans le cas où le courant est déphasé par rapport à la tension de sortie [2], [3].

**1.7. Onduleur de courant**

On appelle onduleur de courant, un onduleur qui est alimenté par une source de courant continue. Comme exemple, on prend le montage de la figure ci-dessous illustrant le modèle d'un onduleur de courant monophasé, qui se compose de quatre interrupteurs de puissance  $K_1, K_2, K_1'$  et  $K_2'$ , sur La **Figure 1.11** sont représentés les signaux de commande et les formes d'ondes des courants correspondants [2], [3].



**Figure 1.10** : Onduleur de courant en pont monophasé



**Figure 1.11** : Signaux de commande et forme d'onde des courants

De même, pour l'onduleur de courant, les états des interrupteurs commandés nous permettent de donner l'expression de  $i_d(t)$ . Si le courant d'entrée de l'onduleur est constant et égal à  $I$ , quelque soit  $U$ :

- Pour  $0 < t < T/2$  : les interrupteurs,  $K_1, K_2'$  sont fermés, et  $K_2, K_1'$  sont ouverts :

D'où:  $i_d = +I$  .....(1.3)

- Pour  $T/2 < t < T$  : les interrupteurs,  $K_2, K_1'$  sont fermés, et  $K_1, K_2'$  sont ouverts :

D'où  $i_d = -I$  .....(1.4)

La tension  $U_d(t)$  de la sortie est donc la tension  $U$  à l'entrée, elle dépend de la charge placée dans le coté alternatif. Dans ce cas; l'interrupteur est formé d'un semi conducteur commandé à l'ouverture et la fermeture, il n'a pas à être réversible en courant, alors on n'a pas besoin de diode mise en parallèle, [2], [3].

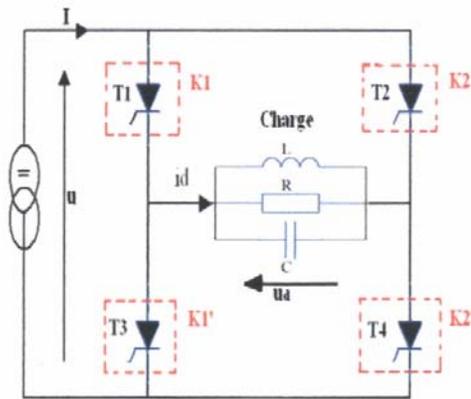
Parmi les onduleurs de tension ou de courant, on trouve aussi les onduleurs à résonances :

### 1.8. Onduleur à résonance

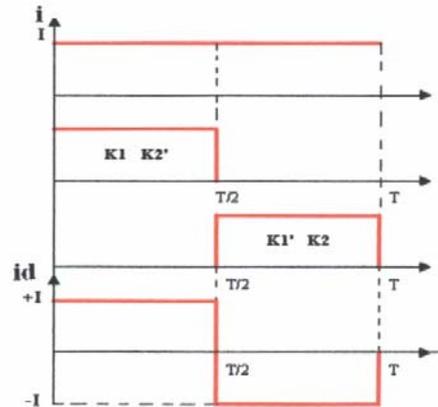
Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépend de la charge, il n'est plus non autonome. On distingue deux modèles à résonance [2], [3], [4].

#### 1.8.1. Onduleur à résonance parallèle

Ce dernier débite sur un circuit *RLC* résonant parallèle peu amorti comme l'illustre la **Figure 1.12** suivant :



**Figure 1.12** : Onduleur à résonance parallèle (Monophasée)

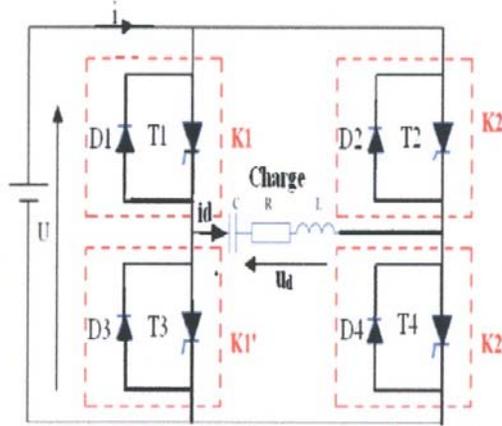


**Figure 1.13** : Signaux de commande et forme d'onde des courants

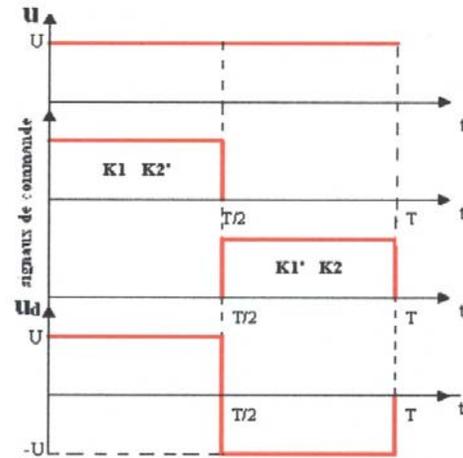
Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension; donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de courant, dont la **Figure 1.13** donne les signaux de commande et les formes d'ondes des courants [2], [3], [4].

#### 1.8.2. Onduleur à résonance série

Celui-ci débite sur un circuit *RLC* résonant série peu amorti la **Figure 1.14** Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant  $I$ , donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension. Il représente donc un cas particulier de l'onduleur de tension. La **Figure 1.15** représente les signaux de commande et les formes d'ondes des tensions :



**Figure 1.14** : Onduleur à résonance  
série (Monophasée)



**Figure 1.15** : Signaux de commande  
et forme d'onde des tensions

### 1.9. Onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en regroupant, en parallèle, trois onduleurs monophasés (en pont ou en demi-pont) et commander les interrupteurs de chacun pour obtenir à la sortie trois phases décalées de  $120^\circ$ . En fait, en regroupant trois demi ponts monophasés, on obtient un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs représenté par la **Figure 1.16** dont les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension continue  $U$  ne soit jamais en court circuit et pour que les circuits des courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  ne soient jamais ouverts. Afin que les interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quelques soient les courants de charge, il faut que ces derniers soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et à fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle. Ces interrupteurs peuvent être réalisées, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaires, des IGBTs ou des GTOS associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant. [2], [3], [4].

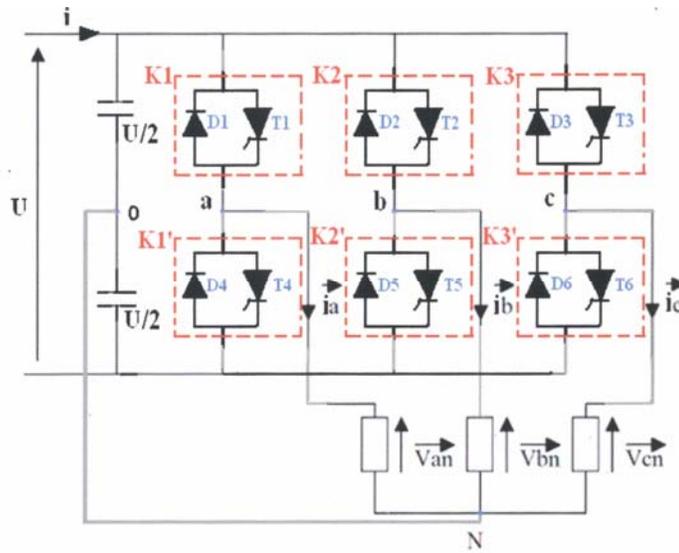


Figure 1.16 : Circuit de puissance d'un onduleur de tension triphasé

**1.9.1. Le fonctionnement conventionnel**

On peut commander l'onduleur de manière que :

- Chaque interrupteur conduit durant 120°.
- Chaque interrupteur conduit durant 180°.

On va se limiter à l'étude seulement de cette dernière, c'est-à-dire la commande en pleine onde (180°), dont, les intervalles de commande de fermeture de chaque interrupteur sont définis comme suit:

- $K_1$  est fermé pour :  $0 < \omega t < \pi$
- $K_2$  est fermé pour :  $2\pi/3 < \omega t < 2\pi/3 + \pi$
- $K_3$  est fermé pour :  $4\pi/3 < \omega t < \pi/3 + \pi$
- $K_1'$  est fermé pour :  $\pi < \omega t < 2\pi$
- $K_2'$  est fermé pour :  $2\pi/3 + \pi < \omega t < 2\pi/3 + 2\pi$
- $K_3'$  est fermé pour :  $4\pi/3 + \pi < \omega t < \pi/3 + 2\pi$

Si les courants  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  sont sinusoïdaux et forment un système triphasé équilibré, alors :

$$i_a = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \dots\dots\dots (1.6)$$

$$i_b = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi - 2\pi/3) \dots\dots\dots (1.7)$$

$$i_c = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi - 4\pi/3) \dots\dots\dots (1.8)$$

avec I : la valeur efficace du courant de sortie de l'onduleur .

Avec cette commande, quelque soit les courants circulants, les interrupteurs imposent les tensions suivantes :

- Tension entre  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $0$  (neutre) :

$$V_{ao} = V_a - V_0 = \begin{cases} +\frac{U}{2} & \text{si } K_1 \text{ est fermé.} \\ -\frac{U}{2} & \text{si } K'_1 \text{ est fermé.} \end{cases} \dots\dots\dots(1.9)$$

$$V_{bo} = V_b - V_0 = \begin{cases} +\frac{U}{2} & \text{si } K_2 \text{ est fermé.} \\ -\frac{U}{2} & \text{si } K'_2 \text{ est fermé.} \end{cases} \dots\dots\dots(1.10)$$

$$V_{co} = V_c - V_0 = \begin{cases} +\frac{U}{2} & \text{si } K_3 \text{ est fermé.} \\ -\frac{U}{2} & \text{si } K'_3 \text{ est fermé.} \end{cases} \dots\dots\dots(1.11)$$

- Les tensions simples  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  :

Si la charge est équilibrée et couplée en étoile: la somme des courants de ligne est nulle, ce qui implique que la somme des tensions simples est égale a zéro, donc:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \dots\dots\dots(1.12)$$

A partir des relations précédentes, on tire:

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{3} [2(V_a - V_0) - (V_b - V_0) - (V_c - V_0)] \\ V_{bn} &= \frac{1}{3} [2(V_b - V_0) - (V_a - V_0) - (V_c - V_0)] \dots\dots\dots(1.13) \\ V_{cn} &= \frac{1}{3} [2(V_c - V_0) - (V_a - V_0) - (V_b - V_0)] \\ V_n - V_0 &= \frac{1}{3} [2(V_a - V_0) + (V_b - V_0) + (V_c - V_0)] \end{aligned}$$

- Tension composée  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  :

De ces tensions simples, on déduit les tensions composées entre les bornes de sortie de l'onduleur, tel que :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} \end{aligned} \dots\dots\dots(1.14)$$

De ces équations on tire :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{3} (V_{ab} - V_{ca}) = \frac{1}{3} (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} &= \frac{1}{3} (V_{bc} - V_{ab}) = \frac{1}{3} (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \dots\dots\dots(1.15) \\ V_{cn} &= \frac{1}{3} (V_{ca} - V_{bc}) = \frac{1}{3} (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{aligned}$$

Les courants dans les interrupteurs se déduisent des courants de sortie  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  tel que :

$$\begin{aligned}
 i_{K1} &= i_a & i_{K1}' &= 0 & \text{Quand } K_1 \text{ est fermé} \\
 i_{K1} &= 0 & i_{K1}' &= -i_a & \text{Quand } K_1' \text{ est fermé} \\
 i_{K2} &= i_b & i_{K2}' &= 0 & \text{Quand } K_2 \text{ est fermé} \\
 i_{K2} &= 0 & i_{K2}' &= -i_b & \text{Quand } K_2' \text{ est fermé} \dots\dots\dots(1.16) \\
 i_{K3} &= i_c & i_{K3}' &= 0 & \text{Quand } K_3 \text{ est fermé} \\
 i_{K3} &= 0 & i_{K3}' &= -i_c & \text{Quand } K_3' \text{ est fermé}
 \end{aligned}$$

Et le courant fourni par la source  $i$  est donnée par :

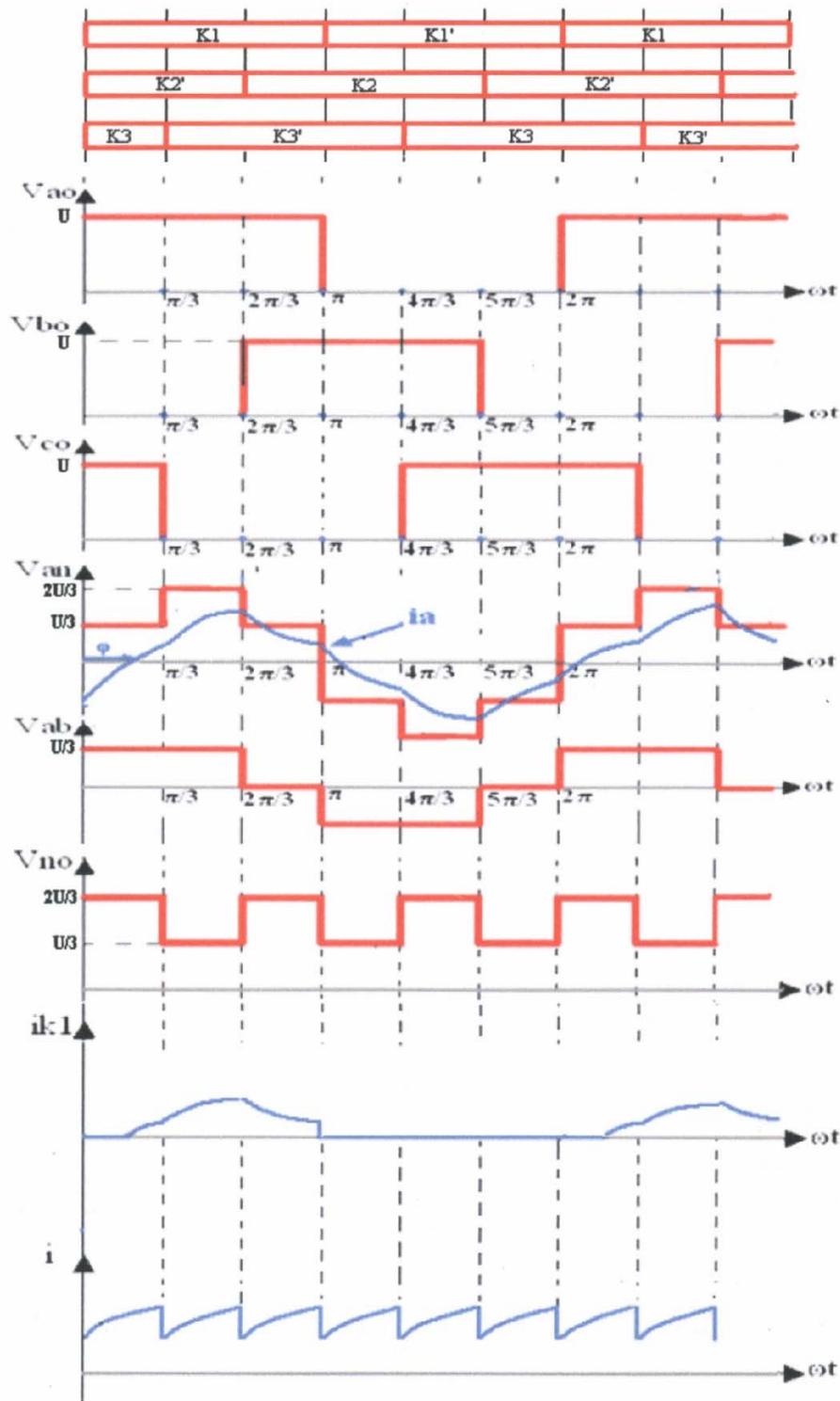
$$i = i_{K1} + i_{K2} + i_{K3} \dots\dots\dots(1.17)$$

En considérant alors, les états possibles des interrupteurs, on peut établir le tableau suivant décrivant ainsi; les tensions simples et composés, les courants dans les interrupteurs et le courant d'entrée  $i$  correspondant à chaque état de commutation [3], [7] :

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_{CN}$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$	$I_{K1}$	$I_{K2}$	$I_{K3}$	$I$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	F	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	0	-U	U	0	0	$i_c$	$i_c$
0	F	0	$-\frac{U}{3}$	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	-U	U	0	0	$i_b$	0	$i_b$
0	F	F	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	-U	0	U	0	$i_b$	$i_c$	$-i_a$
F	0	0	$\frac{2U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	$-\frac{U}{3}$	U	0	-U	$i_a$	0	0	$i_a$
F	0	F	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	$\frac{U}{3}$	U	-U	0	$i_a$	0	$i_c$	$-i_b$
F	F	0	$\frac{U}{3}$	$\frac{U}{3}$	$-\frac{2U}{3}$	0	U	-U	$i_a$	$i_b$	0	$-i_c$
F	F	F	0	0	0	0	0	0	$i_a$	$i_b$	$i_c$	0

**Tableau 1.1** : Les tensions et les courants correspondants à chaque état de commutation de l'onduleur

En tenant compte du **Tableau 1.1**, La **Figure 1.18** donne un exemple du tracé des formes d'ondes des tensions et des courants obtenus pour une charge  $RL$  :



**Figure 1.17** : Les Formes d'onde des tensions et des courants pour un onduleur de tension triphasé avec la charge  $RL$  montée en étoile (commande  $180^\circ$ )

## 1.9.2. Les caractéristiques

### 1.9.2.1. Tension de sortie

Les tensions de sortie simples  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  ont pour valeur efficace :

$$V_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{3} U \dots\dots\dots(1.18)$$

Leur fondamental a pour valeur efficace:

$$V_{1eff} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \dots\dots\dots(1.19)$$

Les tensions de sortie composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont pour valeur efficace :

$$V_{eff(comp)} = \sqrt{\frac{2}{3}} U \dots\dots\dots(1.20)$$

### 1.9.2.2 Courant d'entrée

Le courant d'entrée a une fréquence égale à six fois celle des grandeurs de sortie. Lors du débit sur une charge inductive, il a comme expression :

$$\text{Pour: } 0 < \omega t < \pi/3 \quad i = -i_b = -I\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \dots\dots\dots(1.21)$$

Il a pour valeur instantanée maximale :

$$i_{max} = \begin{cases} I\sqrt{2} & \text{si } 0 \\ \text{ou} & \\ I\sqrt{2} \sin(2\pi/3 - \varphi) & \text{si } \pi/6 < \varphi < \pi \end{cases} \dots\dots\dots(1.22)$$

Et pour valeur instantanée minimale :

$$i_{min} = \begin{cases} I\sqrt{2} \sin(2\pi/3 - \varphi) & \text{si } 0 < \varphi < 5\pi/6 \\ \text{ou} & \\ -I\sqrt{2} & \text{si } 5\pi/6 < \varphi < \pi \end{cases} \dots\dots\dots(1.23)$$

Le courant d'entrée a pour valeur moyenne:

$$i_{moy} = \frac{3}{\pi} I\sqrt{2} \cos(\varphi) \dots\dots\dots(1.24)$$

### 1.9.2.3 Courant dans les interrupteurs

Le courant dans l'interrupteur commandé  $T_1$ , par exemple, a pour expression lors du débit sur une charge inductive :

$$i_{T1} = \begin{cases} I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) & \text{pour } \varphi < \omega t < \pi \\ \text{ou} & \\ 0 & \text{pour } \pi < \omega t < 2\pi + \varphi \end{cases} \dots\dots\dots(1.25)$$

On en déduit:

- La valeur maximale:

$$i_{T1\max} = \begin{cases} I\sqrt{2} & \text{pour } 0 < \omega t < \pi/2 \\ \text{ou} & \\ I\sqrt{2} \sin(\varphi) & \text{pour } \pi/2 < \omega t < \pi \end{cases} \dots\dots\dots(1.26)$$

- La valeur moyenne:

$$i_{T1\text{moy}} = I\sqrt{2} \frac{[1 + \cos(\varphi)]}{2\pi} \dots\dots\dots(1.27)$$

• Le courant dans la diode commandé  $D_1$ , par exemple, a pour expression lors du débit sur charge inductive:

$$i_{D1} = \begin{cases} I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) & \text{pour } 0 < \omega t < \varphi \\ \text{ou} & \\ 0 & \text{pour } \varphi < \omega t < 2\pi \end{cases} \dots\dots\dots(1.28)$$

D'où:

- Sa valeur maximale :

$$i_{D1\max} = \begin{cases} I\sqrt{2} \sin(\varphi) & \text{pour } 0 < \varphi < \pi/2 \\ \text{ou} & \\ I\sqrt{2} & \text{pour } \pi/2 < \varphi < \pi \end{cases} \dots\dots\dots(1.29)$$

- Sa valeur moyenne :

$$i_{D1\text{moy}} = I\sqrt{2} \frac{[1 - \cos(\varphi)]}{2\pi} \dots\dots\dots(1.30)$$

Les tensions maximales aux bornes des interrupteurs sont comme suit :

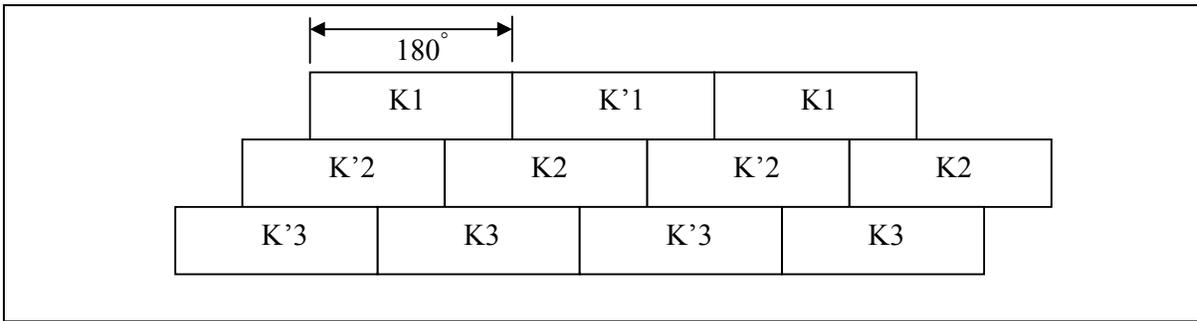
$$V_{T\max} = -V_{D\max} = U \dots\dots\dots(1.31)$$

### 1.9.3. Stratégies de commande

#### 1.9.3.1. Commande 180°

Lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec la commutation d'ouverture de l'interrupteur situé sur le même bras, on parle dans ce cas, d'un onduleur de type 180°, **Figure 1.19**.

Pour le premier bras de l'onduleur, l'interrupteur  $K_1$  est fermé pendant une demi-période (180°), et  $K'_1$  est fermé pendant l'autre demi de la période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, on applique la même procédure, mais avec un décalage de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$  par rapport au premier bras [1], [4].

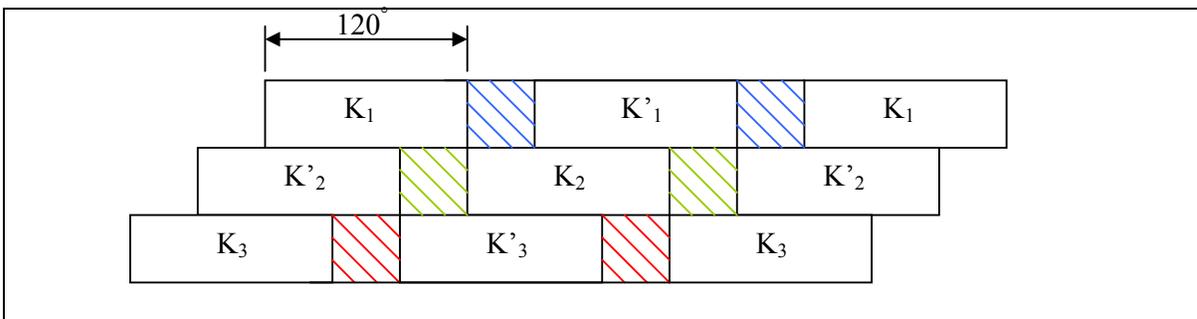


**Figure 1.18** : Commande 180°

En appliquant ce type de commande pour l'onduleur, on obtient un système de tensions alternatives triphasées caractérisées par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

#### 1.9.3.2. Commande 120°

Dans ce cas la **Figure 1.20**, la commande de fermeture d'un interrupteur ne coïncide plus avec la commande d'ouverture de l'interrupteur placé sur le même bras, on parle dans ce cas d'un onduleur de type 120°.



**Figure 1.19** : Commande 120°

Avec cette technique de commande, Chaque interrupteur fonctionne pendant  $120^\circ$ , telle que la séquence est  $K_1, K_2$  puis  $K_3$  successivement. De même pour les interrupteurs  $K'_1, K'_2$  et  $K'_3$  avec un décalage de  $60^\circ$  par rapport à  $K_1, K_2, K_3$ .

### 1.9.3.3. Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les tensions obtenues aux bornes du récepteur (la charge) pour les onduleurs triphasés conventionnels présentent plusieurs harmoniques, il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour ce la on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce contexte, nous savons bien qu'avec la possibilité d'avoir des transistors de puissance à un coût moindre il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant du moteur, et par la conséquence, la minimisation des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les ondulations du couple [2], [3].

En fait l'onduleur de tension à MLI est toujours choisi pour avoir une réponse rapide et des performances élevées. Dans ce type d'onduleur, la tension redressée alimentant l'onduleur peut être fixée par l'utilisation d'un redresseur à diodes. Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur en utilisant la technique MLI. Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La manipulation de nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie d'un onduleur à MLI présente deux avantages importantes à s'avoir :

- Repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge.
- Elle permet de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.

En effet, les deux stratégies de modulation les plus utilisées en boucle ouverte pour un onduleur de tension triphasé sont la modulation sinusoïdale et la modulation vectorielle :

#### 1.9.3.3.1. Modulation sinusoïdale (MLIS)

Cette stratégie est héritée des techniques analogiques. Elle consiste à calculer la largeur d'une impulsion de manière à obtenir la tension de référence en moyenne sur une période de commutation. Elle repose sur la génération des signaux de commande en comparant deux ondes ; la première triangulaire d'amplitude fixe et de fréquence très élevée ; appelée porteuse ou onde de modulation. La deuxième sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence  $f$  qui détermine la fréquence de la tension de sortie ; appelée référence. Les instants de commutation sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux. Le réglage en amplitude et en fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est défini par le coefficient de réglage en tension (représentant le

rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de la porteuse), et l'indice de modulation (donnant le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence) [3], [5].

#### **1.9.3.3.2. Modulation vectorielle (SVM)**

L'utilisation des technologies numériques permet le recours à des stratégies de modulation triphasée spécifiques, non déduites des techniques analogiques initialement conçues en monophasé. Parmi ces technologies numériques on trouve la modulation vectorielle (Space Vector Modulation). Qui représente la méthode de modulation ou de commande la plus adoptée au contrôle des machines à courant alternatif beaucoup plus les machines asynchrones.

En effet, contrairement à la modulation sinusoïdale, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur. Mais elle traite les signaux directement dans le plan diphasé de la transformée de Concordia. Donc le principe de base de cette modulation consiste à reconstruire le vecteur de tension de sortie de l'onduleur à partir des huit vecteurs de tension correspondant aux huit états possibles de l'onduleur de tension [7].

### **1.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie sur les onduleurs, sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement, leurs principales applications et nous avons présenté les différentes structures des onduleurs.

Nous avons consacré notre étude aux onduleurs de tension et principalement ceux en pont triphasé et les différentes stratégies de commande d'un onduleur triphasé.

# Chapitre 02

## *Modélisation bond graph de l'onduleur*

## 2.1. Introduction

L'outil Bond-Graph est un langage graphique multidisciplinaire et de forme unique, parfois appelé aussi Graphe à liens ou Graphe de liaisons. Il a été introduit par (H. Paynter) en 1961, est formalisé par (D. Karnopp, R. Rosenberg, 1975,1983), (J. Thoma, 1975, 1990). Les bonds-graphs sont développés depuis le début des années 1990, c'est une représentation graphique d'un système physique de type (électrique, mécanique, hydraulique,...) qui représente les transferts d'énergie dans les systèmes. Les Bonds-Graphs sont basés sur le principe de la conservation de la puissance. Les liens d'un Bond-Graph sont des symboles qui représentent soit des flux d'énergie, soit des flux d'information. Comparés à une autre représentation visuelle du système en schéma de bloc, les Bonds-Graphs présentent plusieurs avantages :

- Ils distinguent les flux d'énergie des flux d'information.
- Puisqu'ils reposent sur le principe de la conservation de l'énergie, ils rendent impossible d'insérer de l'énergie inexistante dans le système.
- Ils mettent en évidence la causalité entre les efforts (tension, force, pression) et les flux (courant, vitesse, débit). Cette causalité est rajoutée une fois que le schéma initial a été construit. Ce qui permet entre autre, de détecter des phénomènes modélisés qui ne sont pas physiques tels qu'imposer un courant dans une bobine ...etc.
- Comme chaque lien représente un flux bidirectionnel, les systèmes qui produisent des contre-efforts (ex: force électromotrice des moteurs) qui agissent sur le système se représentent sans ajout de boucle de contre réaction.

La modélisation d'un système physique par Bond-Graph ne nécessite pas l'écriture de lois générales de conservation. Elle repose essentiellement sur la caractérisation des phénomènes d'échanges de puissance dissipées et stockées au sein du système. Le modèle bond-graph se situe entre le système physique et les modèles mathématiques classiques (matrices de transfert, équations d'état). Le modèle peut être considéré comme un modèle de connaissance pour la simulation dont le but est de fournir les réponses du système à des oscillations connues, soit directement, soit à partir du bond-graph, soit à partir des équations mathématiques qui en sont déduites. Une autre démarche consiste à considérer le modèle bond-graph comme un modèle à part entière, constituant un outil d'aide à la modélisation, à l'analyse et à le diagnostic grâce à sa structure causale. La modélisation par bond-graph d'un système physique permet d'obtenir une représentation graphique indépendante du domaine étudié [8].

La méthodologie de la modélisation par bond-graph est réalisée en quatre étapes :

- Bond-Graph à mot.

- Modèle Bond-Graph.
- Causalité.
- Mise en équation.

Il existe aussi quelques Bonds-Graphs, que nous verrons plus loin. Où le produit flux et effort n'est pas une puissance. Ils sont appelés Pseudo Bond-Graph, et sont utilisés principalement pour la modélisation des phénomènes rencontrés en génie des procédés (hydraulique, thermique et chimique) [10], [12].

La modélisation par bond-graph des systèmes à structure électrique ou mécanique a connu beaucoup de progrès par contre, la modélisation des convertisseurs électriques de l'électronique de puissance, ou tout simplement en électrotechnique reste encore un domaine ouvert en raison de la complexité de ces phénomènes [11]. Leur modélisation nécessite en conséquence une approche unifiée et capable de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'états [13]. L'application de cette approche unifiée pour la modélisation en électrotechnique est justifiée principalement par le fait que, par opposition à la modélisation de connaissance classique. On peut affiner le modèle en ajoutant ou en supprimant des éléments bond graphs en fonction des hypothèses simplificatrices [16].

La construction d'un modèle bond-graph est réalisée en trois étapes qui sont :

- Décomposition du système à modéliser en sous systèmes.
- Reproduction graphique de tous les phénomènes physiques pris en compte dans l'hypothèse de la modélisation.
- Ecriture des lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées [15], [16], [18].

## 2.2. Éléments bond graph

### 2.2.1. Représentation de l'outil Bond graph

Il y a deux types de représentation de la méthodologie bond-graph :

#### 2.2.1.1. Représentation des transferts de puissance

On peut représenter le système physique sous forme bond-graph à mots. Dans chaque système fermé, il y a non seulement conservation de l'énergie, mais aussi une continuité de puissance. On représente le flux d'énergie entre deux systèmes **A** et **B** en liaison, par un lien de puissance, désigné par le symbole visible **Figure 2.1** qui caractérise le bond (ou lien) du Bond-Graph. Le sens de la demi-flèche correspond à la direction de la puissance transferts entre **A** et **B** [8], [11], [18].

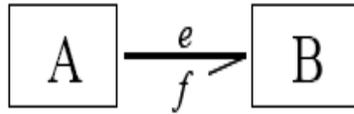


Figure 2.1 : Bond graph : transfert de puissance de A vers B

**2.2.1.2. Les variables mises en jeu**

Les variables mises en jeu dans la modélisation par Bond-Graph sont :

- **Variables de puissance :**

La puissance échangée  $P$  s'exprime par le produit de deux variables effort ( $e$ ) et flux ( $f$ )

[9], [16], et nous avons :

$$P = e.f \dots\dots\dots(2.1)$$

Par convention, sur un lien de puissance, le flux ( $f$ ) est toujours représenté du coté de la demi flèche, comme suit :

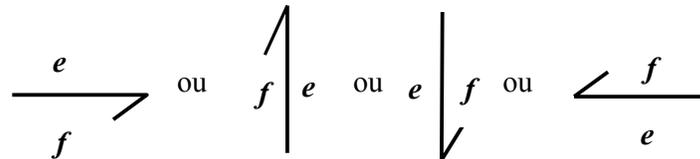


Figure 2.2 : Représentation générale d'un bond

- **Variables d'énergie :**

Elles sont définies par les relations intégrales suivantes :

- 1- L'énergie  $E(t)$  qui passe à travers le bond est donnée par :

$$\begin{cases} E(t) = \int_0^t e(\tau)f(\tau) d\tau \\ E(0) = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(2.2)$$

- 2- Le moment généralisé (impulsion)  $p(t)$  est donné par :

$$\begin{cases} p(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau \\ p(0) = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(2.3)$$

- 3- Le déplacement généralisé  $q(t)$  est donné par :

$$\begin{cases} q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \\ q(0) = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(3.4)$$

Dans le **Tableau 2.1** sont indiquées les variables généralisées pour quelques domaines physiques [16].

Domaine	Effort	Flux	Moment (impulsion)	Déplacement
	$e(t)$	$f(t)$	$p(t)$	$q(t)$
Mécanique de rotation	Couple [ $N.m$ ]	Vitesse angulaire [ $Rad / s$ ]	Impulsion angulaire [ $N.m.s$ ]	Angle [ $Rad$ ]
Mécanique de translation	Force [ $N$ ]	Vitesse linéaire [ $m / s$ ]	Impulsion [ $N.s$ ]	Distance [ $m$ ]
Electrique	Tension [ $Volt$ ]	Courant [ $Ampère$ ]	Flux magnétique [ $Weber$ ]	Charge électrique [ $Colomb$ ]
Hydraulique	Pression [ $Pa$ ]	Débit volumique [ $m^3 / s$ ]	Impulsion de pression [ $Pa / s$ ]	Volume [ $m^3$ ]
Thermique	Température [ $K^0$ ]	Flux de chaleur [ $J / s$ ]	-	Energie calorifique [ $J$ ]
Thermodynamique	Température [ $K^0$ ]	Flux d'entropie [ $J / (K^0.s)$ ]	-	Entropie [ $J / K$ ]
Chimique	Potentiel chimique [ $J / mole$ ]	Débit molaire [ $mole / s$ ]	-	Masse molaire [ $mole$ ]

**Tableau 2.1** : Equivalences des variables généralisées dans des domaines physiques

### 2.2.2. Les éléments bond graph

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

- Catégorie d'éléments passifs : **R**, **C** et **I**;
- Catégorie d'éléments actifs : **Se**, **Sf**;
- Catégorie d'éléments de jonction : **0**, **1**, **TF**, **GY**.
- Les détecteurs (**De**, **Df**).

#### 2.2.2.1. Eléments passifs

L'élément **R** est dissipatif d'énergie, sous forme de chaleur. Les éléments **I** et **C** sont des éléments de stockage d'énergie. Les éléments passifs consomment la puissance et la transforment soit en énergie dissipée comme chaleur dans les éléments **R**, soit en énergie stockée dans les éléments **I** (énergie cinétique) et **C** (énergie potentielle). L'orientation de la demi-flèche est donc entrante vers l'élément. Le tétraèdre de Paynter présenté par la **Figure 3.4**, illustre les

relations entre les variables généralisées en passant par les éléments passifs ( $R, I, C$ ). Ceux-ci peuvent être de caractéristique linéaire ou non linéaire. Dans cette section, nous ne parlons que des éléments passifs ayant un seul lien de puissance entrant. Nous les appelons éléments passifs mono-ports [11], [16].

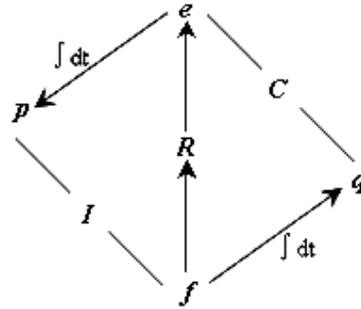


Figure 2.3 : Tétraèdre de Paynter

✓ **L'élément résistif  $R$  :**

Cet élément est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant l'effort  $e$  et le flux  $f$ . La représentation générale de cet élément est donnée par la Figure 2.4.

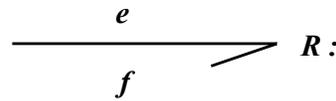


Figure 2.4 : Élément  $R$

La loi qui le caractérise est :

$$\Phi_R = (e, f) = 0 \dots\dots\dots(2.5)$$

Si l'élément  $R$  est linéaire la relation entre l'effort  $e$  et le flux  $f$  est :

$$e(t) = R \cdot f(t) \dots\dots\dots(2.6)$$

Si l'élément  $R$  est non linéaire la relation entre l'effort  $e$  et le flux  $f$  est :

$$e(t) = \Psi_R \cdot f(t) \dots\dots\dots(2.7)$$

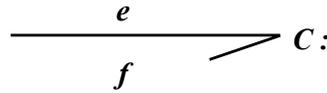
On trouve plusieurs cas si l'élément  $R$  est linéaire :

- Cas mécanique de translation :  $F(t) = b \cdot V(t)$   $b$  : frottement.
- Cas mécanique de rotation :  $\tau(t) = B \cdot \omega(t)$   $B$  : frottement.
- Cas électrique :  $U(t) = R_1 \cdot I(t)$   $R_1$  : résistance, diode.
- Cas hydraulique :  $P(t) = R_2 \cdot Q(t)$   $R_2$  : résistance pneumatique.

**R** est un élément dissipatif d'énergie et la puissance qui lui est transmise est transformée en chaleur.

○ **L'élément capacitif C :**

L'élément **C** modélise tout phénomène liant l'effort **e** au déplacement **q**. La représentation générale de cet élément est :



**Figure 2.5 :** Elément C

La loi qui caractérise l'élément **C** s'écrit :

$$\Phi_C(e, q) = 0 \dots\dots\dots(2.8)$$

Si l'élément **C** est linéaire la relation entre l'effort et le flux est :

$$q(t) = C \cdot e(t) \dots\dots\dots(2.9)$$

Si l'élément **C** est non linéaire on trouve :

$$q(t) = \psi_C \cdot e(t) \dots\dots\dots(2.10)$$

On obtient la forme intégrale suivante :

$$q(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t f(\tau) d\tau \dots\dots\dots(2.11)$$

Ce qui donne en linéaire :

- **En mécanique de translation :**

$$F(t) = K \cdot x(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t V(\tau) d\tau \dots\dots\dots(2.12)$$

Avec **K** : raideur d'un ressort.

- **En mécanique de rotation :**

$$\tau(t) = K_1 \cdot \theta(t) = K_1 \cdot \int_0^t \theta(\tau) d\tau \dots\dots\dots(2.13)$$

Avec **K<sub>1</sub>**: raideur d'un ressort de torsion.

- **En électrique :**

$$U(t) = \frac{q}{C_1} = \frac{1}{C_1} \cdot \int_0^t I(\tau) d\tau \dots\dots\dots(2.14)$$

Avec **C<sub>1</sub>** : capacité d'un condensateur.

- **En hydraulique :**

$$P(t) = \rho \cdot g \cdot H = \frac{\rho \cdot g}{S} \cdot \int_0^t Q(\tau) d\tau \dots\dots\dots(2.15)$$

Avec  $C = S/\rho$ .  $g$  : capacité associée à une cuve.

L'élément  $C$  transforme la puissance qui lui est fournie en énergie stockée par la loi :

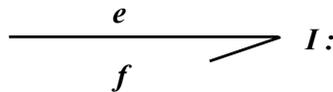
$$e = \psi_C \left( \int f dt \right) = \psi_C(q) = e(q) \dots \dots \dots (2.16)$$

Donc l'équation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$E_C = \int_{q_0}^{q_f} e(q) dq + E(q_0) \dots \dots \dots (2.17)$$

○ **L'élément inertiel I :**

Il modélise tout phénomène physique liant le flux  $f$  au moment  $p$ . La représentation graphique de cet élément est donnée par la **Figure 3.8**.



**Figure 2.6 :** Élément  $I$

L'équation caractéristique de l'élément  $I$  est donnée par :

$$\Phi_I(p, f) = 0 \dots \dots \dots (2.18)$$

Si l'élément  $I$  est linéaire la relation entre l'effort  $e$  et le flux  $f$  est :

$$p(t) = I \cdot f(t) \dots \dots \dots (2.19)$$

Si l'élément  $I$  est non linéaire on trouve :

$$p(t) = \psi_I \cdot f(t) \dots \dots \dots (2.20)$$

La forme de  $f(t)$  obtenue est une forme intégrale qui est donnée par l'expression:

$$f(t) = \frac{1}{I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \dots \dots \dots (2.21)$$

Qui ce donne en linéaire les cas suivants:

• **En mécanique de translation :**

$$F(t) = M \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow V(t) = \frac{1}{M} \cdot \int_0^t F(\tau) d\tau, \quad M : \text{masse en mouvements.}$$

• **En mécanique de rotation :**

$$\tau(t) = J \cdot \frac{dW}{dt} \Rightarrow W(t) = \frac{1}{J} \cdot \int_0^t \tau(\tau) d\tau, \quad J : \text{inertie en rotation.}$$

- **En électrique :**

$$U(t) = L \cdot \frac{dI}{dt} \Rightarrow I(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t U(\tau) d\tau, \quad L : \text{inductance d'une bobine.}$$

- **En hydraulique :**

$$P(t) = \frac{\rho \cdot \ell}{S} \cdot S \cdot \frac{dQ}{dt} \Rightarrow Q(t) = \frac{1}{\rho \cdot \ell} \int_0^t P(\tau) d\tau,$$

$I = \rho \cdot \ell / S$  : inertie d'un fluide en mouvement.

L'élément *I* est caractérisé par la loi :

$$f = \Psi_I \left( \int e dt \right) = \Psi_I(p) = f(p) \dots \dots \dots (2.22)$$

L'équation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$E_I = \int_{p^0}^{p^f} f(p) dp + E(p_0) \dots \dots \dots (2.23)$$

**2.2.2.2. Eléments actifs (source d'effort et source de flux)**

Les éléments actifs sont des sources d'effort ou de flux. Ces dernières peuvent avoir une valeur indépendante de toute influence extérieure (par exemple la pesanteur) symbolisées par *Se* pour des sources d'effort ou *Sf* pour des sources de flux, ou modulée selon un signal (symbolisées par *MSe* ou *MSf*). Ces éléments fournissent la puissance (positive ou négative) au système.

Par conséquent, le sens de la demi-flèche sortant de l'élément est obligatoire comme la **Figure 2.7** :



**Figure 2.7** : Représentation graphique des sources *Se, Sf*

**2.2.2.3. Détecteurs**

Nous utilisons les détecteurs d'effort *De* et de flux *Df* pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance; nous utilisons donc un lien de type signal (une flèche) :



**Figure 2.8** : Représentation graphique des détecteurs  $De$ ,  $Df$

Le tableau suivant résume les éléments bond-graphs (actifs, passifs et détecteurs) avec des exemples dans quelques domaines physiques.

Eléments	symboles	Lois génériques	Exemples
Eléments actifs	$Se$	$e$ indépendant de $f$	Générateur de tension ou de couple, pesanteur, pompe à pression constante.
	$Sf$	$f$ indépendant de $e$	Générateur de courant ou pompe à débit constant
Eléments passifs	$R$	$\Phi_R(e, f) = 0$	Résistance électrique, diode, frottement restriction thermique.
	$C$	$\Phi_c(e, q) = 0$	Ressort, condensateur, accumulateur, réservoir de stockage, élasticité.
	$I$	$\Phi_i(p, f) = 0$	Masse, inductance, inertie.
Détecteurs	$De$ $Df$	-	Voltmètre, manomètre. Ampèremètre, débitmètre, tachymètre.

**Tableau 2.2** : Eléments de la base du bond-graph

#### 2.2.2.4. Eléments de jonction

Ces quatre éléments sont notés  $\theta$ ,  $I$ ,  $TF$  et  $GY$ . Ils servent à coupler les éléments précédemment présentés  $R$ ,  $C$  et  $I$  et composent la structure du modèle correspondant à l'architecture du système étudié. Ils sont conservatives de puissance.

- **Jonction  $\theta$**  :

La jonction  $\theta$  sert à associer les éléments soumis au même effort et correspond à des éléments en parallèle, les relations constitutives de cette jonction sont:

$$\begin{cases} e_1 = e_2 = \dots = e_n & \text{(Caratéristique de la jonction 0)} \\ \sum_{i=1}^n a_i e_i = 0 & \text{(Bilan des puissances)} \end{cases}$$

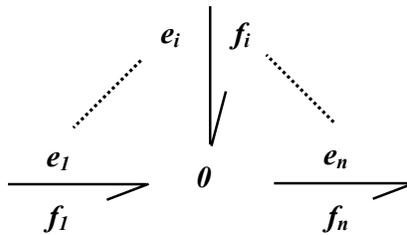


Figure 2.9 : Représentation de la jonction 0

▪ **Jonction 1 :**

La jonction 1 sert à associer les éléments soumis au même flux et correspond à des éléments en série, les relations constitutives de cette jonction sont:

$$\begin{cases} f_1 = f_2 = \dots = f_n & \text{(Caratéristique de la jonction 1)} \\ \sum_{i=1}^n a_i f_i = 0 & \text{(Bilan des puissances)} \end{cases}$$

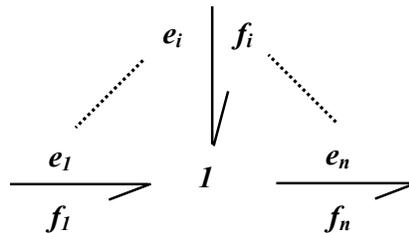


Figure 2.10 : Représentation de la jonction 1

▪ **Transformateur TF :**

La jonction TF est un élément à deux ports, l'un en entrée et l'autre en sortie, utilisé pour modéliser les éléments transformateurs d'énergie. Si le module  $m$  n'est pas constant, le transformateur est dit moduler et est noté par MTF, la variable  $m$  peut alors être continue ou booléenne.

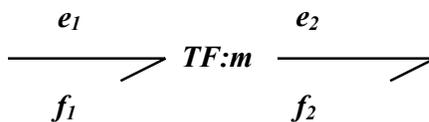


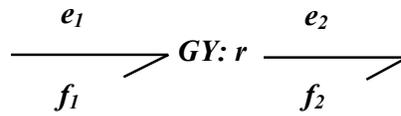
Figure 2.11 : Représentation de la jonction TF

L'équation constitutive de cette jonction est donnée par :

$$\begin{cases} e_1 = m.e_2 \\ f_2 = m.f_1 \end{cases} \dots\dots\dots (2.24)$$

▪ **Gyrateur *GY*:**

La jonction *GY* est un élément à deux ports l'un d'entrée et l'autre de sortie, noté aussi Transducteur *TD*. Si le rapport du gyrateur *r* est variable le gyrateur est dit modulé, noté (*MGY*).



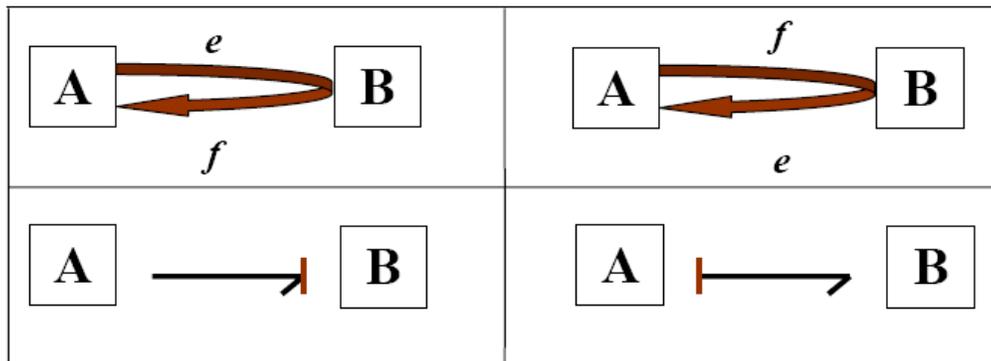
**Figure 2.12 :** Représentation de la jonction *GY*

L'équation constitutive de cette jonction est donnée par:

$$\begin{cases} e_1 = r \cdot f_2 \\ e_2 = r \cdot f_1 \end{cases} \dots\dots\dots(2.25)$$

**2.2.3. Notion de causalité**

Les éléments bond-graph permettent de représenter l'architecture d'un système physique où apparaissent les échanges de puissance entre les éléments. Le modèle mathématique sera représenté par l'ensemble des équations mathématiques déduites directement du modèle bond-graph par les équations constitutives (des jonctions et des éléments). L'une des propriétés importantes du modèle bond-graph est la causalité : en effet les bond-graphs permettent de définir la structure de calcul et d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. Ceci est un avantage évident sur les représentations graphiques. Pour décrire les relations de "cause à effet" et écrire les lois associées aux éléments sous forme causale mathématiquement solvable, il faut d'abord déterminer les variables qui sont imposées aux éléments (les données) et celles qu'imposent ces éléments (les conséquences). Dans un bond-graph, cette propriété est représentée par un trait orthogonal au lien, appelé trait causal [8], [10].



**Figure 2.13 :** Causalités en bond-graph et le schéma bloc

### 2.2.3.1. Analyse de la causalité

L'analyse des propriétés causales des graphes offre directement plusieurs types d'enseignement :

- L'existence d'une boucle causale de gain +1 sans passer par des éléments dynamiques  $I$  ou  $C$ , ou en passant par des éléments dynamiques dont les termes en  $s$  s'annulent n'est pas acceptable (terme nul au dénominateur de la fonction de transfert). Il faut transformer certaines causalités initialement intégrales en causalités dérivées pour éliminer le problème.
- Le cas où la causalité n'est pas unique conduit à l'obtention d'équations implicites qui peuvent provoquer des problèmes numériques lors de la simulation. Il faut rendre explicites ces équations, en cassant la boucle algébrique entre les éléments impliqués en ajoutant des éléments dynamiques qui fixent la propagation de causalité. Dans notre exemple, il suffit d'introduire un élément  $C$  à la jonction 0 pour fixer la causalité des éléments  $R$ . En fait, les éléments ajoutés correspondent souvent à des phénomènes physiques parasites négligés dans la modélisation [12], [18].

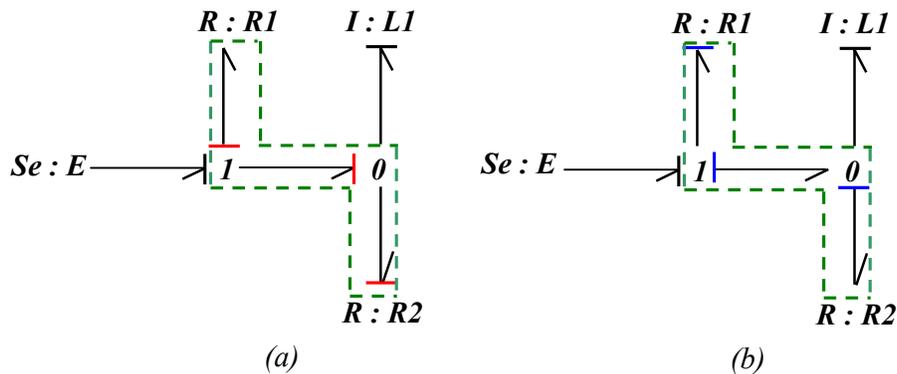


Figure 2.14 : Exemple de non unicité de la causalité entre les éléments  $R1$  et  $R2$

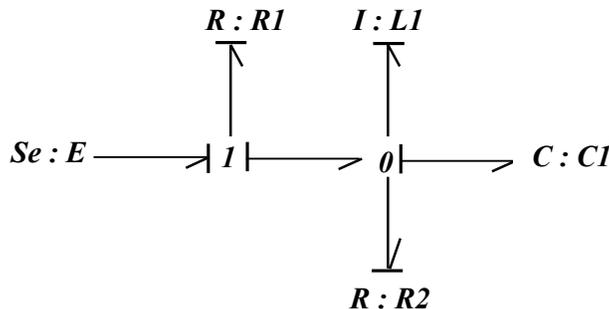


Figure 2.15 : Causalité unique

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

### 2.2.3.2. Procédure d'affectation de la causalité

Après avoir affecté la causalité aux jonctions et aux éléments dans un modèle, nous obtenons un bond-graph causal. A partir de ce dernier, nous pouvons [16]:

- Affecter la causalité (*obligatoire*) aux sources et aux **R** non linéaires et répercuter sur l'environnement.
- Mettre les **I** et **C** en causalité intégrale préférentielle et répercuter sur l'environnement.
- Affecter les causalités aux jonctions **0**, **1**, **TF**, **GY**.
- Affecter les causalités aux éléments R linéaires en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.
- En cas de conflit à une jonction, rechercher l'élément **I** ou **C** cause du conflit et le mettre en causalité dérivée.
- Affecter une causalité aux détecteurs.

#### **Remarque :**

Le trait causal est placé près (respectivement loin) de l'élément ou jonction pour lequel l'effort (respectivement le flux) est une donnée [12].

Dans le **Tableau 2.3**, sont représentées les règles d'affectation de causalité.

Elément	Causalité	Symbole	Loi générique
Eléments actifs	obligatoire	$Se \longrightarrow$	$e$ imposé par $Se$
		$Sf \longleftarrow$	$f$ imposé par $Sf$
Eléments passifs	intégrale	$\longrightarrow I$	$f_I = \psi_I(\int e_I(\tau)d\tau)$
		$\longleftarrow C$	$e_C = \psi_C(\int f_C(\tau)d\tau)$
	dérivée	$\longleftarrow I$	$e_I = \psi_I^{-1}\left(\frac{df_I}{dt}\right)$
		$\longrightarrow C$	$f_C = \psi_C^{-1}\left(\frac{de_C}{dt}\right)$
	arbitraire (cas linéaire) ou non arbitraire (cas non linéaire)	$\longleftarrow R$	$e_R = Rf_R$ $e_R = \psi_R(f_R)$
		$\longrightarrow R$	$f_R = \frac{1}{R} e_R$ $f_R = \psi_R^{-1}(e_R)$
Jonctions	restriction de causalité		$\begin{cases} f_1 = f_i \\ \vdots \\ f_n = f_i \end{cases}$ $a_i e_i = -a_1 e_1 - \dots - a_n e_n$
			$\begin{cases} e_1 = e_i \\ \vdots \\ e_n = e_i \end{cases}$ $a_i f_i = -a_1 f_1 - \dots - a_n f_n$
			$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$
			$e_2 = m^{-1} e_1$ $f_1 = m^{-1} f_2$
			$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$
			$f_1 = r^{-1} e_2$ $f_2 = r^{-1} e_1$

Tableau 2.3 : Règles d'affectation de la causalité

2.2.4. Matrice de transfert

Si le système possède  $m$  entrées et  $p$  sorties, le modèle est une matrice de transfert sous la forme :

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ \vdots \\ y_p(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{D(s)} \begin{bmatrix} N_{11}(s) & \dots & N_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{p1}(s) & \dots & N_{pm}(s) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_1(s) \\ \vdots \\ U_m(s) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.26)$$

### 2.2.5. Fonction de transfert

L'équation de transfert est obtenue, dans le cas linéaire, en appliquant la règle de Mason.  
Soit :  $e$  : variable d'entrée et  $Y$  : variable de sortie.

$$\frac{y(s)}{e(s)} = \frac{\sum_i T_i(s).D_i(s)}{D(s)} \dots\dots\dots(3.27)$$

Avec :

$$D(s)=1-\sum_i B_i+\sum_{i,j} B_i.B_j-\sum_{i,j,k} B_i.B_j.B_k+\dots\dots$$

$\sum_i B_i$  : La somme des gains des boucles causales.

$\sum_{i,j} B_i.B_j$  : La somme des gains des boucles causales disjointes prises 2 à 2.

$T_i(s)$  : Gain de la  $i^{\text{ème}}$  chaîne d'action (cofacteur).

$D_i(s)$  : se calcule comme  $D(s)$  quand on a enlevé du bond-graph la  $i^{\text{ème}}$  chaîne d'action du bond-graph [6].

### 2.2.6. Equation d'état

#### 2.2.6.1. Etablissement de l'équation d'état

L'équation d'état peut s'établir à partir d'un modèle bond-graph où les variables d'état sont les variables d'énergie associées aux éléments  $C$  et  $I$  [10], [18]:

$$x = \begin{bmatrix} p_I \\ q_C \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.28)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} e_I \\ f_C \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.29)$$

#### 2.2.6.2. Propriétés

- Le vecteur d'état n'apparaît pas sur le **BG** mais seulement sa dérivée.
- L'ordre du système correspond à la dimension du vecteur d'état  $x$ , il est égal au nombre d'éléments  $C$  et  $I$  en causalité intégrale.
- Si parmi les  $n$  éléments  $C$  et  $I$ , il y a  $nd$  éléments en causalité dérivée donc la dimension du vecteur d'état est égale à  $(n-nd)$ ,  $c$ 'est l'ordre du système [10].

#### 2.2.7. Procédure (méthode systématique)

Pour les éléments  $C$  et  $I$  en causalité intégrale, l'équation d'état est sous forme [10] :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ Y = Cx + Du \end{cases} \dots\dots\dots(3.30)$$

Où  $u$  est l'entrée et  $y$  est la sortie.

Pour obtenir cette équation d'état on peut procéder d'une manière systématique :

- Ecrire les lois de structure aux jonctions, et les lois associées aux éléments, en tenant compte de la causalité.
- Combiner ces lois pour obtenir les dérivées des variables d'état en fonction de ces dernières et des entrées.

## 2.3. Procédure de construction de modèle bond-graph

### 2.3.1. Système électrique

- Affecter une jonction  $\theta$  a chaque potentiel.
- Choisir un sens de circulation de courant par branche.
- Insérer sur des jonctions  $I$  entre chaque jonction  $\theta$  si un élément  $R$ ,  $I$ ,  $C$  ou une source est situé entre les deux potentiels correspondants.
- Affecter les sens de transmission de la puissance en reliant les jonctions par des liens.
- La jonction  $\theta$  correspondant au potentiel de référence ou potentiel nul ou (masse électrique) peut généralement être simplifiée.
- Simplifier si possible.

#### Exemple :

Considérons le système suivant [11]:

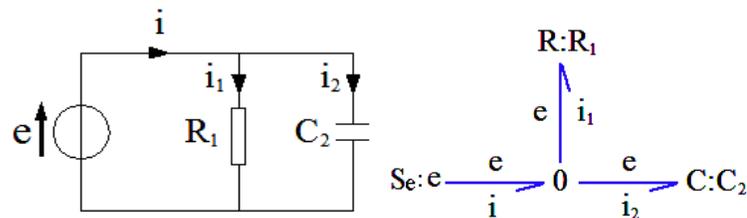


Figure 2.16 : Système électrique et modèle bond-graph équivalent

### 2.3.2. Système mécanique

- Choisir un repère qui servira pour l'orientation des variables.
- Rechercher toutes les vitesses différentes. Placer une jonction  $I$  par vitesse différente. y attacher les éléments correspondants.
- Exprimer les relations entre vitesse. Placer une jonction  $\theta$  par relation entre les jonctions  $I$ .

- Placer les sources.
- Relier les jonctions par des liens, en respectant le sens de transfert de la puissance.
- Supprimer les jonctions  $I$  associées à une vitesse nulle, ainsi que tous les liens qui y sont attachés.
- Simplifier si possible.

**Exemple :**

Considérons le système suivant [11] :

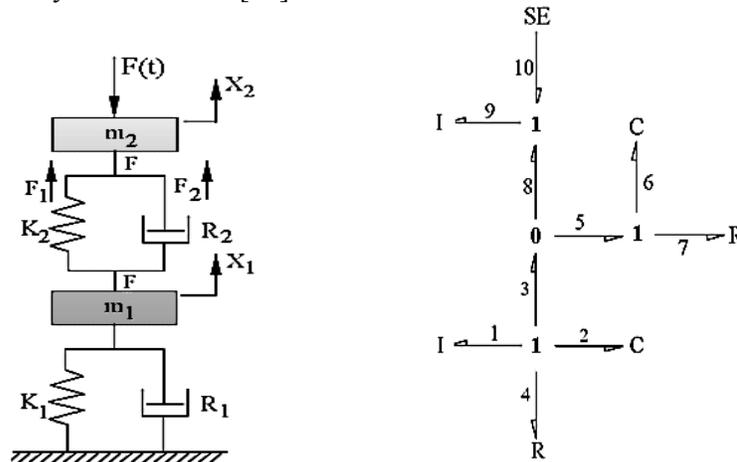


Figure 2.17 : Schéma mécanique et Modèle bond-graph équivalent

**Exemple :**

Considérons le système électromécanique suivant [11] :

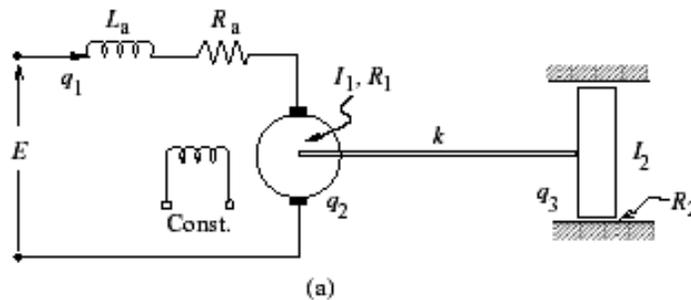
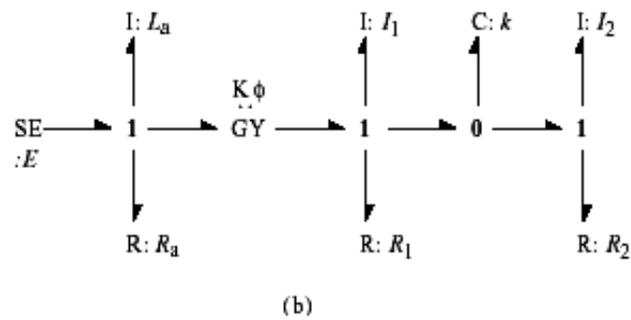


Figure 2.18 : Système électromécanique

La **Figure 2.19** donne le modèle bond-graph correspondant :



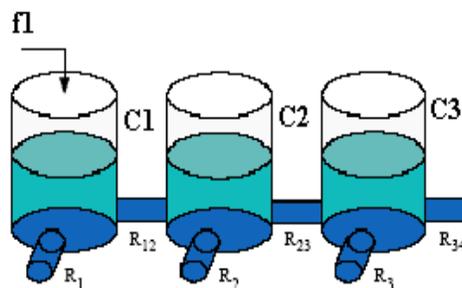
**Figure 2.19** : Modèle bond-graph équivalent

### 2.3.3. Système hydraulique

- Fixer le sens de circulation du fluide.
- Rechercher tous les nœuds de pressions différentes. Placer une jonction  $\theta$  pour chaque nœud.
- Placer une jonction  $I$  entre deux jonctions  $\theta$  et y attacher les éléments soumis à la différence de pression correspondante.
- Relier les jonctions par des liens. Choisir une pression de référence (pression atmosphérique) et supprimer les jonctions  $\theta$  qui y sont associées.
- Simplifier si possible.

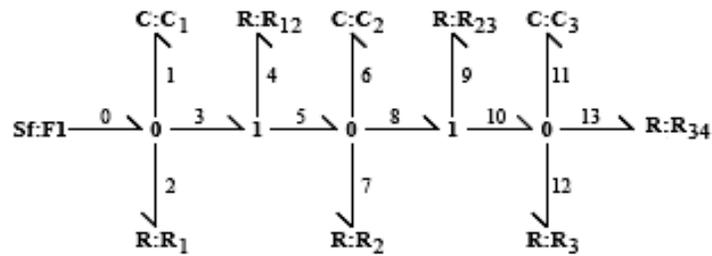
#### Exemple :

Considérons le système suivant [10] :



**Figure 2.20** : Système hydraulique

La **Figure 2.21** donne le modèle bond-graph correspondant :

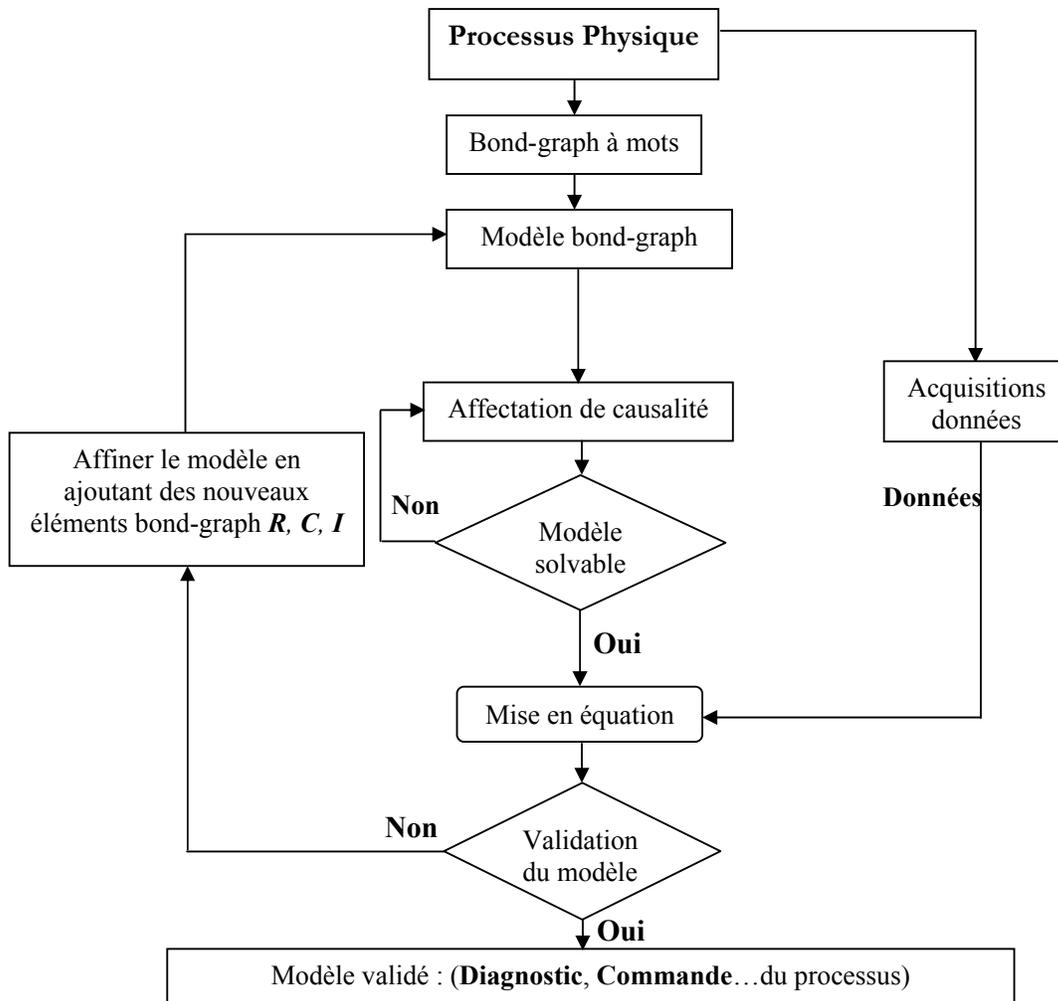


**Figure 2.21** : Modèle bond-graph équivalent

## 2.4. Modélisation par bond-graph

### 2.4.1. Organigramme de modélisation

L'organigramme suivant montre les étapes à suivre pour l'obtention d'un modèle bond-graph :



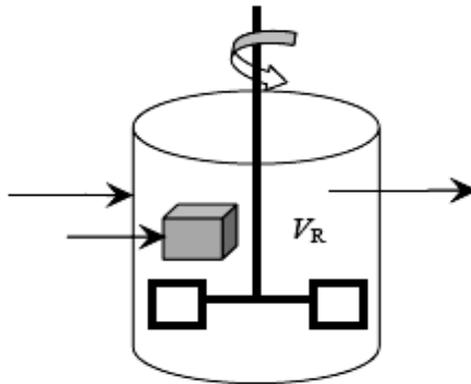
**Figure 2.22** : Les étapes de modélisation par bond graph

### 2.4.2. Niveaux de modélisation

Les méthodes de modélisation pour la représentation des systèmes sont nombreuses. Toutefois, chaque méthode de modélisation peut être classée selon son niveau de langage. On distingue quatre niveaux de modélisation qui peuvent être représentées par le bond graph [8], [13].

#### 2.4.2.1. Le niveau technologique

Il est présenté par le bond-graph à mots. Ce niveau de modélisation consiste à construire l'architecture du système par l'assemblage des différents sous-systèmes. Les éléments de base sont des processus technologiques simples. Dans ce type de modélisation, les langages de modélisation conduisent à une description normalisée sous forme de schémas technologiques. Cette description donne une modélisation facile à mettre en œuvre indiquant uniquement comment c'est réalisé. L'adéquation du modèle avec la réalité n'est pas vérifiée et les phénomènes physiques ne sont pas pris en considération que l'on appelle modèle type "boite noire" comme indiqué à la **Figure 2.23** :



**Figure 2.23** : Modélisation technologique

#### 2.4.2.2. Le niveau physique

Le niveau physique consiste à analyser les phénomènes physiques qui seront pris en considération dans la modélisation et reproduire l'architecture du système graphiquement, avec un langage unique pour tous les domaines physiques où apparaissent les échanges de puissance entre les éléments. A ce niveau, la modélisation s'appuie sur une description énergétique des phénomènes physiques. C'est à ce niveau qu'intervient la prise en compte des bilans d'énergies, de matières, de quantités de mouvements.

#### 2.4.2.3. Le niveau mathématique

Il consiste à écrire les lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées. Les éléments de base de ce niveau sont des opérateurs

mathématiques: intégrateurs, dérivateurs et les fonctions algébriques. Ce modèle est sous forme d'équations ou de matrice de transfert dans le cas linéaire. Les modèles obtenus sont linéaires ou non linéaires, et la propriété de non linéarité du modèle peut être identifiée comme liée à la structure et/ou aux composants. Les équations d'état sont déduites directement en parcourant le bond-graph.

#### 2.4.2.4. Le niveau algorithmique

Il est lié directement au traitement de l'information. Les concepts manipulés sont donc des concepts informatiques. Ce niveau nous indique comment sont calculés les modèles. Les notions de causalité jouent un rôle important à ce niveau et permettent d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. La résolution numérique d'une intégrale est plus robuste que celle d'une dérivée, et insensible aux bruits. Ce niveau nous permet donc de représenter l'algorithme du modèle et la manière dont celui-ci doit être calculé. Il faut toutefois noter qu'en électrotechnique une analyse fonctionnelle permet de déduire une causalité naturelle ou les processus de stockage d'énergie et une causalité quelconque pour les processus de transformation et de transport d'énergie modélisés en bond-graph.

Les avantages présentés par la modélisation bond-graph sont :

- Unicité du langage dans les domaines physiques.
- Mise en évidence des relations de cause à effet dans le modèle.
- Evolution du modèle bond-graph.
- Outil d'analyse, on peut aussi avoir des renseignements sur les propriétés structurelles du système (commandabilité, observabilité, surveillabilité).

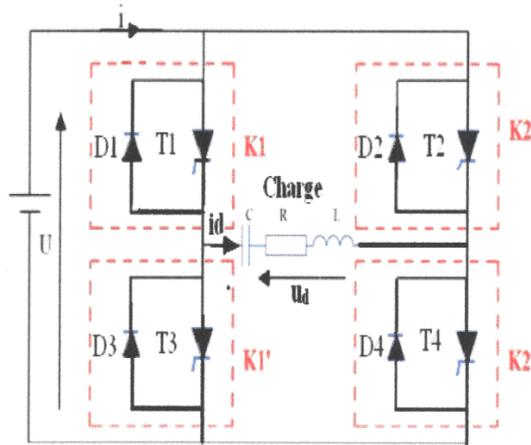
## 2.5. L'onduleur

L'onduleur est un appareil statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). Cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteur), il existe deux types onduleurs le monophasé et le triphasé.

## 2.6. Modélisation de l'onduleur monophasé par bond-graph

### 2.6.1. Schéma de principe

Le schéma de principe d'un onduleur monophasé est donné par la **Figure 2.24**.



**Figure 2.24** : Schéma de principe de l'onduleur monophasé

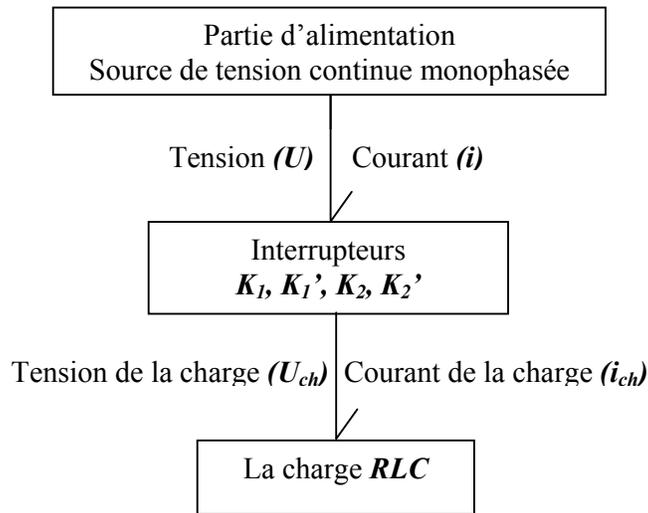
Le système à modéliser est un onduleur monophasé comme le montre la **Figure 2.24**, qui représente un système de conversion d'énergie. Le courant entrant à l'onduleur sous forme continue est sortant à la charge sous forme alternative à travers des interrupteurs.

### 2.6.2. Bond graph à mots

C'est la première étape de modélisation par bond-graph, il consiste à décomposer le système à modéliser en sous-systèmes. A chacun entre eux sont associés les phénomènes pris en compte dans la modélisation. L'interconnexion des composants est assurée par des variables de puissance. Cette représentation est appelée bond-graph à mots. Elle constitue l'étape technologique de la modélisation [16].

- Nous avons représenté dans la **Figure 2.25**, le bond-graph à mots où les transferts de puissance par des liens qui portent les variables du bond graph car les variables de puissance utilisées sont : le courant  $i$ , la tension  $U$ , (le choix des variables de puissance n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser).

Le bond-graph à mots de l'onduleur monophasé est représenté par la **Figure 2.25** :



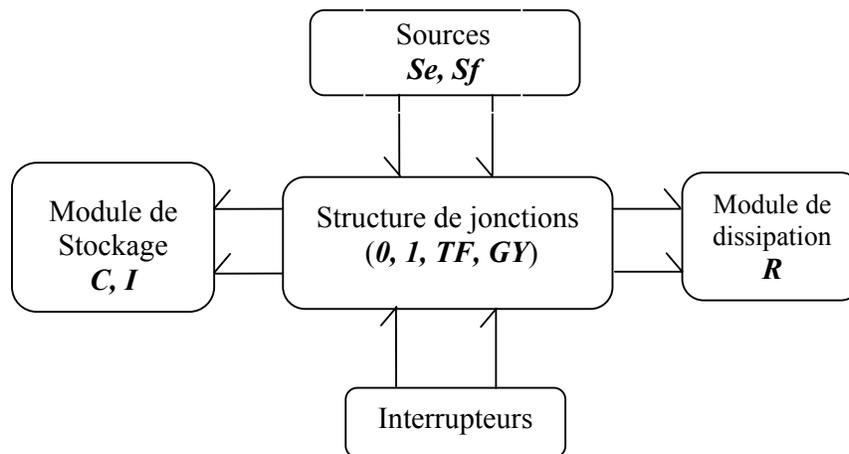
**Figure 2.25** : Bond-graph à mots de l'onduleur monophasé.

Les phénomènes d'échange de puissance interviennent entre les deux phases (DC) et (AC) à travers des interrupteurs (commutateurs).

### 2.6.3. Modèle bond-graph

Cette étape décrit les phénomènes qui sont pris en considération dans la modélisation et permet de représenter graphiquement tous ces phénomènes. Nous devons en conséquence poser les hypothèses de modélisation, pour recenser les phénomènes à modéliser.

Le bond graph est un outil de modélisation avantageux car il met en évidence à la fois la structure et le comportement du système étudié. Le modèle bond graph peut être représenté vectoriellement comme le représente la **Figure 2.26** [10] :



**Figure 2.26** : Représentation vectorielle d'un modèle bond graph de l'onduleur



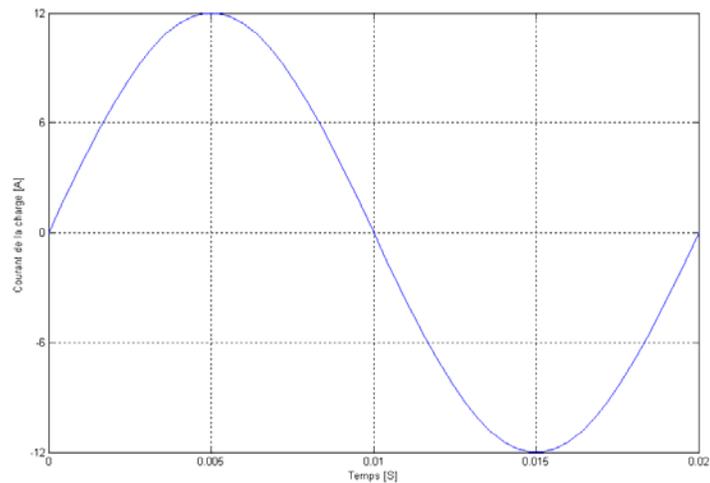
<i>phénomène</i>	<i>Variable</i>	<i>Valeur</i>
Tension d'alimentation continue	$U [V]$	150
Résistance de la charge	$R_c [\Omega]$	12
Inductance de la charge	$L_c [H]$	0.05
Capacité de la charge	$C_c [F]$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Résistance de fil	$R [\Omega]$	0.001

**Tableau 2.4** : Caractéristiques de l'onduleur monophasé [18]

La simulation des systèmes en général réside dans la représentation des paramètres et dans notre cas et de suivre l'évolution de courant et tension de la charge. Les résultats de simulation sont illustrés par la figure représentée ci-dessous :

#### 2.6.4.2. Variation de courant de la charge

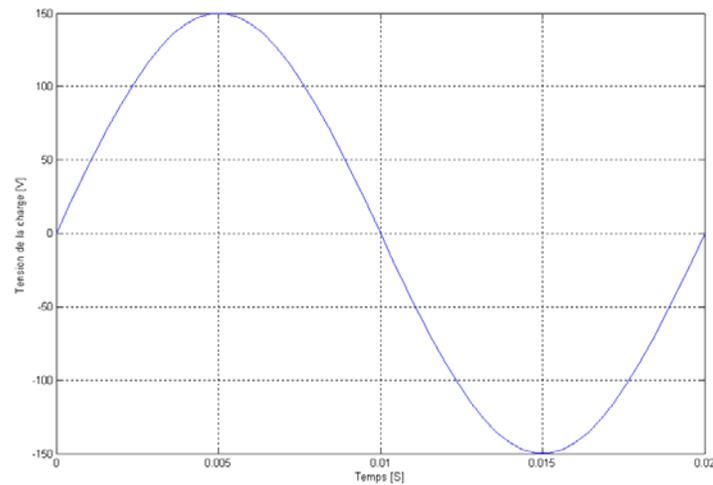
La **Figure 2.28** montre la variation de courant de la charge :



**Figure 2.28** : Courant de la charge

#### 2.6.4.3. Variation de tension de la charge

La **Figure 2.29** montre la variation de tension dans la charge :



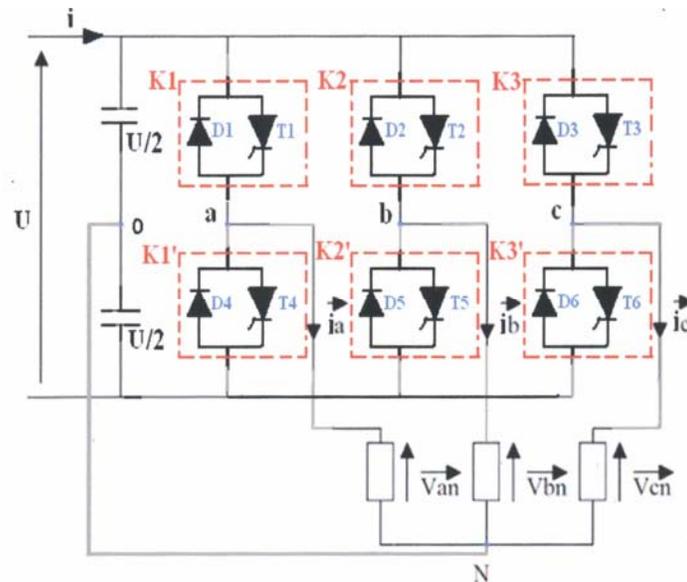
**Figure 2.29** : Tension de la charge

Les résultats de simulation obtenus sont très proches des résultats réels dans l'onduleur monophasé, en a remarqué que la courbe de courant et de tension est purement sinusoïdale.

## 2.7. Modélisation de l'onduleur triphasé par bond-graph

### 2.7.1. Schéma de principe

Le schéma de principe d'un onduleur triphasé est donné par la **Figure 2.29**.



**Figure 2.30** : Schéma de principe de l'onduleur triphasé

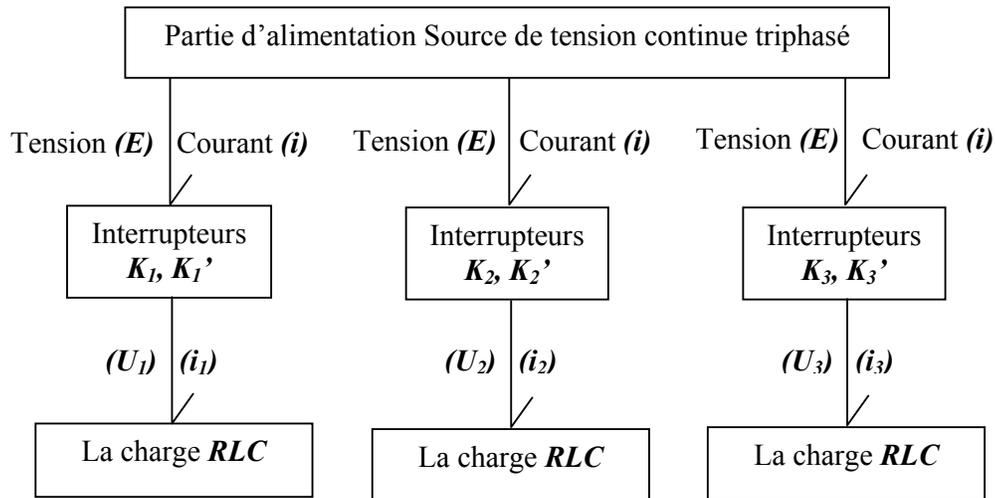
Le système à modéliser est un onduleur triphasé comme le montre la **Figure 2.30**, qui représente un système de conversion d'énergie. Le courant entrent à l'onduleur sous forme continu est sortent à la charge sous forme alternatif à travers des interrupteurs.

### 2.7.2. Bond-graph à mots

C'est la première étape de modélisation par bond-graph, il consiste à décomposer le système à modéliser en sous-systèmes. A chacun entre eux sont associés les phénomènes pris en compte dans la modélisation. L'interconnexion des composants est assurée par des variables de puissance. Cette représentation est appelée bond-graph à mots. Elle constitue l'étape technologique de la modélisation [16].

- Nous avons représenté dans la **Figure 2.31**, le bond-graph à mots où les transferts de puissance par des liens qui portent les variables de bond-graph car les variables de puissance utilisées sont : le courant  $I$ , la tension  $U$ , (le choix des variables de puissance n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser).

Le bond-graph à mots de l'onduleur triphasé est représenté par la **Figure 2.31** :



**Figure 2.31** : Bond graph à mots de l'onduleur triphasé.

### 2.7.3. Modèle bond graph

Cette étape décrit les phénomènes qui sont pris en considération dans la modélisation et permet de représenter graphiquement tous ces phénomènes. Nous devons en conséquence poser les hypothèses de modélisation, pour recenser les phénomènes à modéliser.

Le bond graph est un outil de modélisation avantageux car il met en évidence à la fois la structure et le comportement du système étudié. Le modèle bond graph peut être représenté vectoriellement comme le représente la **Figure 2.26**. [10]

Dans le système étudié, nous avons les variables c'est le courant et la tension

Le modèle bond graph détaillé est donné par **Figure 2.33**.

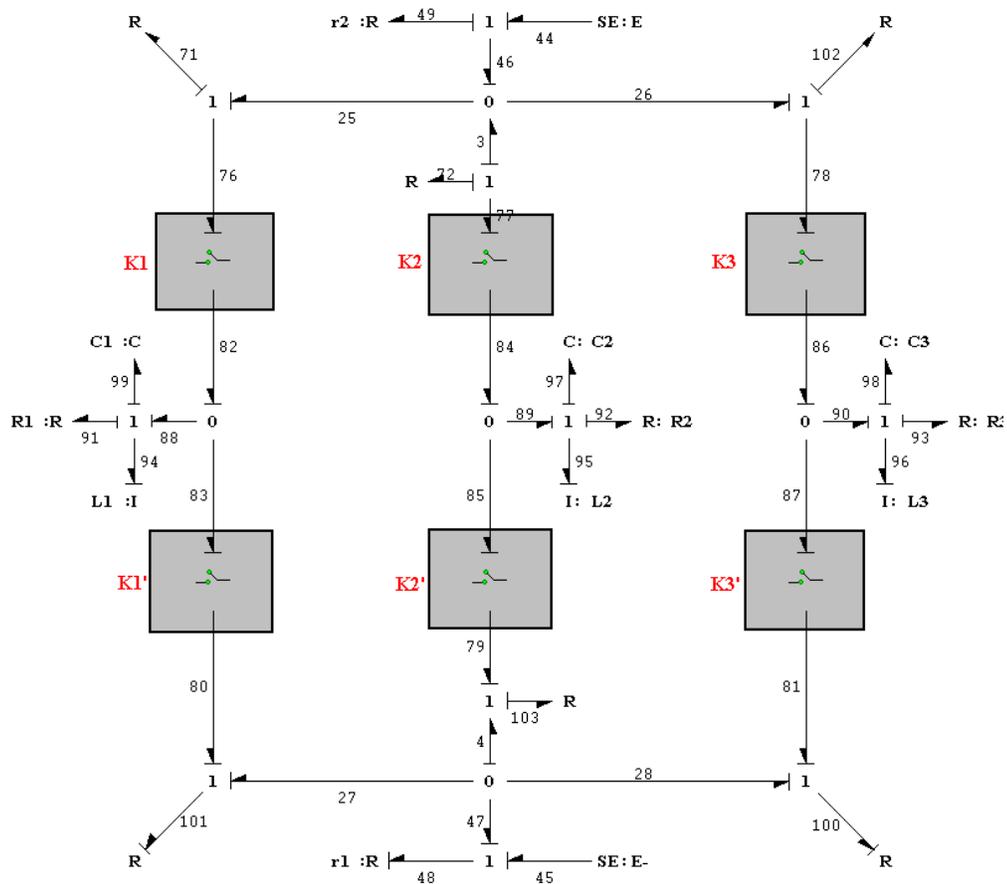


Figure 2.32 : Modèle bond graph de l'onduleur triphasé

#### 2.7.4. Application

La simulation d'un système en temps continu est généralement obtenu par un algorithme d'intégration numérique, l'utilisateur doit choisir celui qui est le mieux adapté : méthode, pas de calcul et précision. Le temps de simulation ne dépend pas de la complexité du système, du choix et des réglages de l'algorithme d'intégration numérique et des performances de la machine informatique qui exécute la simulation.

##### 2.7.4.1. Application sur un modèle bond graph

#### Cahier de charges

On a utilisé le logiciel Symbols 2000 avec le cahier de charge du **Tableau 2.6** :

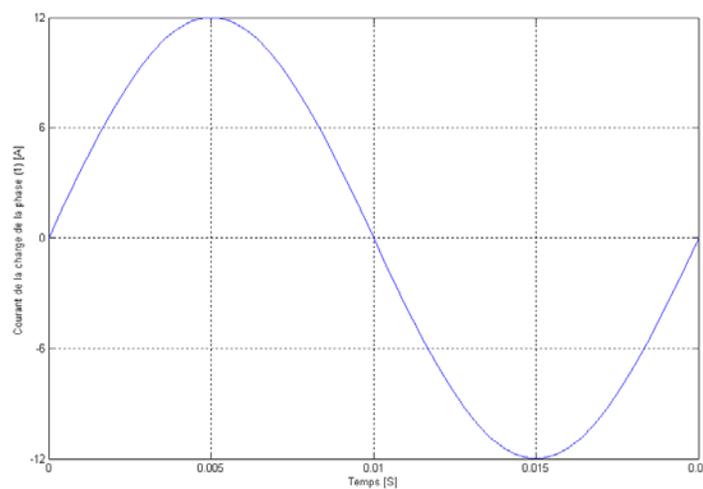
<i>phénomène</i>	<i>Variable</i>	<i>Valeur</i>
Tension d'alimentation continue	$E [V]$	150
Résistance de la charge	$R_c [\Omega]$	12
Inductance de la charge	$L_c [H]$	0.05
Capacité de la charge	$C_c [F]$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Résistance de fil	$R [\Omega]$	0.001

**Tableau 2.5** : Caractéristiques de l'onduleur triphasé [18]

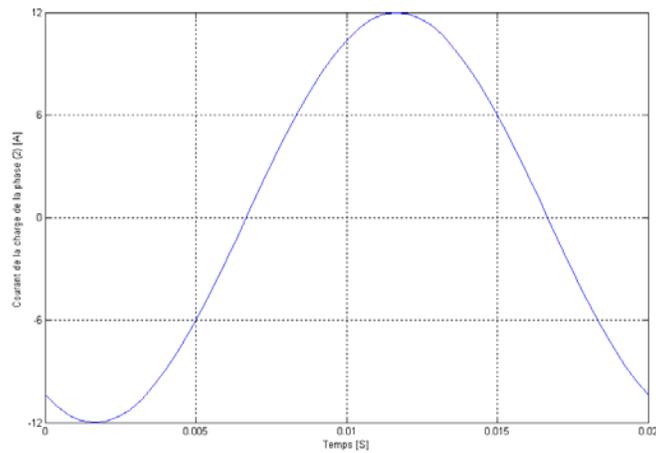
La simulation des systèmes en général réside dans la représentation des paramètres et dans notre cas et de suivre l'évolution de courant et tension de la charge dans chaque phase. Les résultats de simulation sont illustrés par les figures représentées ci-dessous :

#### 2.7.4.2. Variation de courant de la charge

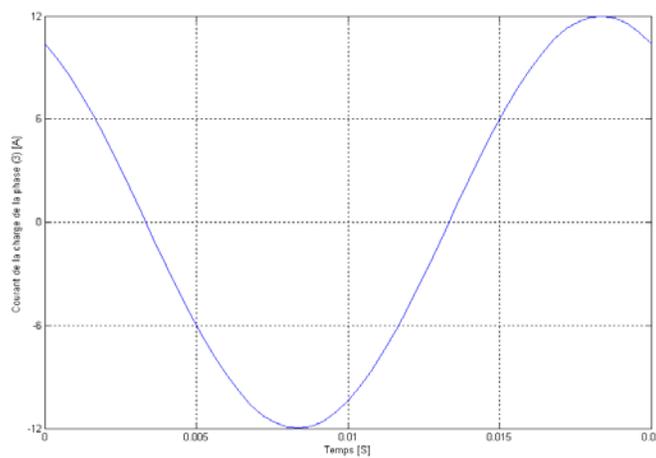
La **Figure 2.34**, **2.35** et **2.36** montrent la variation de courant dans la charge de chaque phase :



**Figure 2.33** : Courant de la charge de la phase (1)



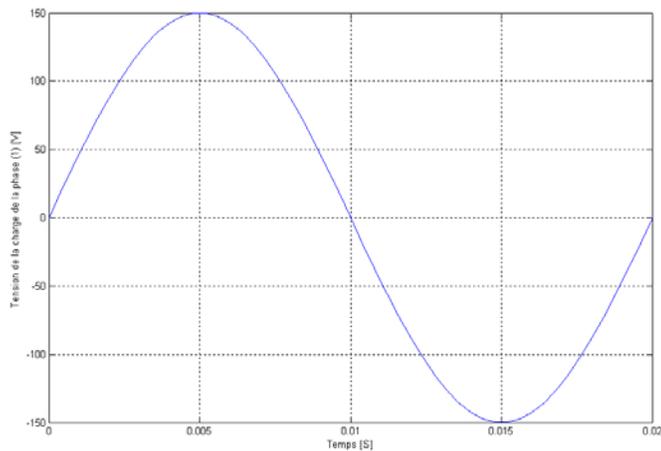
**Figure 2.34** : Courant de la charge de la phase (2)



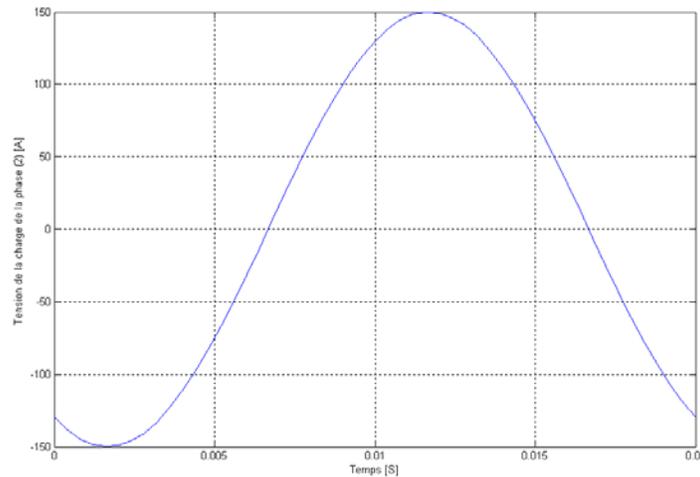
**Figure 2.35** : Courant de la charge la phase (3)

### 2.7.4.3. Variation de tension de la charge

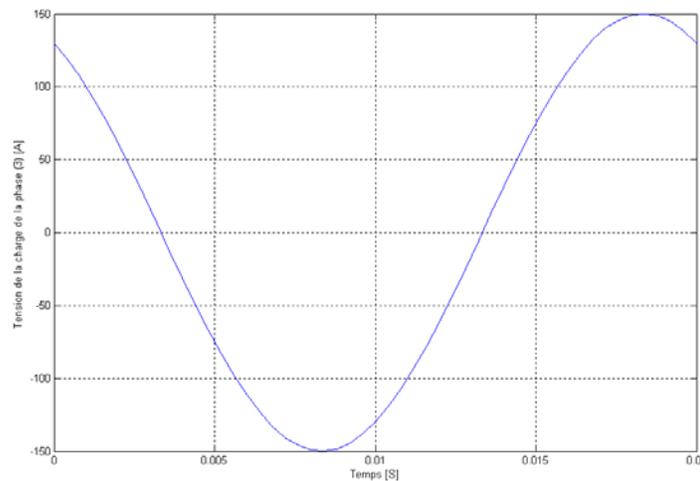
La **Figure 2.37**, **2.38** et **2.39** montrent la variation de tension de la charge de chaque phase :



**Figure 2.36** : Tension de la charge de la phase (1)



**Figure 2.37** : Tension de la charge de la phase (2)



**Figure 2.38** : Tension de la charge de la phase (3)

Les résultats de simulation obtenus sont très proches des résultats réels dans l'onduleur triphasé en a remarqué que les courbes des courants et des tensions est purement sinusoïdales et déphasés entres eux avec un angle de  $120^\circ$ .

## 2.8. Conclusion

L'outil bond graph, relativement récent, commence à être utilisé de manière significative dans le monde industriel, et plus particulièrement dans les entreprises du secteur automobile. Le besoin croissant de modèles physiques pluridisciplinaires, la nécessité vitale de capitaliser les connaissances dans des bibliothèques de modèles, et le souci nouveau de prendre en compte dès la conception les aspects commande et sûreté de fonctionnement laissent envisager un développement important des applications industrielles de cet outil qui dégage l'ingénieur des vicissitudes de la modélisation mathématique et lui permet de s'intéresser aux propriétés structurelles et parfois génériques de ce qu'il conçoit.

Ce chapitre a été effectué par : modélisation par bond-graph, et réalisée une simulation sur un modèle bond-graph ‘‘méthode graphique’’ d’un onduleur monophasé et triphasé. On a vu que l'onduleur est un élément essentiel assure la conversion d’énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). Ce modèle a été validé par l’utilisation du logiciel SYMBOLS. Les résultats ont été satisfaisants. L’outil bond graph et le logiciel SYMBOLS se sont avérés des moyens puissants et commodes pour ce projet qui comprenait de la modélisation, la simulation et l’analyse des résultats.

# Chapitre 03

[1] *Diagnostic de  
l'onduleur*

### 3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des outils de surveillance par une approche classique puis il montre l'intérêt des modèles bond graphs pour le diagnostic des processus industriels. Le diagnostic présente un grand intérêt dans l'industrie afin d'assurer une large fiabilité, une productivité optimale et une grande sûreté de fonctionnement des systèmes technologiques. L'apparition de défaillances sur un processus incite à la mise en œuvre des systèmes de surveillance dont l'objectif est de fournir, à tout instant, l'état du processus ou de ces organes constitutifs.

### 3.2. Terminologies de base

On donne quelques définitions pour la suite de notre travail [21]:

Un **processus industriel** est un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de façon à former une entité unique accomplissant ou pouvant accomplir une activité clairement définie (onduleur, moteur électrique, générateur de vapeur,...).

Un **composant industriel** est un organe technologique destiné à former une partie du processus industriel (interrupteur, pompe, vanne,...).

L'**architecture du système** est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau de composants industriels.

Il comprend les outils d'agencement général destinés au positionnement et à la localisation des équipements, à la création et la gestion des lignes d'acheminement et à la création et la gestion des boucles d'instrumentation et de contrôle. Ce diagramme est utilisé pour une description visuelle de l'architecture du processus. Il utilise des symboles pour représenter les composants technologiques et des lignes pour leur connexion. Les entrées et sorties peuvent représenter des flux d'énergies (des variables de puissance comme courant électrique, tension électrique,...) pour les composants technologiques et des flux d'information pour les capteurs et les correcteurs [26].

Le **terme faute (défaut)** est généralement défini comme une déviation d'une variable observée ou d'un paramètre calculé par rapport à sa valeur fixée dans les caractéristiques attendues du processus lui-même, des capteurs, des actionneurs ou de tout autre équipement.

Il existe une progression dans la sévérité des défauts: naissant, passager, permanent et catastrophique. Les défauts sont classés selon leur origine en [22]:

- **Défauts capteurs:** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. On classe ces défauts en fonction de leur type en: biais, dérive, modification

du gain de mesure, valeurs aberrantes, blocage du capteur à une valeur atteinte ou à une coupure électrique du capteur.

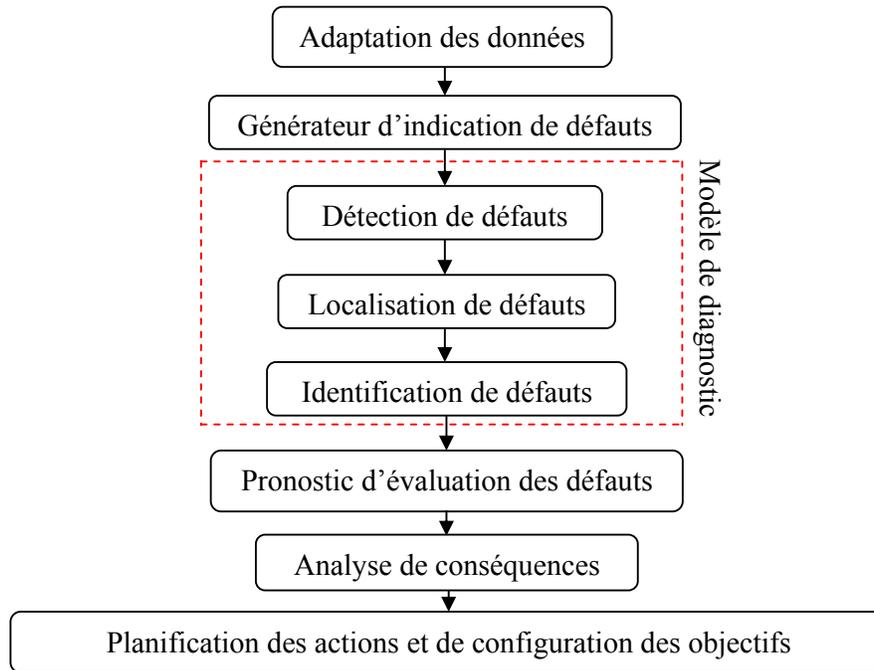
- **Défauts d'actionneurs** : Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et la sortie.
- **Défauts du processus physique** : Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure ou des paramètres du modèle.
- **Défauts du système** (ou de l'algorithme de commande) : Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.
- **Une défaillance** : C'est une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions fixées.
- **Une panne** : C'est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.
- **Une erreur** : Elle est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et la vraie valeur spécifiée par un capteur étalon ou jugée (par un modèle) théoriquement correct.
- **Les symptômes** : Ils sont les traductions d'un changement d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.
- **Les contraintes** : Elles sont les limitations imposées par la nature (lois physiques) ou l'opérateur.
- **Un résidu** (indicateur de faute) : Il exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle.

### 3.3. Diagnostic des systèmes : concepts généraux

Le diagnostic signifie simplement la détermination des composants défaillants au sein d'un système physique. Le principe général du diagnostic consiste à vérifier la cohérence entre un comportement observé et un comportement attendu. Le diagnostic d'un système est effectué à travers la détection, la localisation et l'identification des défauts.

La détection de défauts consiste à signaler la présence d'un défaut, c'est-à-dire déterminé si l'état courant du système et de ses éléments est normal ou non, en signalant toute déviation par rapport au fonctionnement attendu. Cette tâche est ensuite complétée par celle de la localisation qui doit indiquer quel organe ou quel composant est affecté par le défaut. Enfin, la tâche d'identification a pour objet de caractériser le défaut en durée et en amplitude afin d'en déduire sa sévérité.

Le diagnostic constitue donc une étape d'une procédure plus complète que nous désignons sous le nom de surveillance [19]. La surveillance nécessite la mise en œuvre de nombreuses tâches décrites selon l'organigramme représenté par la **Figure 3.1** :



**Figure 3.1** : Modules d'une procédure de diagnostic

Du point de vue de la détection et de l'isolation des fautes et de la tolérance aux fautes deux types d'informations doivent être proposées à l'opérateur de supervision. Le premier concerne la détection et l'isolation de défauts survenus sur l'installation, et le deuxième indique les moyens de continuer à conduire le processus. Le diagnostic a pleinement conquis sa place surtout pour les processus en électrotechnique.

### 3.4. Les systèmes de surveillance dans un processus de supervision

#### 3.4.1. Classification des méthodes de surveillance

L'amélioration de la sûreté de fonctionnement repose essentiellement sur la surveillance, qui constitue une interface entre l'installation physique et les opérateurs. La surveillance fournit des informations sur l'état de fonctionnement des dispositifs surveillés. Elle valide les informations issues des capteurs et localise les dispositifs défectueux. Le système de surveillance constitue une couche particulièrement importante du système d'information des processus de production automatisés sûrs de fonctionnement. Les données brutes sont des données connues, elles sont constituées de variables de commande et de variables mesurées.

Les algorithmes de surveillance traitent ces données brutes pour produire des données validées et enrichies. Les données validées sont celles dont la véracité a été "prouvée" par le

système. Les algorithmes de diagnostic permettent de compléter la liste des prestations systématiques. Alors, en fonction de la nature des défaillances localisées et de leur importance, des priorités et donc une planification des interventions pourront être établies.

Les algorithmes de surveillances sont en réalité tous basés sur le principe de la redondance des sources d'information. La redondance est obtenue par comparaison des données réelles issues du processus (transmises par les capteurs) et des données théoriques fournies par un type de modèle. Cette comparaison permet de vérifier que l'information obtenue à un instant donné reste conforme à des normes de fonctionnement normal. Le diagnostic se réalise en suivant une procédure qui contient les étapes suivantes :

- **L'acquisition des informations** : Cette opération est destinée à obtenir les informations sur le processus réel à surveiller et celles fournies par la connaissance du système. Elle se réalise à l'aide de capteurs spécialisés.
- **Etape de détection** : On surveille le fonctionnement réel en testant la cohérence entre ce modèle et les observations. Si celles-ci ne vérifient pas les équations du modèle, on n'en déduit que le fonctionnement réel qui n'est pas le fonctionnement normal. Ces changements sont alors détectés et traduits en termes de symptômes ou d'événements. On produit alors une alarme ou un résidu.
- **Décision** : La procédure de décision conduit à définir des seuils qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une non-détection ou une fausse alarme. Si le défaut est "tolérable", le système peut continuer à fonctionner. Si le défaut est conditionnellement tolérable (un interrupteur est défaillant mais il est possible d'utiliser un autre interrupteur installé en parallèle), alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée.
- **Etape de diagnostic** : Dans cette phase, un modèle de mauvais fonctionnement est utilisé selon le même principe pour déterminer la défaillance présente. C'est l'étape de localisation des défaillances. Cette étape se déclenche quand la comparaison ne correspond pas à un état normal de fonctionnement caractérisé par un état de référence et que la procédure de décision a indiqué que c'est une vraie alarme. Lorsque la faute est localisée, il faut alors identifier les causes précises de cette anomalie. On fait alors appel à des signatures répertoriées par les experts et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements.

Le système de surveillance produit également un enrichissement de ces données en générant d'autres données, qui caractérisent l'état de fonctionnement du processus (détection, localisation et diagnostic des défaillances), et qui sont utilisées pour la maintenance, la réparation, la gestion technique. Les prestations de maintenance peuvent être systématiques

(identifiées et prévues dans le temps), ou aléatoires. Dans ce dernier cas, les méthodes d'optimisation et d'ordonnement fournissent des outils d'aide aux opérations de maintenance (planification des entretiens, calcul des taux de défaillance ...).

### **3.4.2. Méthodes de surveillance**

Il existe plusieurs différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des systèmes physiques. Le domaine était très vaste, des choix arbitraires ont été faits. Le but n'est donc pas de faire une synthèse exhaustive de l'existant, mais de montrer la richesse des possibilités qui s'offrent au concepteur de système de diagnostic. Les deux principaux critères de classification des méthodes de surveillance sont le type de connaissance utilisé, et la stratégie de diagnostic. Même s'il faut le souligner, la méthode de diagnostic utilisée dépend fortement du type de modèle, le type de la connaissance a priori sur le système reste le critère principal de classification des méthodes de surveillance.

Les méthodes de surveillance sont principalement basées sur deux approches : les méthodes utilisant des modèles opératoires et celles utilisant des modèles de diagnostic. On les classe souvent en méthodes avec ou sans modèle. On considère toutefois que l'approche dite sans modèle utilise quand même un, même si celui-ci repose sur des descripteurs qui caractérisent le fonctionnement du système observé dans différents modes de fonctionnement (normal, défaillant). L'approche avec modèle, que nous développons surtout par la suite, utilise un modèle opératoire. Bien que la connaissance exprimée par ces modèles puisse se représenter sous des formes très variées, la méthodologie de surveillance est identique, elle utilise l'idée de la redondance qui existe entre la connaissance exprimée par le modèle et celle que portent les données qu'il produit.

#### **3.4.2.1. Les approches de la surveillance sans modèle analytique**

Dans ces approches, on analyse des données fournies par le système qui permettent de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou à l'intelligence artificielle. Contrairement aux techniques utilisées en automatique classique où l'on traite les problèmes numériquement en utilisant surtout les propriétés des équations différentielles. Les problèmes sont alors combinatoires et l'on utilise la logique; on cherche à représenter les connaissances de sens commun, à modéliser la façon dont un individu raisonne. En effet, dans le contexte de la supervision, les données traitées sont très variées (qualitative, logique, analogique, ...) et imprécises (bruit de mesure), ce qui introduit des doutes dans la validité des modèles numériques utilisés dans les techniques à base de modèle. L'approche par reconnaissance de formes des problèmes de surveillance des systèmes se base sur la connaissance d'un ensemble de mesures effectuées sur le processus et des

états de fonctionnement associés. Ces techniques supposent la connaissance a priori de tous les états de fonctionnement, et ne prennent pas en compte l'évolution du système.

#### **3.4.2.1.1. Analyse fréquentielle (Filtrage)**

C'est une première approche du traitement du signal, elle repose sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est bien évidemment très utilisée pour la détection de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire. Le contenu spectral des signaux est utilisé pour détecter des défauts dans les machines électriques. Avec le développement des applications à vitesse variable, les recherches actuelles portent plus particulièrement sur les méthodes adaptées à la caractérisation de signaux non stationnaires : temps-fréquence, temps-échelle. L'analyse du spectre des signaux issus des capteurs permet de déterminer très efficacement l'état de l'installation sous surveillance. Les signaux sont tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de fonctionnement défaillant. Cette approche possède l'avantage d'être relativement simple à mettre en pratique, mais l'inconvénient d'être assez sensible aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt. De plus un échantillonnage fréquent est nécessaire pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence [28], [26].

#### **3.4.2.1.2. Redondance matérielle**

Cette méthode consiste à multiplier physiquement les capteurs critiques d'une installation. Un traitement des signaux issus des éléments redondants effectue des comparaisons et distingue l'élément défectueux en cas d'incohérence. Cette méthode est pénalisante en termes de poids, puissance consommée, volume et coût. Elle est donc essentiellement réservée aux cas où la continuité de service est obligatoire (le nucléaire). En effet, elle apporte l'avantage, une fois la défaillance détectée et localisée, de pouvoir utiliser la partie de l'équipement encore saine mais cette technique ne s'applique généralement que sur des capteurs [33], [35].

#### **3.4.2.1.3. Capteurs spécifiques (capteurs-détecteurs)**

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant. Par exemple, les capteurs d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles [32].

#### **3.4.2.1.4. Réseaux de neurones artificiels (RNA)**

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, l'utilisation de modèle

dit (boîte noire) peut être envisagée. Un *RNA* est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traite l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs [24], [32], [33].

En général, l'utilisation des *RNA* se fait en deux phases. Tout d'abord, la synthèse du réseau est réalisée et comprend plusieurs étapes : le choix du type de réseau, du type de neurones, du nombre de couches, des méthodes d'apprentissage qui permet alors, sur la base de l'optimisation d'un critère, de reproduire le comportement du système à modéliser. Il consiste en la recherche d'un jeu de paramètres et peut s'effectuer de deux manières : supervisée (le réseau utilise les données d'entrée et de sortie du système à modéliser) et non supervisée (seules les données d'entrée du système sont fournies et l'apprentissage s'effectue par comparaison entre exemples) quand les résultats d'apprentissage obtenus par le *RNA* sont satisfaisants, il peut être utilisé pour la généralisation.

#### **3.4.2.1.5. Systèmes d'Inférence Flous**

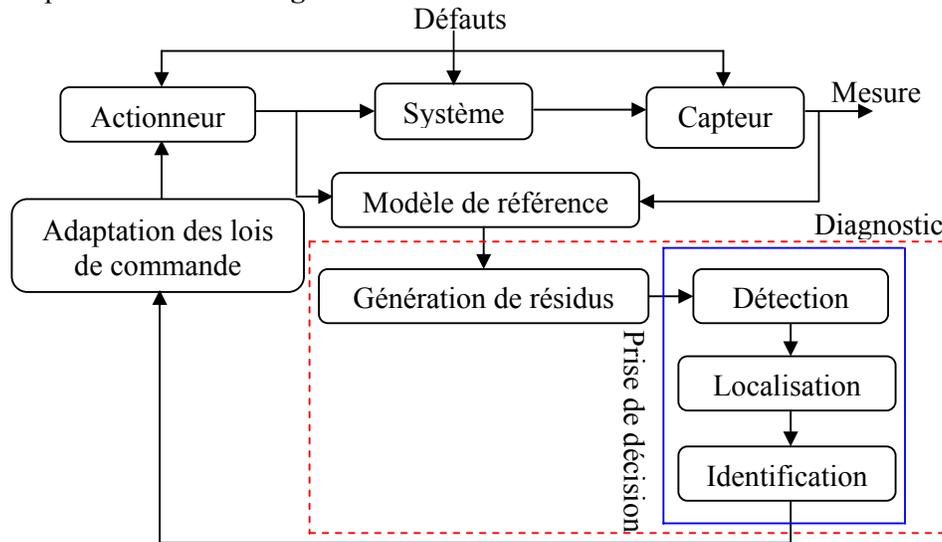
Les applications dans le traitement du signal, la modélisation, la commande, la supervision de procédés et la prise de décision sont en effet autant d'applications qui démontrent la capacité des SIF à traiter des problèmes non linéaires grâce à l'utilisation de connaissances expertes. La structure de base d'un SIF est constituée de [24], [32], [33]:

- Un univers de discours qui contient les fonctions d'appartenance des variables d'entrée/sortie à des classes. Ces fonctions peuvent avoir différentes formes (triangulaires, gaussiennes, ...),
- Une base de connaissance qui regroupe les règles liant les variables d'entrées et de sorties sous la forme (Si...Alors).
- Un mécanisme de raisonnement qui base son fonctionnement sur la logique du modus ponens généralisé.

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

#### **3.4.2.2. Les approches de la surveillance à base de modèle analytique**

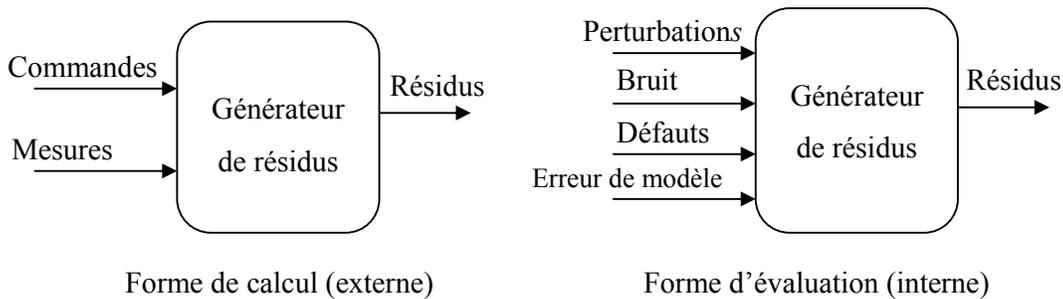
L'opération d'identification est souvent omise ou reléguée aux opérateurs, car elle s'avère alors subsidiaire par rapport aux difficultés qu'elle peut induire [34]. Une procédure de détection et localisation de défauts à base de modèles analytiques peut être décomposée en deux étapes principales désignées sous le nom de 'génération des résidus' et 'prise de décision', selon la représentation de la **Figure 3.2**



**Figure 3.2** : Etape du diagnostic à base du modèle analytique

La première phase concerne la génération de résidus, grandeurs sensibles aux défauts. Elle correspond principalement à la phase de perception et vise à la mise en évidence d'événements qui affectent l'évolution du système et qui traduisent un changement de situation sans préjuger du fait qu'ils soient normaux ou non. Un résidu est une grandeur obtenue explicitement à partir des mesures issues des capteurs et des signaux de commande du système, soit directement (espace de parité), soit indirectement par l'intermédiaire d'estimées (observateurs d'état, estimation paramétrique). L'expression qui permet le calcul d'un résidu en fonction de mesures est appelée forme de calcul ou forme externe. En fonctionnement normal, un résidu doit être idéalement nul, c'est-à-dire indépendant du point de fonctionnement courant. En pratique, il est différent de zéro car il dépend implicitement des perturbations liées à l'environnement, des erreurs de modélisation et bien sûr des défauts. La relation liant le résidu à ces différentes grandeurs est appelée forme d'évaluation ou forme interne. La distinction entre formes de calcul et d'évaluation résulte simplement de la séparation de l'expression analytique d'un résidu en deux parties, l'une parfaitement connue et facile à calculer numériquement, l'autre dépendant des incertitudes modélisant les diverses perturbations agissant sur le système et des défauts à diagnostiquer **Figure 3.3**. La seconde étape d'un module de diagnostic à base de modèle analytique est appelée prise de décision qui regroupe :

- tout particulièrement, les procédures de détection et de localisation qui concernent l'analyse des comportements pour distinguer ceux qui sont anormaux et la détermination précise du composant incriminé.
- puis, dans une moindre mesure, la procédure d'identification qui consiste à déterminer l'instant d'apparition du défaut, à le quantifier en estimant sa durée et son amplitude, ainsi qu'à en comprendre l'origine.

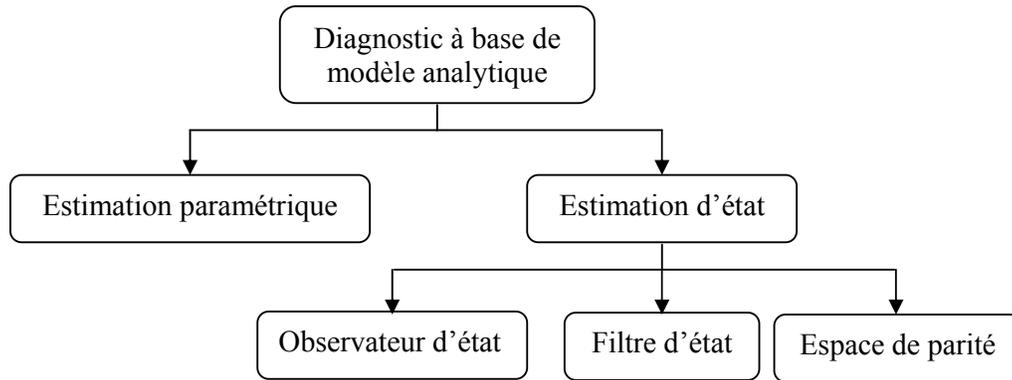


**Figure 3.3** : Forme de calcul et d'évaluation des résidus

La présence de plusieurs défauts simultanés dans un ensemble de données rend cette étape plus difficile, car un résidu peut être sensible à plusieurs défauts, ce qui peut entraîner une confusion sur la localisation de ces défauts. Une façon d'améliorer la décision concernant cette localisation consiste à générer des résidus qui ne sont sensibles qu'à un sous-ensemble particulier de défauts, d'où le nom (résidus structurés). Les sous-ensembles de défauts permettent de structurer une table de signature appelée également matrice d'incidence ou matrice de signatures théoriques de défauts (cette matrice est construite en se basant sur l'hypothèse que si un résidu dépasse un seuil donné, la valeur booléenne "1" sera associée à ce résidu mais si le résidu ne dépasse pas le seuil, on lui associera la valeur booléenne "0"). Ces signatures traduisent l'influence des défauts sur les résidus. Pour que tous les défauts puissent être détectés, aucune colonne de la matrice des signatures théoriques de défauts ne doit être nulle, et pour que tous les défauts puissent être localisés, toutes les signatures théoriques doivent être distinctes. Dans ce cas on utilise les redondances d'information et la connaissance fournie par le modèle pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système, puis décide s'il est normal ou pas. La plupart comprennent trois étapes : dans la première, on calcule des résidus en utilisant la connaissance et les données réelles disponibles. Les résidus sont des variables indicatrices de défauts, dans le sens où leur valeur est nulle lorsque le système se comporte exactement comme son modèle idéal en fonctionnement normal (pas de bruit, pas d'erreur de modélisation, pas d'entrée inconnue, pas d'erreur paramétrique, ...). Ce cas idéal ne se produisant jamais, les résidus diffèrent en général de zéro. Dans ce sens, la deuxième étape de la procédure consiste à séparer les cas dans lesquels la non nullité résulte des bruits, erreurs de modélisation, entrées

inconnues, ... ; de ceux dans lesquels elle résulte de défaillances du système. Une troisième étape tente alors de localiser et de diagnostiquer les défaillances supputées.

La plupart des méthodes de détection et de diagnostic en ligne s'appuient sur des mesures. Il existe des méthodes qui utilisent plus de connaissances que celles apportées par les seuls capteurs physiques. Ces connaissances peuvent en particulier provenir de la connaissance du comportement entrée /sortie d'un procédé ou des processus qui en gouverneraient l'évolution. Cette connaissance est généralement exprimée sous forme de modèles mathématiques. On peut distinguer deux types de méthodes pour le diagnostic à base de modèle analytique : l'estimation paramétrique et l'estimation d'état comme il est illustré dans la **Figure 3.4** :



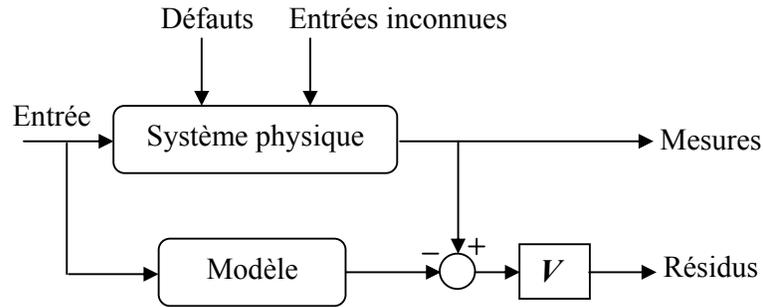
**Figure 3.4** : Méthodes utilisées en diagnostic à base de modèles analytiques

#### 3.4.2.2.1. Espace de parité

L'espace de parité est un espace dans lequel tous les éléments sont des résidus, c'est-à-dire de valeur statistiquement nulle en l'absence de défauts. Dans le contexte de cette approche, le terme vecteur de parité est souvent employé pour désigner le vecteur des résidus et les relations utilisées pour générer les résidus sont appelées relations de parité. Les relations de parité sont des relations comportementales statiques ou dynamiques existant entre grandeurs mesurées. Cette approche a été initialement proposée dans le cas d'une redondance matérielle, puis développée pour les systèmes statiques (espace de parité). Ce type de redondance est appelé "redondance analytique directe" et a tout d'abord été utilisée en complément de la redondance matérielle (le milieu aéronautique). Citons aussi le travail qui démontre que la taille minimale de la fenêtre d'observation temporelle correspond à l'ordre de la partie observable du modèle d'état et donne une méthode permettant d'obtenir des résidus qui ne dépendent que de la mesure d'un seul capteur ou d'une seule entrée [33].

La notion d'espace de parité généralisé dans le cas stochastique en utilisant en plus des mesures, une prédiction de l'état du système à l'aide d'un filtre de Kalman. Le problème d'optimisation de ces résidus se traite à l'aide des valeurs et vecteurs propres généralisés.

Le principe de la méthode est la vérification de la consistance existante entre les entrées et les sorties du système surveillé comme le montre la **Figure 3.5** :



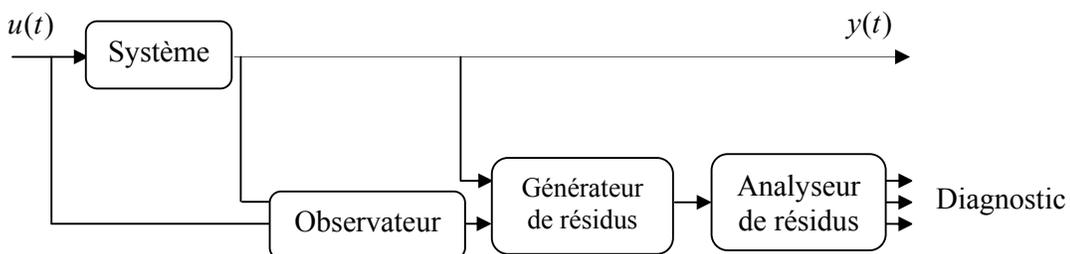
**Figure 3.5** : Approche de l'espace de parité dans un format entrée-sortie

### 3.4.2.2.2. Observateurs

Cette approche s'appuie sur une bonne connaissance du modèle et de ses paramètres. Dans le cas des systèmes linéaires, la structure de base des reconstituteurs est toujours la même à savoir celle de l'observateur proportionnel. Un modèle parallèle, corrigé à l'aide de l'erreur d'estimation multipliée par un gain adéquat, est élaboré. Ce gain est souvent calculé par placement de pôles, ce qui permet d'imposer la dynamique désirée. Une notion essentielle, qui n'apparaît pas dans l'approche par Espace de Parité, est la stabilité de l'observateur, c'est-à-dire la faculté de l'estimée à pouvoir converger vers la vraie valeur. L'état inconnu du système est reconstruit en se recalant à l'aide de certaines mesures, le gain de l'estimateur dépendant des objectifs et des performances désirées [28], [33].

Le but est de créer, à partir de l'estimation des mesures, des résidus qui seront testés afin de détecter une rupture à l'aide de diverses techniques : reconnaissance de formes, analyse discriminante floue, arbres logiques, systèmes experts. Dans cette approche, les résidus correspondent à l'erreur de prédiction de l'observateur d'ordre plein ou réduit ou encore à l'erreur d'innovation d'un filtre de Kalman.

L'un des avantages de ces techniques de génération de résidus est la possibilité de construire des batteries d'observateurs pour assurer l'isolabilité des défauts. Chaque observateur est conçu de façon à générer un résidu ou un sous-ensemble de résidus sensibles à une situation particulière de défaut. Le schéma fonctionnel d'un observateur générateur de résidus est représenté par la **Figure 3.6** :



**Figure 3.6** : Schéma fonctionnel d'un observateur générateur de résidu

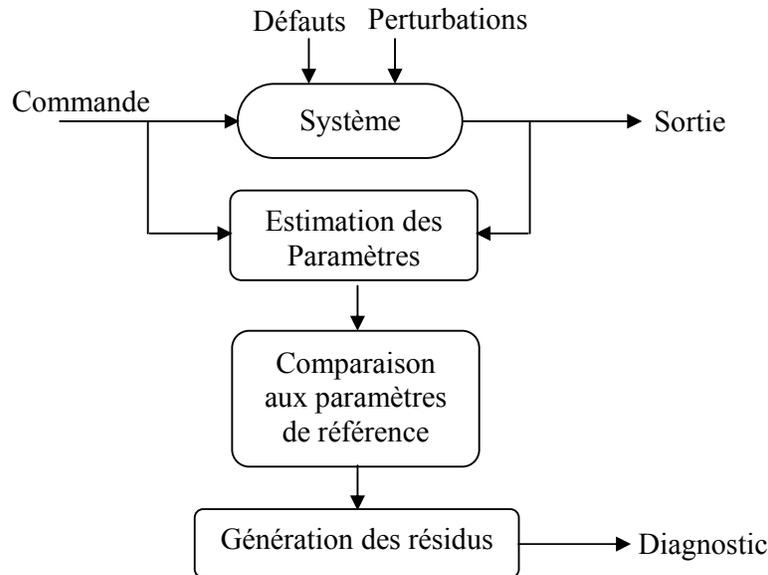
Signalons que dans cette approche plusieurs types d'observateurs sont construits. Citons parmi ces observateurs, les observateurs à entrées inconnues et les observateurs à mémoire finie [30]. Récemment, une autre approche, concernant le diagnostic des systèmes incertains, en s'appuyant sur l'arithmétique des intervalles, a permis la synthèse d'observateurs intervalles. Ce type d'observateurs est capable d'estimer complètement ou partiellement le vecteur d'état ou de sortie du système sous forme intervalle ; il est ensuite possible de générer des résidus intervalles.

#### - Filtres d'état

Comme les observateurs qui s'adressent à un contexte déterministe, les filtres utilisent une formulation similaire du problème d'estimation et s'appuient sur des modèles stochastiques. Cette approche comprend différents problèmes d'estimation de l'état du système, qui dépendent de la position de l'instant courant  $t$  par rapport à la fenêtre temporelle d'observation  $[t_0, t_f]$ . Les filtres sensibles aux défauts peuvent être considérés comme des observateurs particuliers dont les gains sont fixés de manière à ce que le vecteur des résidus, c'est-à-dire le vecteur des erreurs de prédiction, prenne une direction particulière pour chaque situation de défaut.

#### 3.4.2.2.3. Estimation paramétrique

L'approche d'estimation paramétrique mesure l'influence des défauts sur les paramètres et non plus, comme précédemment, sur les variables du système physique [33]. Le principe consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en l'évaluation de la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé comme est indiqué dans la **Figure 3.7** :



**Figure 3.7 :** Estimation paramétrique pour la détection et le diagnostic de défauts

L'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur la taille des déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose des problèmes pratiques dans le cas de procédés dangereux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre les paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus [19].

#### 3.4.2.2.4. Graphes causaux

Il consiste à déterminer les composants défectueux qui peuvent expliquer le fonctionnement anormal observé. Un aspect significatif de la connaissance exigée au moment de l'analyse des régimes perturbés est la compréhension des mécanismes en termes de causalité. Une structure causale est une description des effets que les variables peuvent avoir les unes sur les autres. Cela peut être représenté par un graphe orienté. Cette structure fournit un outil conceptuel pour le raisonnement à propos de la façon dont les changements normaux ou non se propagent au sein du procédé. La méthode de modélisation causale est fondée sur une représentation causale qualitative du fonctionnement normal du procédé et sur des modèles locaux de comportement quantitatifs. Le comportement normal de n'importe quel dispositif industriel de procédé de fabrication peut être partiellement décrit par un graphe causal, composé de relations continues entre les variables. La transcription des modèles de comportement normal en termes de graphes orientés fournit un outil de raisonnement au sujet des lois physiques régissant le dispositif et fournit ainsi une manière normale de mettre en oeuvre le diagnostic.

Les nœuds sont les variables mesurées et significatives pour l'opérateur de surveillance concernant le niveau exigé d'abstraction et les arcs représentent les liens orientés entre elles. De cette façon,  $x \rightarrow y$  signifie que l'état de  $y$  au temps  $t$  dépend de l'état de  $x$  au temps  $t' < t$ ;  $x$  est la cause,  $y$  l'effet. Ce principe est valide aussi longtemps que les liens causaux ne sont pas modifiés par les défauts. Par ailleurs le graphe causal fournit un outil graphique pour la visualisation de la propagation du défaut de variable en variable sur l'interface opérateur. Un graphe causal peut être obtenu par une analyse physique soignée et une analyse fonctionnelle descendante du processus. Ce genre de modèle est généralement concentré sur des phénomènes de transport de matière (équilibres, transferts, stockage...). Les paramètres temporels dans les relations dynamiques soutenues par les arcs peuvent être obtenus avec des procédures classiques d'identification [31].

### 3.5. Génération des RRAs par les approches classiques

Les modèles des processus en génie des procédés sont fortement non linéaires. De plus les non linéarités sont souvent non linéarisables. Il est alors nécessaire de déduire les **RRAs** pour leur surveillance. On rappelle qu'une **RRA** est une équation dans laquelle toutes les variables sont connues. La génération de ces équations permet d'engendrer des indicateurs de fautes appelés résidus. En fonctionnement normal (sans faute), ce résidu est statistiquement nul. Lors de l'apparition d'un défaut, son amplitude s'éloigne de zéro.

### 3.6. Surveillance des systèmes par bond graph

#### 3.6.1. Intérêt des modèles bond graphs couplés pour le diagnostic

En plus de ce qui est développé précédemment, on peut dire que la modélisation est une étape importante dans la conception des algorithmes de surveillance (de détection et d'isolation de fautes **FDI**) reçoivent les informations en ligne issues des capteurs (détecteurs d'effort **De** et de flux **Df**) et délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défaillants sont transmises au service de maintenance [25]. Le modèle bond graph, obtenu à partir d'une analyse énergétique du système physique, est un outil d'aide pour l'analyse des propriétés du système. La surveillance, avec ses aspects détection et localisation des défaillances, mais aussi le choix et le placement des capteurs trouve un intérêt à l'existence d'un tel modèle. Le modèle bond graph est avant tout un modèle de connaissance pour la simulation. La démarche de l'équipe Bond Graph consistant à considérer le modèle bond graph comme un modèle à part entière, constituant un outil d'aide à la modélisation, la conception, l'analyse, la commande et la surveillance grâce à sa structure causale est originale.

Plus tard le bond graph est utilisé comme outil de calcul formel et d'analyse structurelle pour la résolution de problèmes de commande tels que : Commandabilité en sortie, inversibilité,

découplage entrée-sortie, observabilité, placement de pôles.... Ces méthodes se basent sur le parcours de modèles bond graph en suivant des chemins causaux entrées-sorties pour l'analyse des systèmes de commande linéaires modélisant une seule énergie [30]. On distingue deux approches d'utilisation du bond graph pour la surveillance des processus industriels : quantitative et qualitative.

### 3.6.2. Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic

Cette approche ne nécessite pas un modèle très précis [22], [27]. Le bond graph qualitatif décrit explicitement la localisation des composants du système et leurs interconnexions et son modèle peut être construit sans aucune considération des paramètres du système [27]. Les représentations de connaissances conventionnelles permettent aussi de décrire la structure du système ainsi que son état par le biais de divers outils (schéma bloc, équations différentielles, ...). Par la suite, la surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif est relativement plus simple en comparaison des méthodes utilisées en mathématique conventionnelle.

Les bond-graphs qualitatifs utilisent, à la place de valeurs numériques, des valeurs qualitatives définies par l'ensemble  $\{[1] [+][0] [-] [-1] [?]\}$  représentant la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Un ensemble d'opérations qualitatifs peut être défini en accord avec ces représentations qualitatives en utilisant les opérateurs des nombres réels :  $\{+, -, \times, \div, =\}$ . On résout alors un système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique d'occurrence de la faute. D'autres auteurs utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance. Un mécanisme d'inférence construit avec une stratégie de raisonnement qualitatif a été utilisé pour analyser les relations entre la structure du système et son comportement (donné par son modèle bond graph) pour localiser les pannes du système.

L'avantage que présente cette approche est qu'elle ne nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres. Toutefois cette approche devient complexe pour les processus multi énergie et présente d'autres inconvénients comme la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations [22].

### 3.6.3. Diagnostic par Bond graph quantitatif

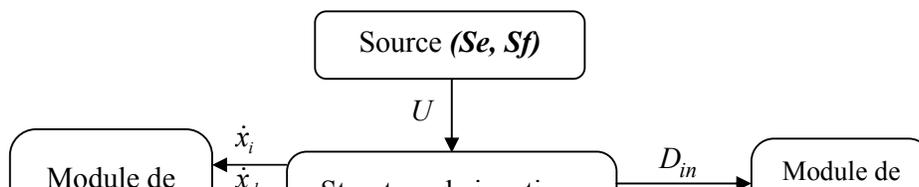
Cette approche est basée sur les lois physiques et nécessite une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres [27]. Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique.

Les modèles (sous forme de fonction de transfert, d'équations d'état, ...) peuvent être obtenus sur la base des lois physiques [29] ou sur la base d'une identification statistique des paramètres [27]. On utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance. La causalité intégrale est recommandée pour la simulation, afin d'éviter les problèmes numériques inhérents à la différentiation. Par contre, la causalité dérivée est utilisée de manière préférentielle dans les **RRAs** afin d'éviter les influences des conditions initiales. Le courant et la tension sont mesurés respectivement par des détecteurs de flux (**De**) et d'effort (**Df**). Les détecteurs sont supposés idéaux. Ils sont reliés à la structure de jonction par des flèches classiques, signifiant qu'il n'y a aucun transfert de puissance entre le système et les détecteurs.

Les avantages que présente cette approche par rapport aux approches basées sur les observateurs sont : la simplicité de la compréhension des (**RRAs**) puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle Bond Graph, image du processus physique, ces relations sont déduites directement de la représentation graphique, elles peuvent être générées sous forme symbolique et donc adaptées à une implémentation informatique.

### 3.6.3.1. Connaissance de la structure du modèle

Le bond graph est un outil de modélisation avantageux car il met en évidence à la fois la structure et le comportement du système étudié. Le modèle bond graph peut être représenté vectoriellement comme le représente la **Figure 3.8**. Les vecteurs associés à cette représentation sont :  $X$ , le vecteur d'état (composé des moments généralisés "p" des éléments  $I$  et des déplacements généralisés "q" des éléments  $C$ ), divisé en 2 sous-vecteurs  $X_i$  et  $X_d$ , respectivement associés aux composants en causalité intégrale et aux composants en causalité dérivée;  $\dot{X}$ , la dérivée par rapport au temps du vecteur d'état, divisée elle aussi en 2 sous-vecteurs  $\dot{X}_i$  et  $\dot{X}_d$ ;  $Z$ : le vecteur d'état complémentaire ("f" sur les éléments  $I$  et "e" sur les éléments  $C$ ) divisé en 2 sous-vecteurs  $Z_i$  et  $Z_d$ ;  $U$ : le vecteur source;  $Y$ : le vecteur de mesure;  $D_{in}$ : le vecteur d'entrée des champs  $R$ ;  $D_{out}$ : le vecteur de sortie des champs  $R$  [29].



**Figure 3.8 :** Représentation vectorielle d'un modèle bond graph

Cette représentation permet de construire la matrice de structure de jonction  $S$  suivante :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_i \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1)$$

La matrice  $S$  possède  $(n_c + n_s)$  lignes, avec  $n_c$  et  $n_s$  respectivement le nombre de composants ( $I$ ,  $R$ , et  $C$ ), et le nombre de capteurs du système ( $De$  et  $Df$ ). Cette matrice est composée des éléments  $0, -1, +1, m, r, 1/m$  et  $1/r$ , tel que  $m$  et  $r$  étant les modules de transfert des éléments  $TF$  et  $GY$ . Les variables associées aux éléments  $R$ ,  $C$  et  $I$  sont liées entre elles par des relations linéaires ou non linéaires :

$$\begin{cases} z_i = F_i(x_i) \text{ ou } z_i = F_i x_i \\ z_d = F_d(x_d) \text{ ou } z_d = F_d x_d \\ D_{out} = L(D_{in}) \text{ ou } D_{out} = L.D_{in} \end{cases} \dots\dots\dots(3.2)$$

Si le système est linéaire, certaines relations peuvent être exprimées sous forme de fonction de transfert :

$$\begin{cases} z_d(s) = H'(s) \cdot \dot{X}_d(s) \\ z_i(s) = H'(1/s) \cdot \dot{X}_i(s) \end{cases} \dots\dots\dots(3.3)$$

Avec  $L, H'(s)$  et  $H'(1/s)$  sont des matrices carrées.

**3.6.3.2. Représentation matricielle**

La matrice de structure de jonction  $S$  et les lois E/S de tous les composants forment la nouvelle matrice  $M$  qui contient toutes les relations liant les variables du système et constitue un modèle polynomial du système.

Elle est définie par  $M = \left[ \begin{array}{c|c} S & -I \\ \hline I & M' \end{array} \right]$  :

$$M = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & -I_1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & -I_2 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & 0 & 0 & 0 & -I_4 \\ I_1 & 0 & 0 & 0 & -H\left(\frac{1}{s}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & -H^1(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & -L & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.4)$$

$M'$  regroupe les relations d'entrée-sortie de tous les composants du système, de telle sorte que la relation  $M'V = 0$  soit satisfaite. La structure est l'expression de la présence ou de l'absence de relations entre les variables. L'existence de relations est caractérisée par un terme non nul dans la matrice  $M$ . Ainsi cette matrice représente un ensemble de  $(2n_c + n_s)$  équations déterminant les  $2n_c$  inconnues. Il y a donc sur-détermination si le nombre de capteurs  $n_s$  n'est pas nul. L'indépendance des différentes lignes de la matrice  $M$  est assurée par la présence des matrices unités  $I_1, I_2, I_3$  et  $I_4$ . La matrice  $M$  peut être associée à un graphe biparti composé de l'ensemble des variables  $V$  et l'ensemble des relations  $F_i$ .

### 3.6.3.3. Parcours des chemins causaux

Pour générer des **RRAs** à partir du modèle bond graph en suivant les chemins causaux. Les jonctions 0 et 1 sont connectées à des éléments soumis respectivement à un effort commun et à un flux commun, et une somme algébrique d'efforts (respectivement de flux) apparaît. Le but est d'étudier tous les chemins causaux relatifs à la jonction considérée jusqu'aux sources et aux capteurs. La méthode est intéressante car elle génère autant de relations que de jonctions 0 et 1. Il n'est pas besoin de calculer le déterminant du bond graph, ainsi que les gains des différentes boucles causales.

### 3.6.3.4. Placement de capteurs pour la surveillabilité des sources

Dans le domaine d'application du bond graph par le placement de capteurs, on considère qu'il existe des capteurs placés permettant de résoudre le problème de surveillabilité des sources d'un système modélisé par bond graph si, pour chaque source  $S_k$  non surveillable, il existe une jonction  $J_k$  accessible à partir de  $S_k$  en arrivant par le flux (respectivement par l'effort) si celle-ci

est une jonction 1 (respectivement 0) et que le chemin causal entre  $S_k$  et  $J_k$  n'est pas inclus dans un des autres chemins causaux source-jonction partant des autres sources non surveillables retenus pour assurer la surveillabilité des autres sources. Les études sur la surveillance des composants ont permis de déterminer une méthode de placement de capteurs sur un système modélisé par un bond graph linéaire:

- \* Déterminer toutes les sources dont les défaillances ne peuvent être isolées;
- \* Pour chaque groupe de sources dépendantes, répertorier tous les placements de capteurs qui pourraient casser les chemins causaux reliant les sources, rendant ces sources surveillables;
- \* Sélectionner les placements des capteurs qui réduisent le plus possible le nombre d'équations implicites entre les variables du modèle qui cassent le plus de boucles causales possible entre les éléments qui ne croisent aucune jonction connectée à un capteur.

### 3.6.3.5. Surveillance des composants

Afin de détecter les défaillances au niveau des composants pour des systèmes linéaires modélisés par bond graph, il existe principalement deux méthodes. La première méthode est basée sur l'estimation des paramètres et la seconde repose sur les relations de redondance analytique et la construction des signatures des différentes pannes probables. A partir des entrée/sortie du ce composant, on estime ces valeurs du paramètre.

Il existe principalement deux méthodes. La première se base sur la mesure directe de ces variables. Elle utilise un support essentiellement matériel, composé de deux capteurs (un de flux et l'autre d'effort) pour chaque composant à surveiller. Il suffit alors de comparer les valeurs mesurées avec les valeurs déduites de la caractéristique du composant. S'il existe un écart, cela que le composant est défaillant. L'inconvénient de cette méthode est très encombrant et coûteuse. La deuxième méthode, basée essentiellement sur un support logiciel, utilise la notion de bond graph bicausal pour exprimer les variables généralisées du composant en fonction des variables connues du système. Le bond graph bicausal permet de se servir du reste du modèle pour déterminer les valeurs d'effort et de flux, sans avoir à passer par la caractéristique du composant. Pour un bond graph mono-énergie, cela apporte deux équations supplémentaires, ce qui fait trois équations avec la caractéristique, pour deux inconnues. Le système est donc sur-déterminé, d'où une redondance de l'information qui pourra servir de comparaison afin de détecter une éventuelle défaillance. Parfois, le modèle bond graph est tel que si l'on veut éviter les boucles de causalité, qui posent des problèmes de parcours de chemins ainsi que des problèmes de simulation, il faut opter pour un regroupement des composants pour constituer un (macro-composant) ou une (impédance) composée. En effet, cette causalité peut engendrer des situations difficiles à résoudre sans faire appel à des calculs plus complexes, tels que la

factorisation. La solution dans ce cas est de regrouper les composants incriminés. Généralement, la causalité impose un certain nombre de règles de propagation du flux et d'effort à un composant dans le modèle, pour en trouver son paramètre constitutif.

Cette causalité implique que si l'effort est connu dans un sens, alors le flux est connu dans le sens opposé. Ceci n'est vrai que si l'on connaît les valeurs des composants constituant le bond graph. Dans le cas contraire, il est nécessaire de définir d'autres règles d'affectation de la causalité en divisant le trait causal en deux, la moitié supérieure indique le sens de propagation de l'effort et la moitié inférieure le sens de propagation du flux.

### 3.6.3.6. Informatisation des procédures d'analyse structurelle pour la surveillance des systèmes physiques par bond graph

Une méthode de génération des *RRAs* à partir d'un noeud jonction dans le modèle bond graph exploiter tous les chemins causaux menant aux sources et/ou aux capteurs. Cette méthode est informelle (comme celle de l'affectation de la causalité) et se prête à une informatisation.

La complexité des systèmes physiques à étudier ou surveiller rend nécessaire l'automatisation des ces procédures d'analyse structurelle (*pour la génération des RRAs*) par l'intermédiaire d'un programme informatique.

## 3.7. Algorithme de placement de capteurs

### 3.7.1. Contraintes pour la surveillance des composants

La méthode développée ci-dessus consiste en un placement optimal de capteurs en vue de la surveillabilité des composants, c'est à dire assurer la détectabilité et l'isolabilité des défaillances des composants. Soit un modèle bond graphs issu d'un processus physique. On suppose qu'il n'existe pas une architecture d'instrumentation, les fautes sur les composants ne sont pas multiples et que les capteurs et les sources ne sont pas affectés. Puisque en bond graph, les détecteurs ne sont placés qu'aux jonctions, on considère un placement virtuel du capteur à la position  $j$ , ce qui est représenté par une variable booléenne. De plus, à chaque type de jonction, on peut connaître le type de détecteur, ce qui réduit la combinatoire d'affectation [20], [23].

Soient :

- \*  $N_0$  le nombre de jonction  $0_{Ci}$  et  $N_1$  le nombre de jonction  $1_{Rj}$  ;
- \*  $i$  le numéro des jonctions  $0_{Ci}$  et  $j$  le numéro des jonctions  $1_{Rj}$  ;
- \*  $n$  le nombre de liens accrochés à la jonction  $0_{Ci}$  ;
- \*  $m$  le nombre de liens accrochés à la jonction  $1_{Rj}$  ;
- \*  $C$  l'ensemble des variables connus  $C = \{Sf_1, Sf_2, De_i, De_j\}$  ;

\*  $X$  l'ensemble des variables inconnus  $X = \{e_{Ci}, f_{Ci}, e_{Rj}, f_{Rj}\}$  ;

Les équations aux jonctions  $0_{Ci}$  sont :

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n a_k f_k = 0 & \text{où } a_k = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ e_k = e_{Ci} & \text{pour } k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3.5)$$

Pour les fonctions non linéaires  $\Phi_{Ci}$  et pour  $s$  est l'opérateur dérivé, les variables de flux et d'effort à déterminer sont :

$$\begin{cases} f_{Ci} = \Phi_{Ci} \left[ s \{ (1-x_i) e_{Ci} + x_i D e_i \} \right] & \text{avec } i = 1, \dots, N_0 \\ e_{Ci} = \frac{1}{s} (1-x_i) \Phi_{Ci}^{-1} (f_{Ci}) + x_i D e_i \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

Les équations aux jonctions  $1_{Rj}$

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^m a_l e_l = 0 & \text{ou } a_l = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ f_l = f_{Rj} & \text{pour } l = 1, \dots, m \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

Pour les fonctions non linéaires  $\Phi_{Rj}$ , les variables de flux et d'effort à déterminer sont :

$$\begin{cases} e_{Rj} = \Phi_{Rj} \left[ (1-y_j) f_{Rj} + y_j D f_j \right] & \text{avec } j = 1, \dots, N_1 \\ f_{Rj} = (1-y_j) \Phi_{Rj}^{-1} (e_{Rj}) + y_j D f_j \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

Les combinaisons des variable booléennes  $x_i$  et  $y_j$  permettent de générer des relations de redondance analytique qui donnent les structures des résidus. A partir de ces structures on obtient les vecteurs de signature de défaillance. La structure d'un résidu est caractérisée par le vecteur binaire dans lequel on associe à l'ensemble des relations de redondance analytique  $R$ , l'ensemble des variables connues.

$$sr(r, c) = \begin{cases} 1 & \text{si et seulement si } c \text{ apparait à la RRA } r \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

Le vecteur signature de défaillance binaire  $sd_i$  associée à la relation  $f_i$  est définie par [13], [14]:

$$sd_i = [sr(r_1, f_i), sr(r_2, f_i), \dots, sr(r_k, f_i), \dots, sr(r_m, f_i)]^t \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

$$sr(r_k, f_i) = \begin{cases} 1 & \text{si le résidu } r_k \text{ utilise la relation } f_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

La faute sur un composant  $i$  est surveillable si la relation  $f_i$  qui le représente l'est aussi.  
 La relation  $f_i$  est détectable si seulement si le vecteur  $sd_i$  est différent du vecteur nul.

$f_i$  est isolable si est seulement si elle détectable et :

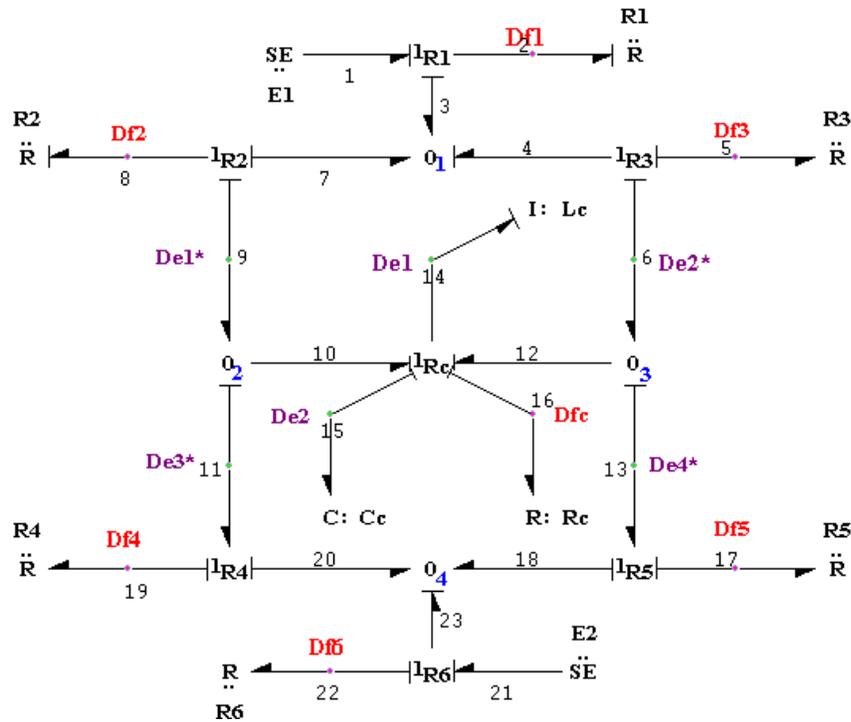
$\forall f_i \in F / i \neq j \exists r_k \in R / sr(r_k, f_i) \oplus sr(r_k, f_j) = 1$  c'est-à-dire unique dans sa classe.

$$\begin{cases} f_i \text{ est détectable ssi le vecteur } sd_i \neq 0 \\ f_i \text{ est isolable ssi } \forall f_i \in F / \exists r_k \in R / sr(r_k, f_i) \oplus sr(r_k, f_j) = 1 \end{cases} \dots(3.12)$$

### 3.8. Description du processus

#### 3.8.1. Onduleur monophasé

Le processus considéré pour l'application de la méthode de diagnostic est un onduleur monophasé et triphasé qui a été détaillé au chapitre 01. Le modèle Bond Graph correspondant avec le placement des capteurs (détecteurs d'effort, et de flux) de l'onduleur monophasé est représenté par la **Figure 3.9** :



**Figure 3.9** : Placement de capteurs sur le modèle bond graph d'un onduleur monophasé

Ce modèle est composé de quatre jonctions 0 : 0<sub>1</sub>, 0<sub>2</sub>, 0<sub>3</sub>, 0<sub>4</sub> et sept jonctions 1 : 1<sub>R1</sub>, 1<sub>R2</sub>, 1<sub>R3</sub>, 1<sub>R4</sub>, 1<sub>R5</sub>, 1<sub>R6</sub>, 1<sub>Rc</sub> et neuf composants R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub>, R<sub>6</sub>, R<sub>c</sub>, L<sub>c</sub>, C<sub>c</sub>. La problématique est qu'on veut placer un minimum de capteurs pour surveiller les 9 composants en supposant que les fautes ne sont pas multiples et que les capteurs et les sources ne sont pas affectés.

L'ensemble des variables connues :

$$C = \{E_1, E_2, Df_1, Df_2, Df_3, Df_4, Df_5, Df_6, Df_c, De_1, De_2, De_1^*, De_2^*, De_3^*, De_4^*\}.$$

L'ensemble des variables inconnues :

$$X = \{e_2, f_2, e_5, f_5, e_8, f_8, e_{14}, f_{14}, e_{15}, f_{15}, e_{16}, f_{16}, e_{17}, f_{17}, e_{19}, f_{19}, e_{22}, f_{22}\}.$$

A Partir des jonctions  $0_2$  et  $0_3$  on a  $De_1^*=De_3^*$  et  $De_2^*=De_4^*$  ce cas est valable pour  $K_1$  et  $K_2'$  fermé en même temps ou bien  $K_1'$  et  $K_2$  fermé en même temps, donc il y a deux cas:

✓ 1<sup>er</sup> cas :  $K_1, K_2'$  fermé

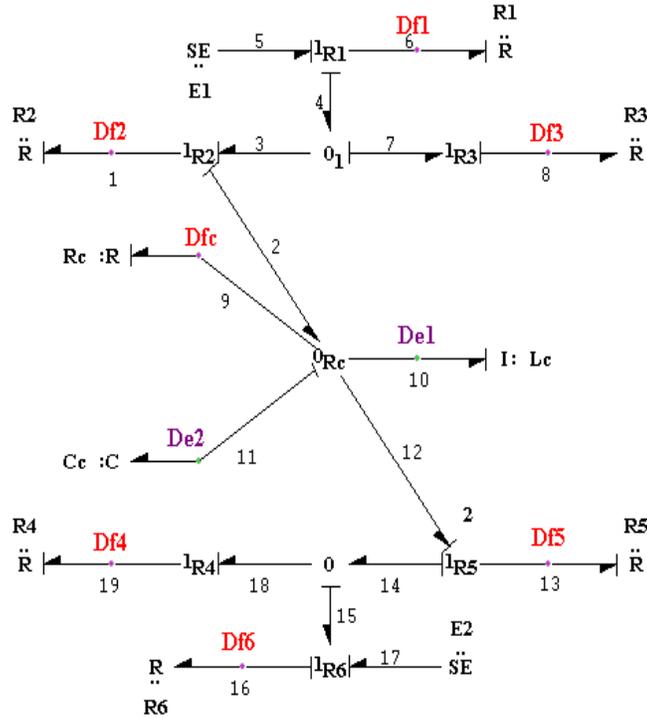


Figure 3.10 : Placement de capteur sur le modèle de l'onduleur monophasé cas  $K_1$  et  $K_2'$  fermé

✓ 2<sup>ème</sup> cas :  $K_1', K_2$  fermé

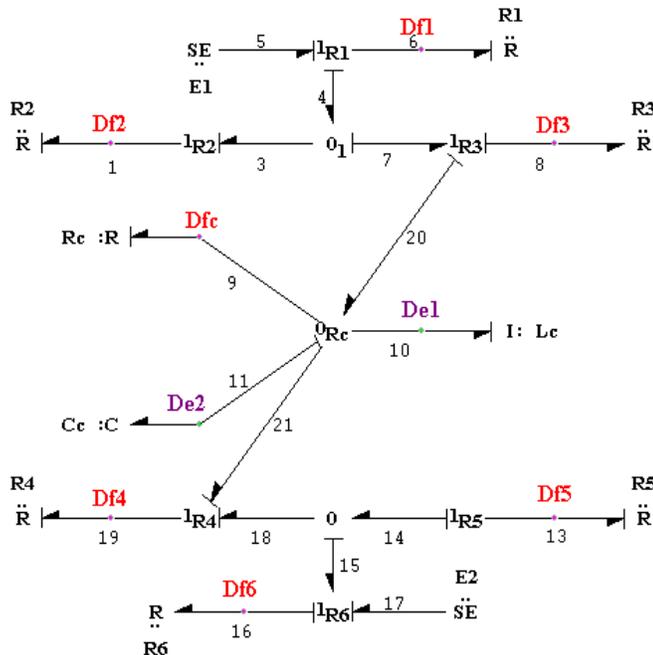
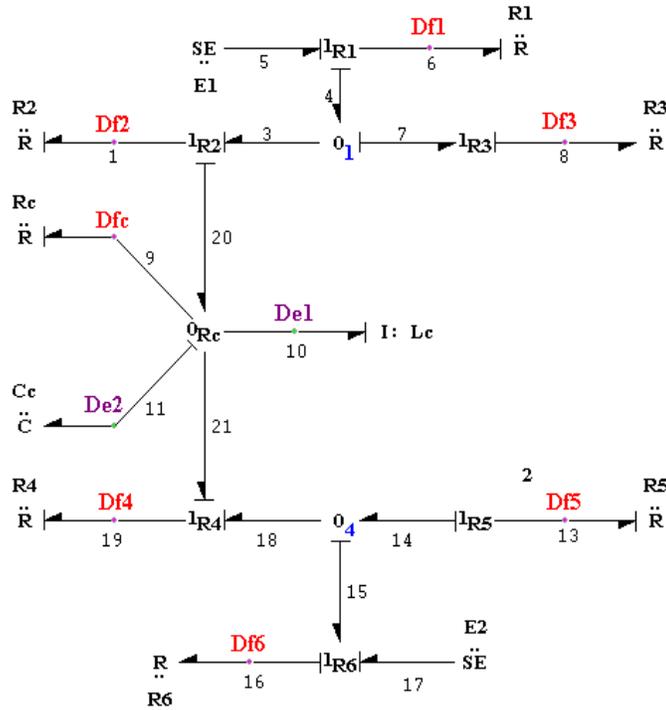


Figure 3.11: Placement de capteur sur le modèle de l'onduleur monophasé cas  $K_1'$  et  $K_2$  fermé

### 3.8.2. Onduleur triphasé

Dans l'onduleur triphasé on va surveiller chaque phase à part, puisque les phases sont semblable :



**Figure 3.12:** Placement de capteur sur le modèle de phase de l'onduleur triphasé cas  $K_I$  et  $K_I'$  fermé

On constate que les modèles de surveillance sont identiques ce qui nous mène à ne tenir compte que d'un seul.

Ce modèle est composé de quatre Jonctions 0 :  $0_1, 0_2, 0_{Rc}$ . Six jonctions 1 :  $1_{R1}, 1_{R2}, 1_{R3}, 1_{R4}, 1_{R5}, 1_{R6}$ . Neuf composants  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_C, L_C, C_C$ . La problématique est qu'on veut placer un minimum de capteurs pour surveiller les 9 composants en supposant que les fautes ne sont pas multiples et que les capteurs et les sources ne sont pas affectés. L'ensemble des variables connues:  $C = \{E_1, E_2, Df_1, Df_2, Df_3, Df_4, Df_5, Df_6, Df_c, De_1, De_2^*\}$ .

L'ensemble des variables inconnues :  $X = \{e_1, f_1, e_6, f_6, e_8, f_8, e_9, f_9, e_{10}, f_{10}, e_{13}, f_{13}, e_{16}, f_{16}, e_{19}, f_{19}\}$ .

Pour notre exemple, les équations aux jonctions sont données par :

$$\text{Jonction } 1_{R1}: \begin{cases} s_{e1} = e_4 + e_6 \\ f_4 = f_5 = f_6 \\ e_{R1} = e_6 = \phi_{R1} [(1 - y_1) f_6 + y_1 Df_1] \\ f_{R1} = f_6 = (1 - y_1) \phi_{R1}^{-1}(e_6) + Y_1 Df_1 \end{cases} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$\text{Jonction } 1_{R2} : \begin{cases} e_3 = e_1 + e_2 \\ f_1 = f_2 = f_3 \\ e_{R2} = e_1 = \phi_{R2} [(1 - y_2) f_1 + y_2 Df_2] \\ f_{R2} = f_1 = (1 - y_2) \phi_{R2}^{-1}(e_1) + y_2 Df_2 \end{cases} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$\text{Jonction } 1_{R3} : \begin{cases} e_7 = e_8 \\ f_7 = f_8 \\ e_{R3} = e_8 = \phi_{R3} [(1 - y_3) f_8 + y_3 Df_3] \\ f_{R3} = f_8 = (1 - y_3) \phi_{R3}^{-1}(e_8) + y_3 Df_3 \end{cases} \dots\dots\dots(3.15)$$

$$\text{Jonction } 1_{R4} : \begin{cases} e_{18} = e_{19} \\ f_{18} = f_{19} \\ e_{R4} = e_{19} = \phi_{R4} [(1 - y_4) f_{19} + y_4 Df_4] \\ f_{R4} = f_{19} = (1 - y_4) \phi_{R4}^{-1}(e_{19}) + y_4 Df_4 \end{cases} \dots\dots\dots(3.16)$$

$$\text{Jonction } 1_{R5} : \begin{cases} e_{13} = e_{14} + e_{12} \\ f_{12} = f_{13} = f_{14} \\ e_{R5} = e_{13} = \phi_{R5} [(1 - y_5) f_{13} + y_5 Df_5] \\ f_{R5} = f_{13} = (1 - y_5) \phi_{R5}^{-1}(e_{13}) + y_5 Df_5 \end{cases} \dots\dots\dots(3.17)$$

$$\text{Jonction } 1_{R6} : \begin{cases} s_{e2} = e_{15} + e_{16} \\ f_{15} = f_{16} = f_{17} \\ e_{R6} = e_{16} = \phi_{R6} [(1 - y_6) f_{16} + y_6 Df_6] \\ f_{R6} = f_{16} = (1 - y_6) \phi_{R6}^{-1}(e_{16}) + y_6 Df_6 \end{cases} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$\text{Jonction } 0_{Rc} : \begin{cases} f_2 = f_9 + f_{10} + f_{11} + f_{12} \\ e_2 = e_9 = e_{10} = e_{11} = e_{12} \\ e_{Rc} = e_9 = \phi_{Rc} [(1 - y_c) f_9 + y_c Df_c] \\ f_{Rc} = f_9 = (1 - y_c) \phi_{Rc}^{-1}(e_9) + y_c Df_c \\ e_{Lc} = e_{10} = \phi_{Lc} [s \{ (1 - z_c) f_{10} + z_c D e_1 \}] \\ f_{Lc} = f_{10} = \frac{1}{s} (1 - z_c) \phi_{Lc}^{-1}(e_{10}) + z_c D e_1 \\ e_{Cc} = e_{11} = \frac{1}{s} (1 - x_c) \phi_{Cc}^{-1}(f_{11}) + x_c D e_2^* \\ f_{Cc} = f_{11} = \phi_{Cc} [s \{ (1 - x_c) e_{11} + x_c D e_2^* \}] \end{cases} \dots\dots\dots(3.19)$$

$$\text{Jonction } 0_1 : \begin{cases} f_4 = f_3 + f_7 \\ e_3 = e_4 = e_7 \end{cases} \dots\dots\dots(3.20)$$

$$\text{Jonction } \theta_2: \begin{cases} f_{15} = f_{14} + f_{18} \\ e_{14} = e_{15} = e_{18} \end{cases} \dots\dots\dots(3.21)$$

A partir de ces équations on obtient :

$$\begin{cases} s_{e_1} - \phi_{R3}[(1-y_3)f_8 + y_3Df_3] - \phi_{R1}[(1-y_1)f_6 + y_1Df_1] = 0 \\ \phi_{R1}[(1-y_1)f_6 + y_1Df_1] - \phi_{R2}[(1-y_2)f_1 + y_2Df_2] - \phi_{RC}[(1-y_C)f_9 + y_CDf_C] = 0 \\ \phi_{R2}[(1-y_2)f_1 + y_2Df_2] + \phi_{Lc} [s\{(1-z_C)f_{10} + z_CDe_1\}] - \phi_{R3}[(1-y_3)f_8 + y_3Df_3] = 0 \\ s_{e_2} - \phi_{R6}[(1-y_6)f_{16} + y_6Df_6] - \phi_{R4}[(1-y_4)f_{19} + y_4Df_4] = 0 \\ \phi_{R5}[(1-y_5)f_{13} + y_5Df_5] - \phi_{Lc} [s\{(1-z_C)f_{10} + z_CDe_1\}] - \phi_{R4}[(1-y_4)f_{19} + y_4Df_4] = 0 \\ s_{e_2} - \phi_{R5}[(1-y_5)f_{13} + y_5Df_5] - \left[ \frac{1}{S}(1-x_C)\phi_{Cc}^{-1}f_{11} + x_CDe_2^* \right] - \phi_{R6}[(1-y_6)f_{16} + y_6Df_6] = 0 \\ \left[ (1-y_2)\phi_{R2}^{-1}(e_1) + y_2Df_2 \right] - \left[ (1-y_C)\phi_{RC}^{-1}(e_9) + y_CDf_C \right] - \left[ \frac{1}{S}(1-z_C)\phi_{Lc}^{-1}(e_{10}) + z_CDe_1 \right] \\ - \phi_{Cc} [s\{(1-x_C)e_{11} + x_CDe_2^*\}] - \left[ (1-y_5)\phi_{R5}^{-1}(e_{13}) + Y_5Df_5 \right] = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(3.22)$$

**3.9. Relations de redondance analytique des résidus**

A partir des variables binaires  $x_i$  ( $i=1, \dots$ ) de  $De_i$  et  $y_j$  ( $j=1, \dots$ ) de  $Df_j$  on peut déterminer la structure finale du système de surveillance comme suit :

- ✓ Pour  $[y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_C, z_C, x_C] = [111111000]$ , les résidus sont données par :

$$\begin{cases} r_1 = s_{e_1} - \phi_{R3}Df_3 - \phi_{R1}Df_1 \\ r_2 = \phi_{R1}Df_1 - \phi_{R2}Df_2 - \phi_{RC}f_9 \\ r_3 = \phi_{R2}Df_2 + \phi_{Lc}s(f_{10}) - \phi_{R3}Df_3 \\ r_4 = s_{e_2} - \phi_{R6}Df_6 - \phi_{R4}Df_4 \\ r_5 = \phi_{R5}Df_5 + \phi_{Lc}s(f_{10}) - \phi_{R4}Df_4 \\ r_6 = s_{e_2} - \phi_{R5}Df_5 - \frac{1}{S}\phi_{Cc}^{-1}(f_{11}) - \phi_{R6}Df_6 \end{cases} \dots\dots\dots(3.23)$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le **Tableau 3.1**:

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_c$	$L_c$	$C_c$
$r_1$	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$r_2$	1	1	0	0	0	0	1	0	0
$r_3$	0	1	1	0	0	0	0	1	0
$r_4$	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$r_5$	0	0	0	1	1	0	0	1	0
$r_6$	0	0	0	0	1	1	0	0	1

**Tableau 3.1** : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles, donc les composants  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_c, L_c,$  et  $C_c$  sont surveillables.

✓ Pour  $[y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_c, z_c, x_c] = [100101111]$ , les résidus sont données par :

$$\begin{cases} r_1 = s_{e_1} - \phi_{R_3} f_8 - \phi_{R_1} Df_1 \\ r_2 = s_{e_2} - \phi_{R_6} Df_6 - \phi_{R_4} Df_4 \\ r_3 = s_{e_2} - \phi_{R_5} f_{13} - De_2 - \phi_{R_6} Df_6 \\ r_4 = \phi_{R_2}^{-1} e_1 - Df_c - De_1 - \phi_{C_c} De_2 - \phi_{R_5} e_{13} \end{cases} \dots\dots\dots(3.24)$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le **Tableau 3.2** :

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_c$	$L_c$	$C_c$
$r_1$	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$r_2$	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$r_3$	0	0	0	0	1	1	0	0	0
$r_4$	0	1	0	0	1	0	0	0	1

**Tableau 3.2** : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les éléments  $R_4, R_5, R_6$  sont surveillable, les éléments  $R_c, L_c$  sont non détectables et les éléments  $R_1, R_2, R_3, C_c$  sont détectables et non isolables.

✓ Pour  $[y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_c, z_c, x_c] = [111111100]$ , on obtient les résidus suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = s_{e_1} - \phi_{R_3} Df_3 - \phi_{R_1} Df_1 \\ r_2 = \phi_{R_1} Df_1 - \phi_{R_2} Df_2 - \phi_{R_c} f_9 \\ r_3 = \phi_{R_2} Df_2 + \phi_{L_c} s(f_{10}) - \phi_{R_3} Df_3 \\ r_4 = s_{e_2} - \phi_{R_6} Df_6 - \phi_{R_4} Df_4 \\ r_5 = \phi_{R_5} Df_5 + \phi_{L_c} s(f_{10}) - \phi_{R_4} Df_4 \\ r_6 = s_{e_2} - \phi_{R_5} Df_5 - \frac{1}{s} \phi_{C_c}^{-1}(f_{11}) - \phi_{R_6} Df_6 \\ r_7 = Df_2 - Df_c - \frac{1}{s} \phi_{L_c}^{-1}(e_{10}) - \phi_{C_c} s(e_{11}) - Df_5 \end{array} \right. \dots\dots\dots(3.25)$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le **Tableau 3.3** :

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_c$	$L_c$	$C_c$
$r_1$	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$r_2$	1	1	0	0	0	0	1	0	0
$r_3$	0	1	1	0	0	0	0	1	0
$r_4$	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$r_5$	0	0	0	1	1	0	0	1	0
$r_6$	0	0	0	0	1	1	0	0	1
$r_7$	0	0	0	0	0	0	0	1	1

**Tableau 3.3** : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulle, donc les composants  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_c, L_c$ , et  $C_c$  sont surveillables.

✓ Pour  $[y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_c, z_c, x_c] = [111110000]$ , les résidus sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = s_{e_1} - \phi_{R_3} Df_3 - \phi_{R_1} Df_1 \\ r_2 = \phi_{R_1} Df_1 - \phi_{R_2} Df_2 - \phi_{R_c} f_9 \\ r_3 = \phi_{R_2} Df_2 + \phi_{L_c} s(f_{10}) - \phi_{R_3} Df_3 \\ r_4 = s_{e_2} - \phi_{R_6} f_{16} - \phi_{R_4} Df_4 \\ r_5 = \phi_{R_5} Df_5 + \phi_{L_c} s(f_{10}) - \phi_{R_4} Df_4 \end{array} \right. \dots\dots\dots(3.26)$$

La matrice de signature de fautes correspondante est donnée par le **Tableau 3.4** :

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_c$	$L_c$	$C_c$
$r_1$	1	0	1	0	0	0	0	0	0
$r_2$	1	1	0	0	0	0	1	0	0
$r_3$	0	1	1	0	0	0	0	1	0
$r_4$	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$r_5$	0	0	0	1	1	0	0	1	0

**Tableau 3.4** : Matrice de signature de défaillances

On remarque que les éléments  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_c, L_c$  sont surveillable et l'élément  $C_c$  est non détectable.

<b>Nombre de capteurs</b>	<b>Combinaisons</b>	<b>Surveillables</b>	<b>Détectables</b>
7	111111100	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_c, L_c, C_c$	$\phi$
6	111111000	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_c, L_c, C_c$	$\phi$
6	100101111	$R_4, R_5, R_6$	$R_1, R_2, R_3, C_c$
5	111110000	$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_c, L_c$	$C_c$
4	010011100	$R_4, R_5, R_6, R_c, L_c, C_c$	$R_1, R_2$

**Tableau 3.5** : Recherche du placement de capteurs optimal

D'après les résultats du **Tableau 3.5**, on constate que la combinaison qui assure la surveillabilité des 9 composants avec le minimum de capteurs est [111111000].

On voit que ces relations sont sensibles à plusieurs composants d'actionneurs et de capteurs.

### 3.10. Application

#### 3.10.1. Essais sur le processus et résultats

### 1.1.1. 3.10.1.1. Défaillance sur le processus

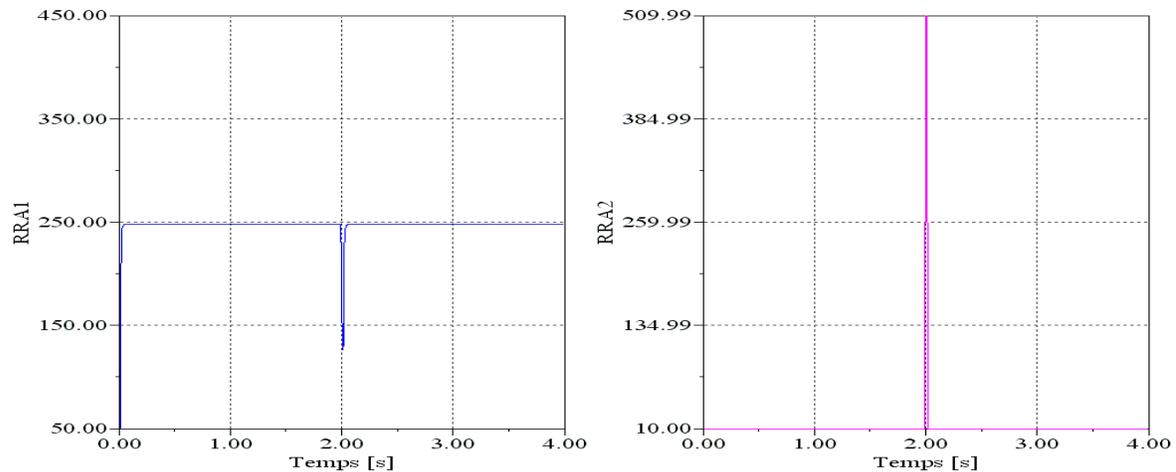
On peut construire une base de simulation du modèle bond-graph, ainsi que l'ensemble des relations de redondance analytique générées à l'aide du logiciel SYMBOLS. Comme déjà vue, le bond graph permet une analyse du modèle de façon qualitative.

Pour cela, on prend des valeurs arbitraires unitaires pour la simulation du modèle et crée à l'aide de l'interface de simulation des coupures sur les composants comme des défaillances pour tester la sensibilité des résidus.

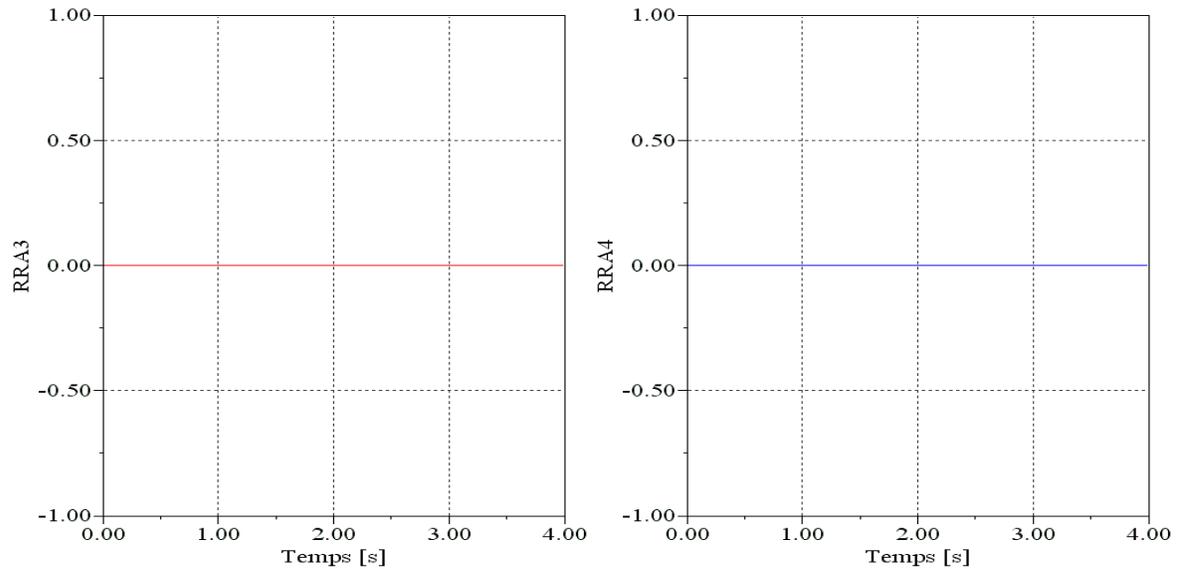
Les figures suivantes montrent l'efficacité de l'approche bond graph pour la détection des défauts générés sur chaque composant à travers la déviation de la relation considérée. En fonctionnement normal, les résidus doivent être constamment nuls ce n'est pas toujours le cas, car les erreurs de modélisation introduisent des résidus différents de zéro.

#### \* Sensibilité du détecteur $Df_1$ :

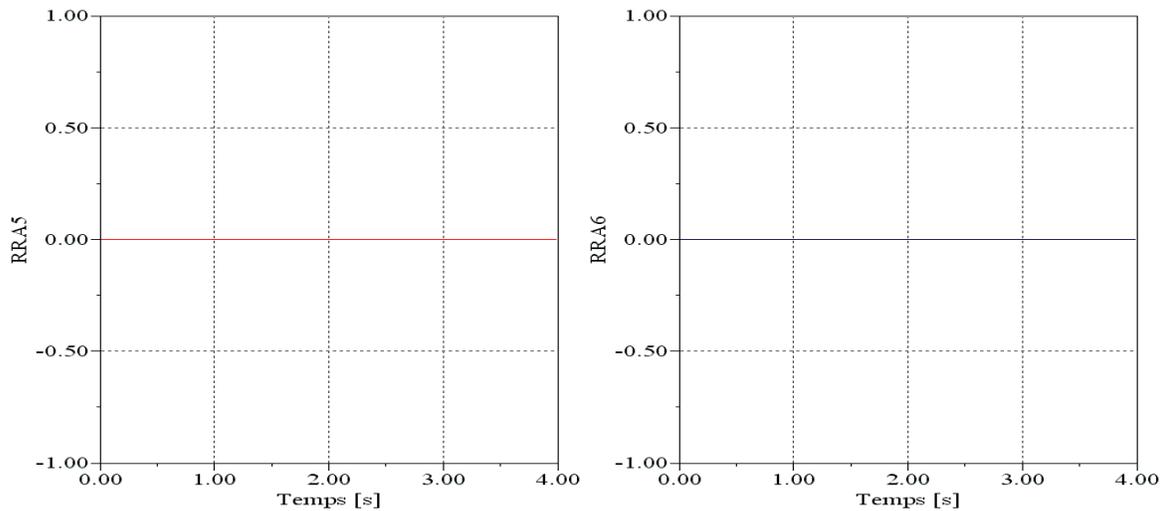
On crée un défaut entre les temps  $T_1 = 2s, T_2 = 2.1s$  et on l'injecte au niveau de la jonction  $1_{R_1}$ . La défaillance sur l'élément  $R_1$  fait intervenir fortement le détecteur  $Df_1$  dans les résidus  $RR_{A1}, RR_{A2}$ . On voit que les  $RRAs$  générées réagissent rapidement par leurs déviations à ses valeurs (près de 0), comme le montre dans les **Figures 3.13, 3.14 et 3.15** :



**Figure 3.13** : Sensibilité du  $RR_{A1}$  et  $RR_{A2}$  représentée par le capteur  $Df_1$



**Figure 3.14** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA3$  et  $RRA4$

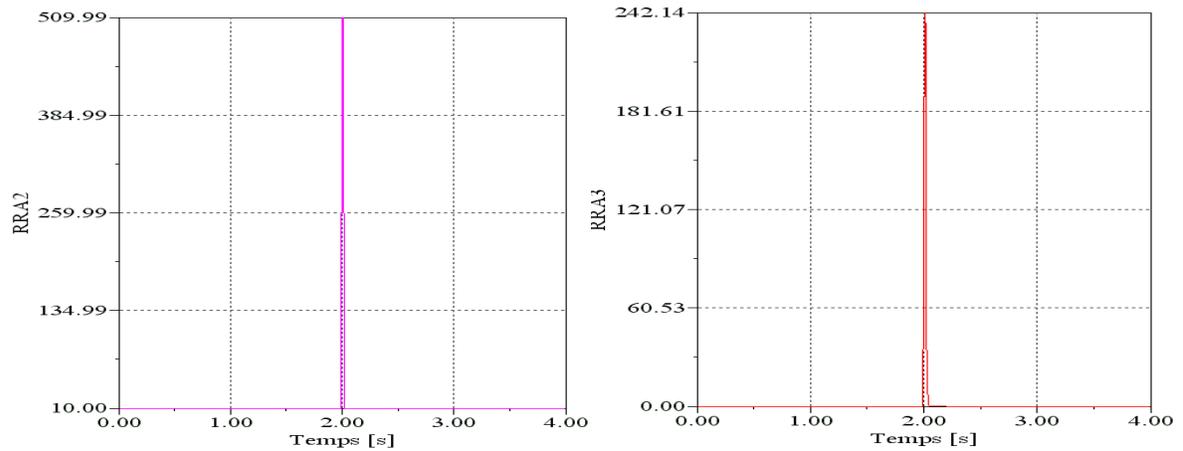


**Figure 3.15** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA5$  et  $RRA6$

On constate que les résidus  $RRA1$ ,  $RRA2$  sont sensibles aux défaillances de l'élément  $R_1$  durant cette durée, parce que les deux résidus dépendent du détecteur  $Df_1$ , par contre les résidus  $RRA3$ ,  $RRA4$ ,  $RRA5$  et  $RRA6$  sont nuls car, le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus parce que la puissance de l'information est trop faible, et elle diminue jusqu'à 1 et ce résidu est indépendant du détecteur  $Df_1$  (le fonctionnement de ce résidu est normal).

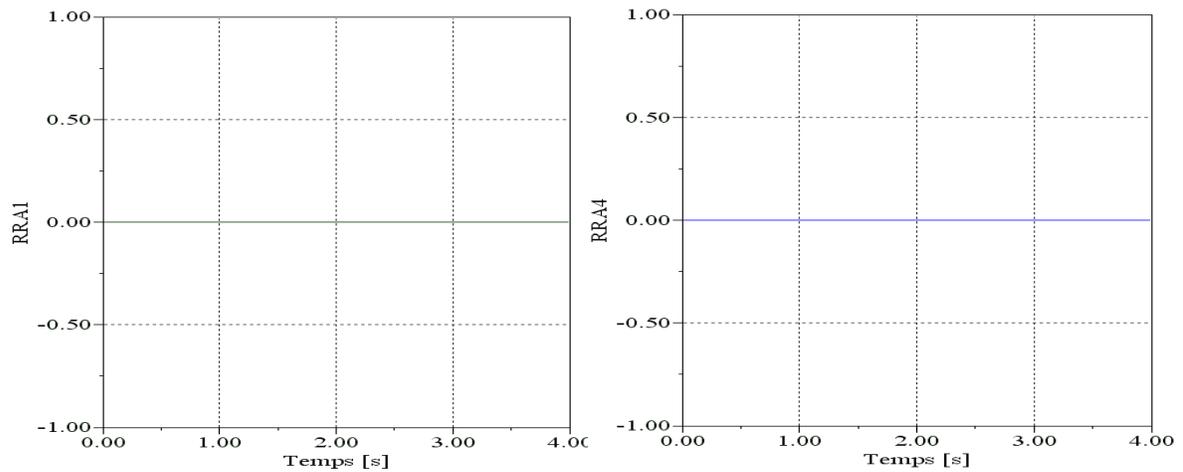
\* **Sensibilité du détecteur  $Df_2$**

On crée un défaut entre le temps  $T_1 = 2s$ ,  $T_2 = 2.05s$  et on injecte au niveau de la

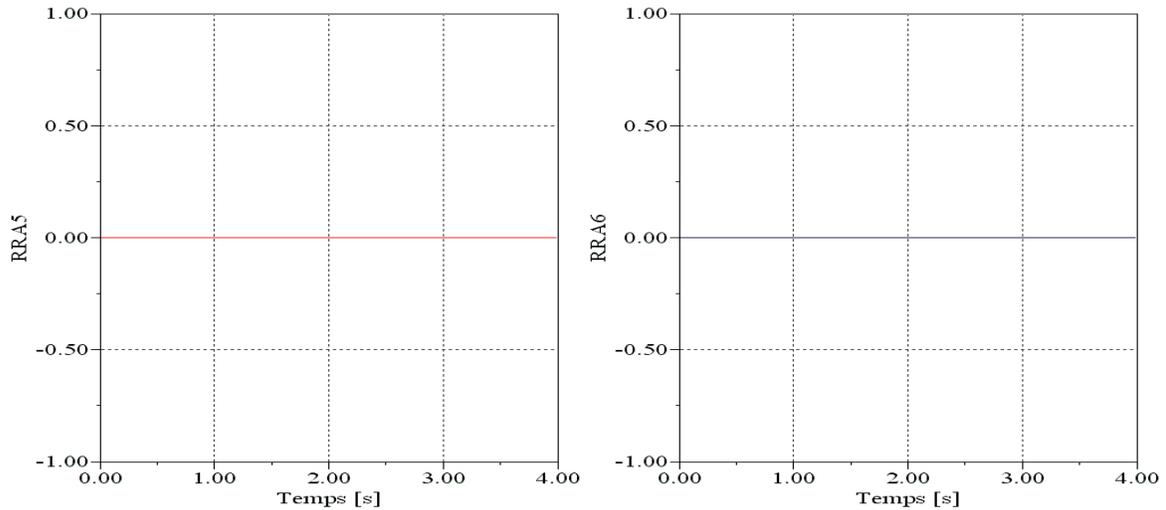


jonction  $1_{R2}$ . La défaillance sur l'élément  $R_2$  fait intervenir fortement le détecteur  $Df_2$  dans les résidus  $RRA2$  et  $RRA3$ . Les résultats de simulation sont représentés par les **Figures 3.16**, **3.17** et **3.18** :

**Figure 3.16** : Sensibilité du  $RRA2$  et  $RRA3$  représentée par le capteur  $Df_2$



**Figure 3.17** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA1$  et  $RRA4$

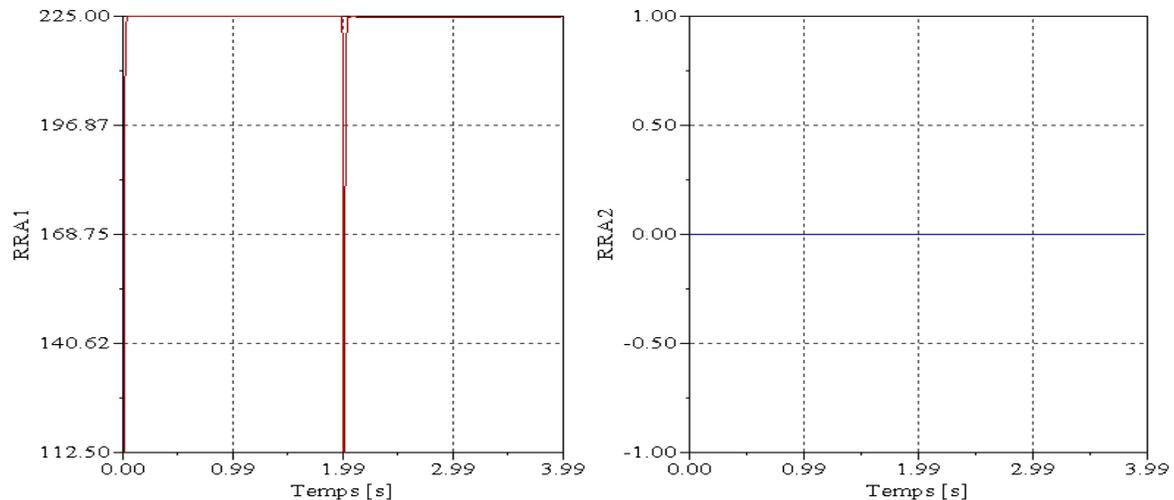


**Figure 3.18** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA5$  et  $RRA6$

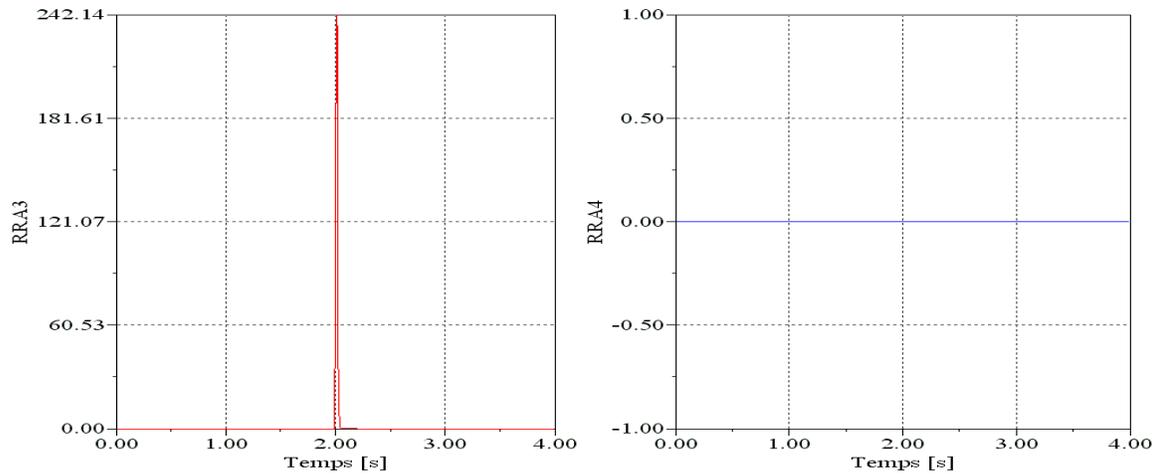
On constate que les résidus  $RRA2$ ,  $RRA3$  sont sensibles aux défaillances de l'élément  $R_1$  durant cette durée, parce que les deux résidus dépendent du détecteur  $Df_2$ , par contre les résidus  $RRA1$ ,  $RRA4$ ,  $RRA5$  et  $RRA6$  sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

\* **Sensibilité du détecteur  $Df_3$**

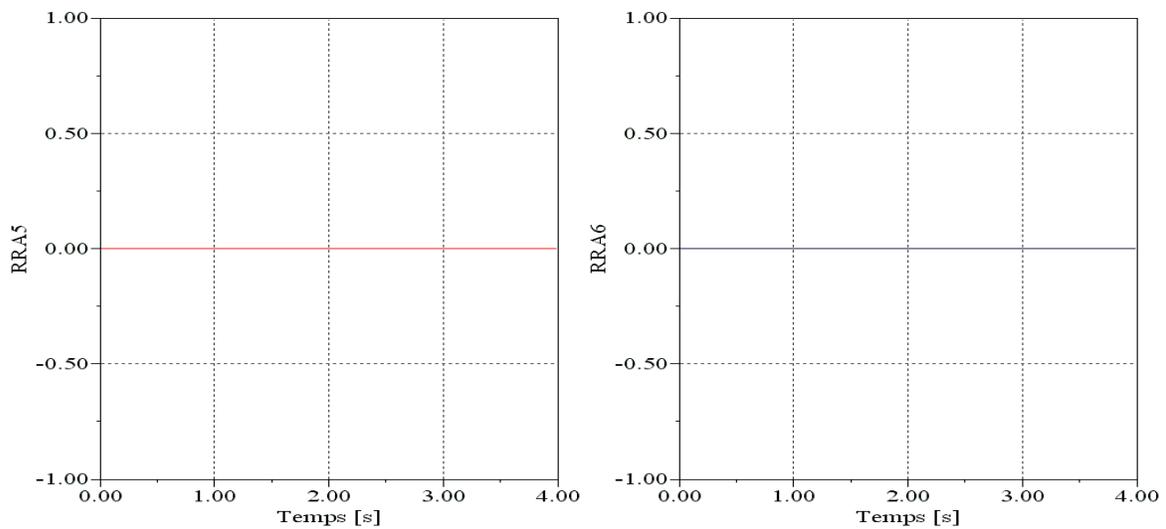
On crée un défaut entre le temps  $T_1 = 2s$ ,  $T_2 = 2.1s$  et on injecte au niveau de la jonction  $1_{R_3}$ . La défaillance sur l'élément  $R_3$  fait intervenir fortement le détecteur  $Df_3$  dans les résidus  $RRA1$  et  $RRA3$ . Les résultats de simulation sont représentés par les **Figures 3.19**, **3.20** et **3.21** :



**Figure 3.19** : Défaillance dans le résidu  $RRA1$  et fonctionnement normal du résidu  $RRA2$



**Figure 3.20** : Défaillance dans le résidu  $RRA3$  et fonctionnement normal du résidu  $RRA4$



**Figure 3.21** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA5$  et  $RRA6$

On remarque que les résidus  $RRA1$  et  $RRA3$  sont sensibles aux défaillances de l'élément  $R_3$  durant cette durée, parce que les deux résidus dépendent du détecteur  $Df_3$ , par contre les résidus  $RRA2$ ,  $RRA4$ ,  $RRA5$  et  $RRA6$  sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

\* **Sensibilité du détecteur  $Df_4$**

On crée un défaut entre le temps  $T_1 = 2s$ ,  $T_2 = 2.05s$  et on injecte au niveau de la jonction  $1_{R4}$ . La défaillance sur l'élément  $R_4$  fait intervenir fortement le détecteur  $Df_4$  dans les résidus  $RRA4$  et  $RRA5$ . Les résultats de simulation sont représentés par les **Figures 3.22**, **3.23** et **3.24** :

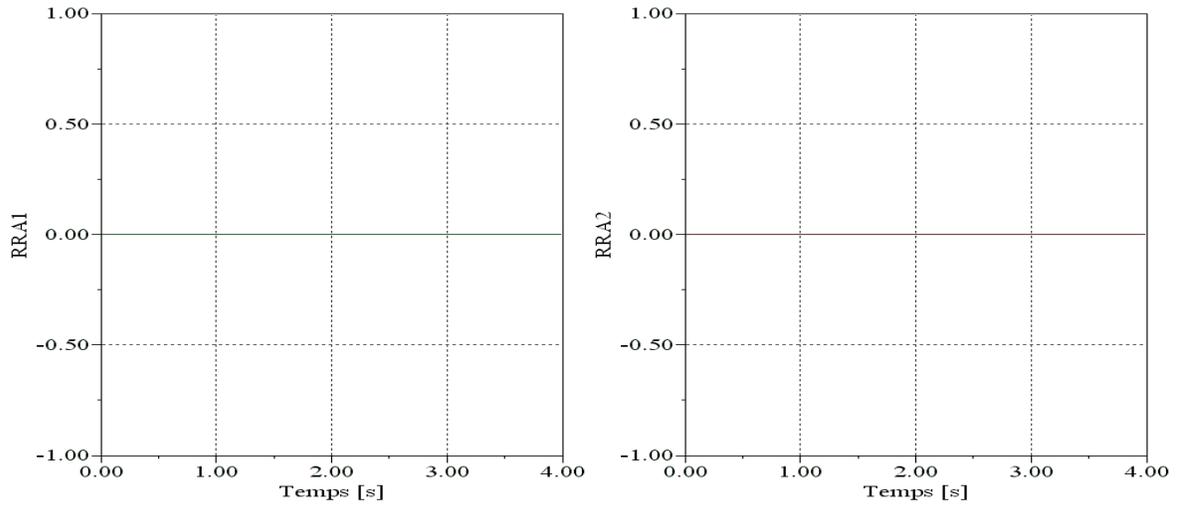


Figure 3.22 : Fonctionnement normal du résidu *RRA1* et *RRA2*

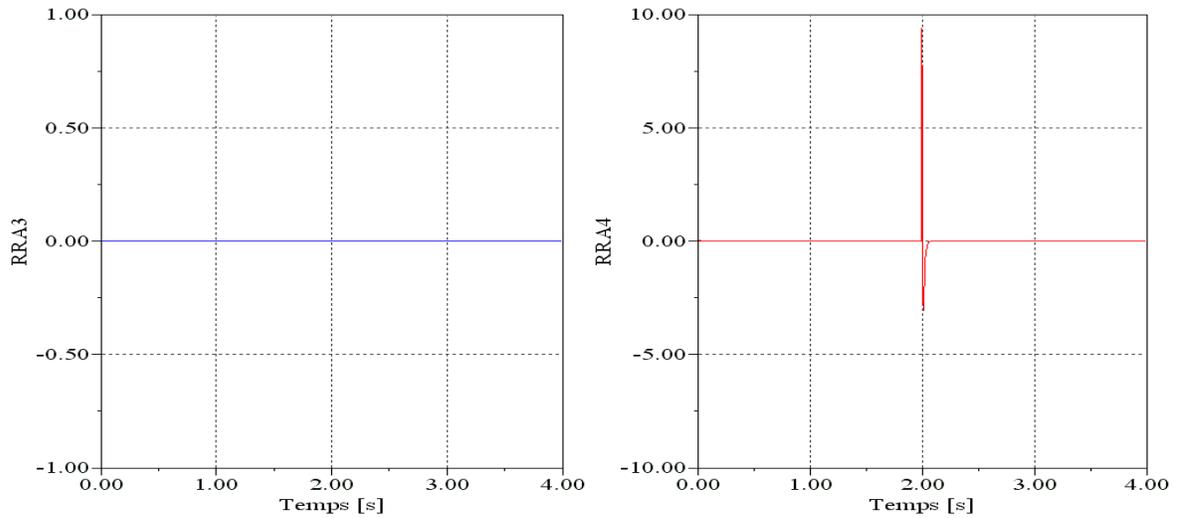


Figure 3.23 : Fonctionnement normal du résidu *RRA3* et défaillance dans le résidu *RRA4*

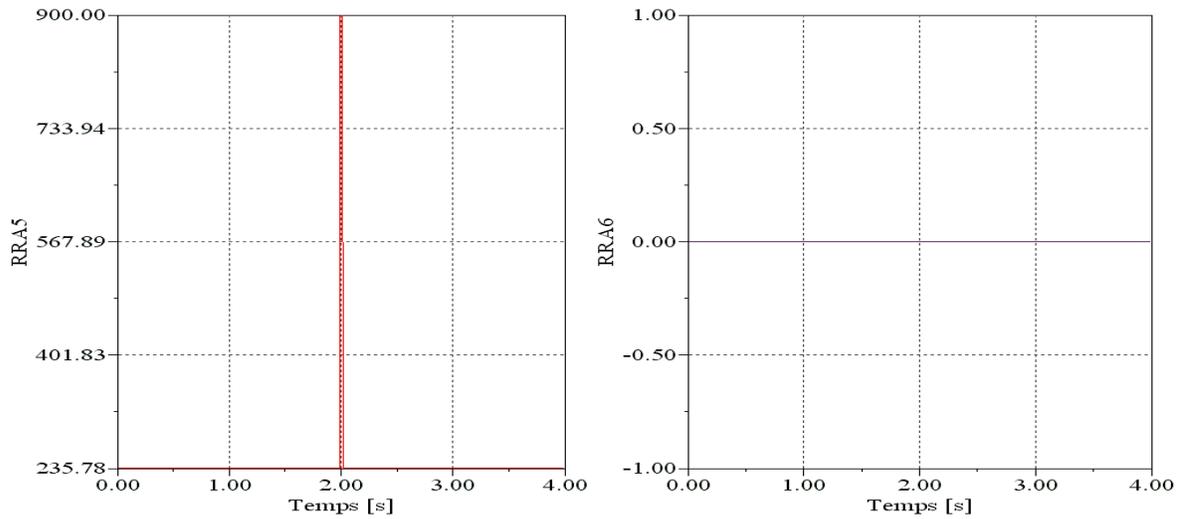
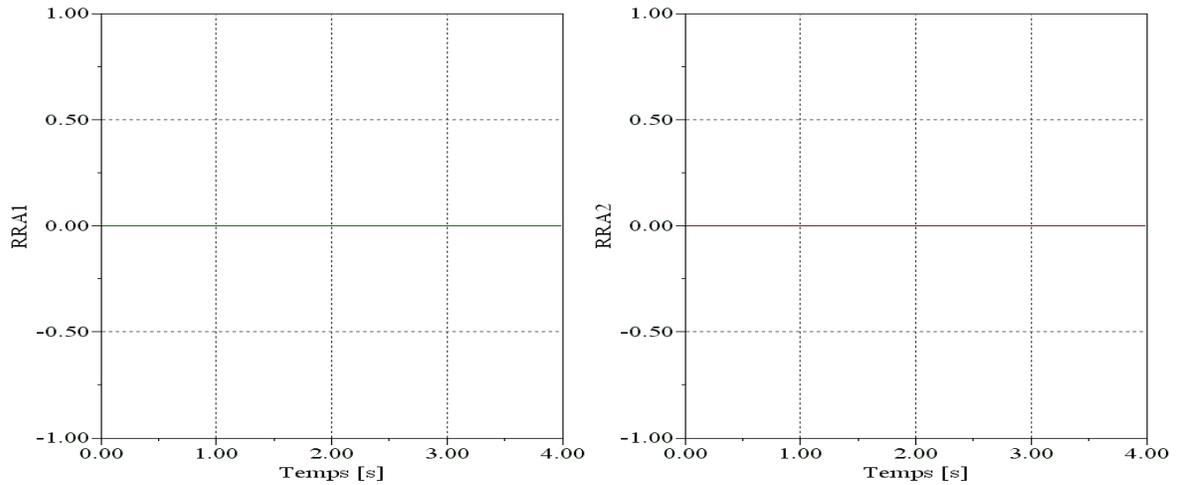


Figure 3.24 : Défaillance dans le résidu *RRA5* et fonctionnement normal du résidu *RRA6*

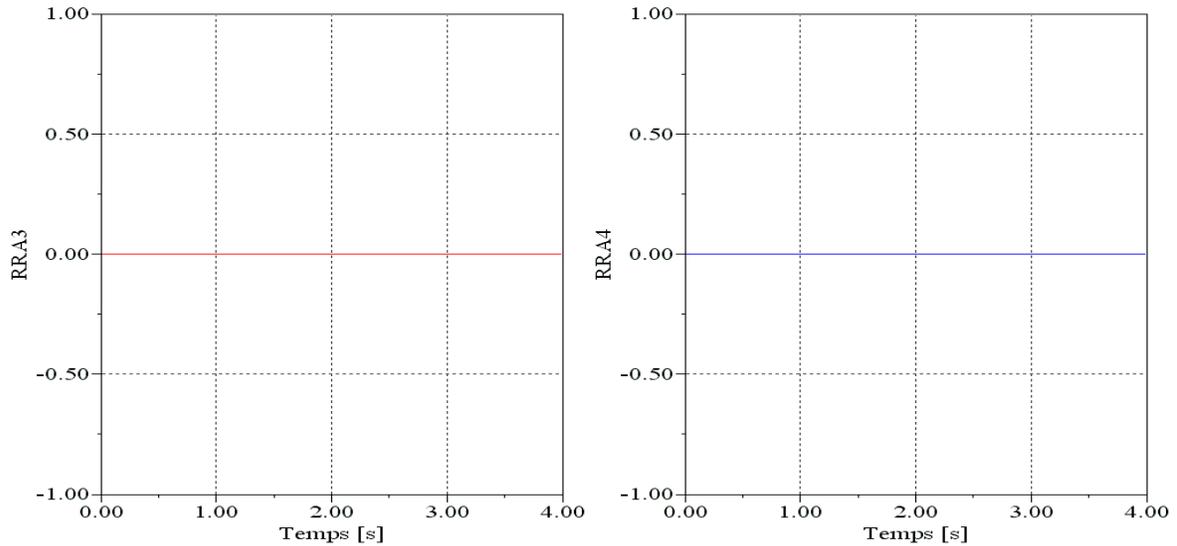
On constate que le résidu  $RRA4$  et  $RRA5$  sont sensibles aux défaillances de l'élément  $R_4$  durant cette durée, parce que les deux résidus dépendent du détecteur  $Df_4$ , par contre les résidus  $RRA1$ ,  $RRA1$ ,  $RRA2$ ,  $RRA3$  et  $RRA6$  sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

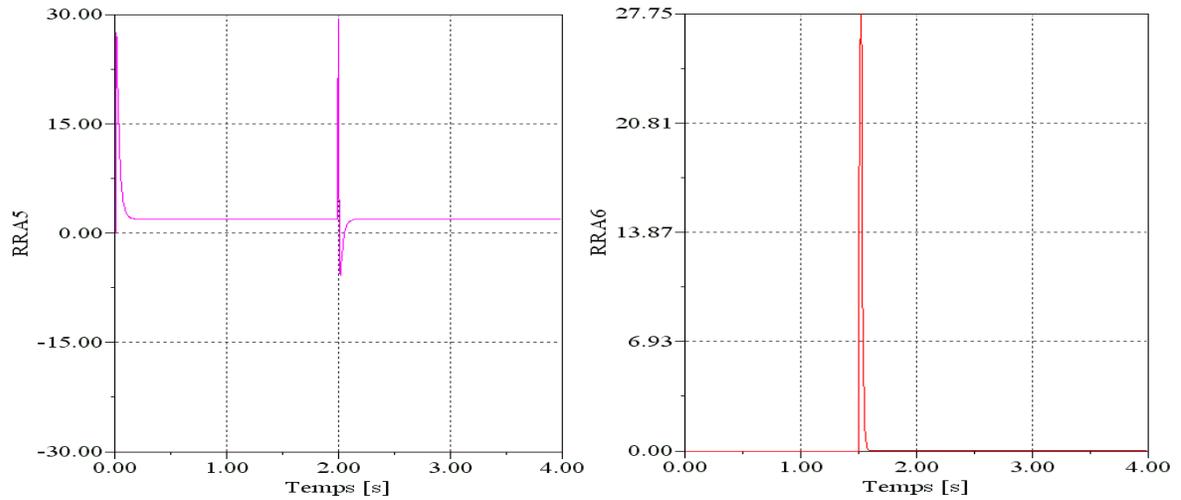
**\* Sensibilité du détecteur  $Df_5$**

On crée un défaut entre le temps  $T_1 = 2s$ ,  $T_2 = 2.1s$  et on injecte au niveau de la jonction  $1_{R5}$ . La défaillance sur l'élément  $R_5$  fait intervenir fortement le détecteur  $Df_5$  dans les résidus  $RRA5$  et  $RRA6$ . Les résultats de simulation sont représentés par les **Figures 3.25, 3.26 et 3.27**.



**Figure 3.25** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA1$  et  $RRA2$

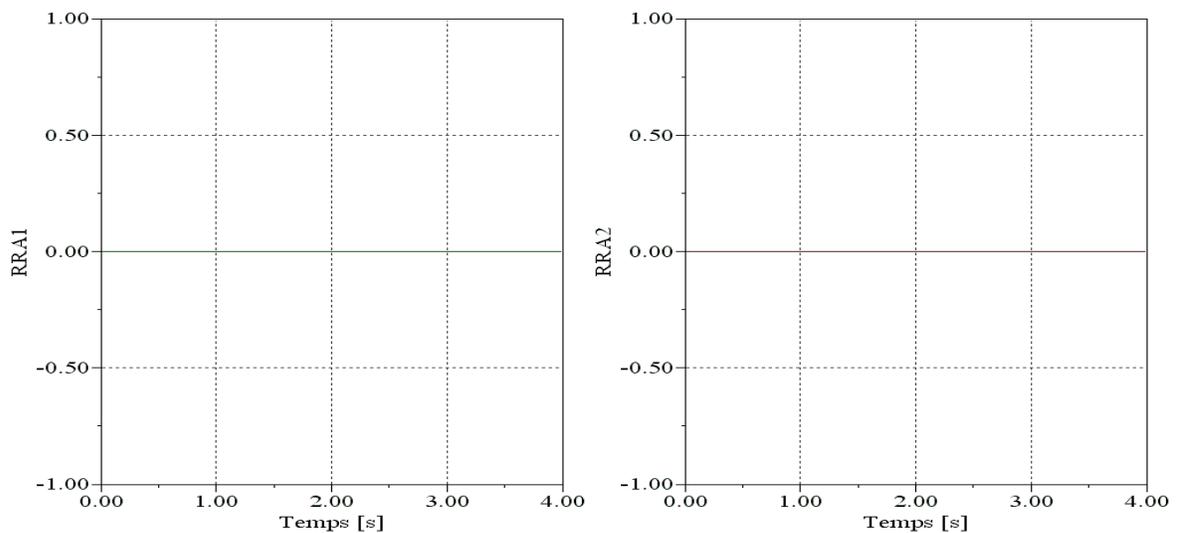


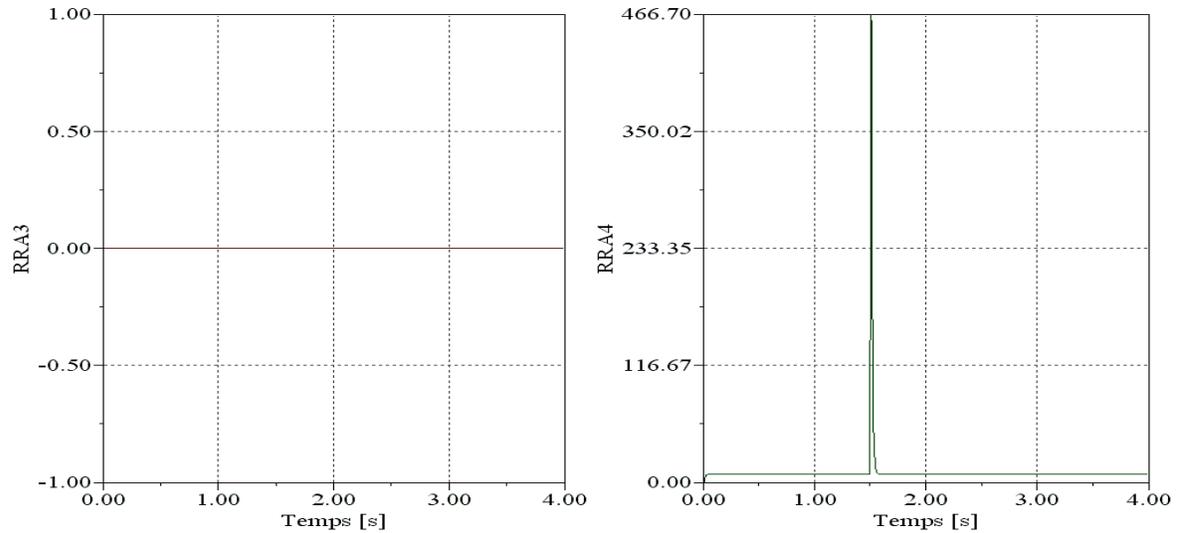
**Figure 3.26** : Fonctionnement normal du résidu  $RAA3$  et  $RA4$ **Figure 3.27** : Défaillance dans le résidu  $RAA5$  et résidu  $RAA6$ 

On constate que les résidus  $RAA5$  et  $RAA6$  sont sensibles aux défaillances de l'élément  $R_5$  durant cette durée, parce que les deux résidus dépendent du détecteur  $Df_5$ , par contre les résidus  $RAA1$ ,  $RAA2$ ,  $RAA3$  et  $RAA4$  sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

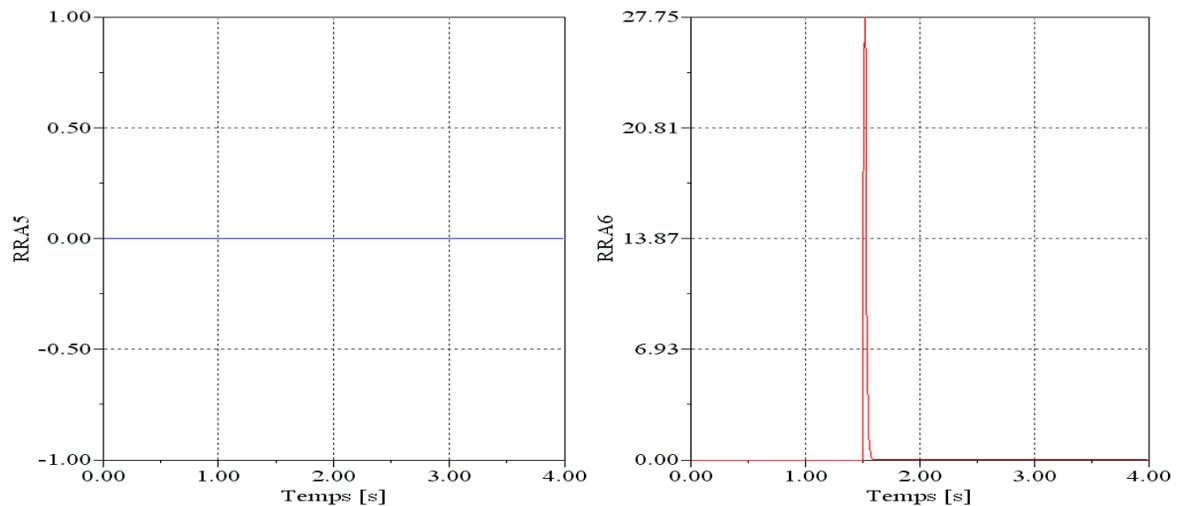
\* **Sensibilité du détecteur  $Df_6$**

On crée un défaut entre les temps  $T_1 = 1.5s$ ,  $T_2 = 1.6s$  et on injecte au niveau de la jonction  $I_{R6}$ . La défaillance sur l'élément  $R_6$  fait intervenir fortement le détecteur  $Df_6$  dans les résidus  $RAA4$  et  $RAA6$ . Les résultats de simulation sont représentés par les **Figures 2.28**, **2.29** et **2.30** :

**Figure 2.28** : Fonctionnement normal du résidu  $RAA1$  et  $RAA2$



**Figure 3.29** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA3$  et défaillance dans le résidu  $RRA4$



**Figure 3.30** : Fonctionnement normal du résidu  $RRA5$  et défaillance dans le résidu  $RRA6$

On remarque que les résidus  $RRA4$  et  $RRA6$  sont sensibles aux défaillances de l'élément  $R_5$  durant cette durée, parce que les deux résidus dépendent du détecteur  $Df_6$ , par contre les résidus  $RRA1$ ,  $RRA2$ ,  $RRA3$  et  $RRA5$  sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

Les figures précédentes montrent bien l'efficacité de la méthodologie proposée par l'outil bond graph pour la conception des générateurs de résidu de la surveillance. Cependant il est impossible de localiser les défaillances simultanées qui affectent quelques composants.

### 3.10. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre des approches complètement basées sur le bond graph pour la conception d'un système de diagnostic à base de modèle qui consiste à utiliser les relations de structure des jonctions et les lois constitutives des éléments pour générer les

relations de redondance analytique (indicateurs de défaillances). Le placement des capteurs n'est pas clairement montré dans le processus. Les équations de contraintes ne sont pas déduites d'une façon systématique. Il n'existe pas dans la littérature de méthode générique et globale de génération des *RRAs*. Les simulations sont faites pour montrer l'efficacité de la méthode pour la détection des défauts.

L'outil bond-graph permet de générer d'une façon systématique les *RRAs* directement à partir du bond-graph. Dans la littérature les systèmes physiques concernés par cette méthodologie sont décrits par une simple énergie et concernent des systèmes linéaires et en boucle ouverte. Les défaillances détectées sont de type comportemental spécifiant l'évolution des composants du système. La génération des *RRAs* sur le bond graph est basée sur le parcours de chemins causaux pour le diagnostic des défauts. Pour un système non linéaire la procédure est complexe et le choix des couplages est souvent intuitif. Le graphe devient rapidement complexe avec l'augmentation du nombre de variables.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Le présent travail a apporté une contribution à l'étude des performances dynamiques des convertisseurs statiques de l'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative (les onduleurs).

Les systèmes en électrotechnique sont caractérisés par la mise en œuvre d'énergie électrique. L'outil bond graph à vocation pluridisciplinaire nous a permis de décrire par une approche unifiée ce type de convertisseur de l'électronique de puissance. Toutefois, la complexité de ces phénomènes nécessite une analyse pour le choix des variables de puissance. L'application de cet outil sur un onduleur monophasé et triphasé a permis de représenter clairement les phénomènes de conversion d'énergie au sein du système grâce au caractère graphique du modèle d'une part et de prédire l'évolution du système grâce à sa représentation dynamique d'autre part.

Dans ce travail on a réalisé une simulation sur un modèle d'un onduleur monophasé et triphasé. On a vu que l'interrupteur (diode, thyristor, triac, transistor, etc...) est un élément essentiel permettant d'assurer l'échange d'énergie entre deux phases (continue, alternative). Ce modèle a été validé par l'utilisation du logiciel SYMBOLS.

L'outil bond-graph et le logiciel SYMBOLS se sont avérés des moyens puissants et commodes pour élaborer des modèles en vue du diagnostic. Les résultats ont été satisfaisants, étant donné qu'on a simulé des processus avec les paramètres correspondants à une autre modélisation [18], et on a obtenu des résultats similaires. L'analyse des résultats obtenus a permis de mettre en évidence l'évolution des variables d'état du système au cours du temps. Cette analyse a permis de mieux comprendre les aspects dynamiques du système.

Cette étude permet d'ouvrir un horizon de recherche fructueux dans l'application de cet outil sur les systèmes d'aide à la décision. Cependant, on a rencontré quelques contraintes dans l'électronique de puissance, notamment sur :

- La représentation des phénomènes présents, caractérisés par le couplage de différents domaines de la physique avec une grande complexité et une non-linéarité.
- La difficulté de la mise en œuvre des phénomènes physiques dans le processus.
- La détection, la localisation et le diagnostic des processus à risques, surtout dans les systèmes de puissance.

- Ils existent quelques limites de l'outil bond graph pour les modèles à paramètres non localisés ou incertains.

Cette démarche de modélisation est étendue pour être une méthodologie générale d'étude et d'analyse des systèmes complexes d'ordre non parfait, avec les possibilités qu'ils offrent pour la conception des lois de commande en se basant sur les propriétés structurelles et causales du modèle bond graph.

La classification descriptive de l'ensemble des phénomènes et composants présents en électronique de puissance permettant de définir une bibliothèque de modèles pour la modélisation des processus dans ce secteur. Comme exemple, l'interrupteur est pris pour illustrer l'efficacité de l'outil bond graph pour la modélisation ainsi que pour la conception du système de diagnostic d'une part et l'identification paramétrique d'autre part.

Le diagnostic par Bond Graph a déjà fait l'objet de divers travaux, la transformation du Bond Graph constitue une étape supplémentaire pour la génération des relations de redondance analytique. Il illustre l'application de Redondance Analytique de système non linéaire en industrie (l'onduleur monophasé et triphasé) qui s'intéresse aux défauts du processus, on utilise un algorithme de placement de capteurs pour détecter et isoler ces défauts et assurer la surveillance et la localisation des défaillances de ce processus avec le minimum de capteurs. Les résidus ont été produits à travers l'analyse structurelle des équations du système.

Enfin, dans ce qui a été réalisé, les résultats trouvés dans la partie simulation sont intéressants car les courbes réagissent exactement aux défauts infectés à l'instant précis, ceci confirme l'efficacité de cette méthodologie.

# ANNEXES

## ANNEXE

---

### ✓ Outil de simulation

Il existe plusieurs logiciels de modélisation et de simulation par bond graph. Symbols 2000, 20-Sim et Camp-G est les plus connus et les plus utilisés. Parmi eux nous avons opté pour SYMBOLS 2000 (System Modeling by Bond graph Language and Simulation) qui fonctionne sous l'environnement de C++ Builder [25].

Les caractéristiques principales du logiciel Symbols 2000 sont les suivantes :

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

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

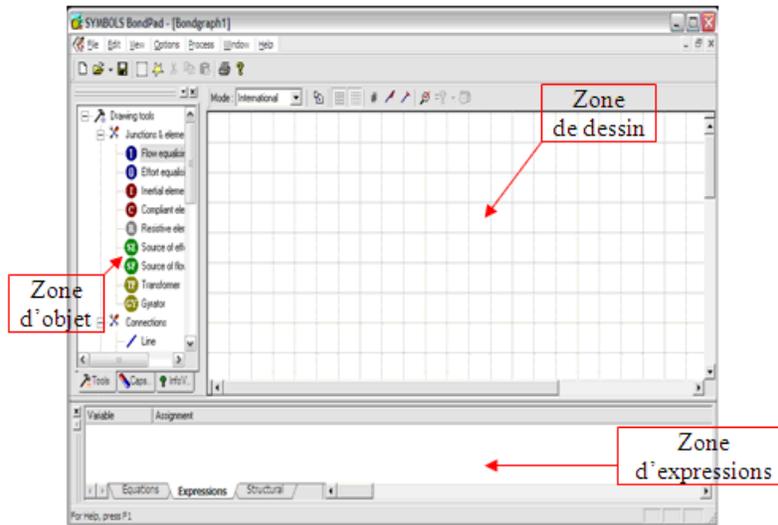
SYMBOLS 2000 est composé des modules suivants :

- **Le module Bond Pad**

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

Quand on ouvre BondPad, la fenêtre principale apparaît comme le montre la **Figure 4.1**.

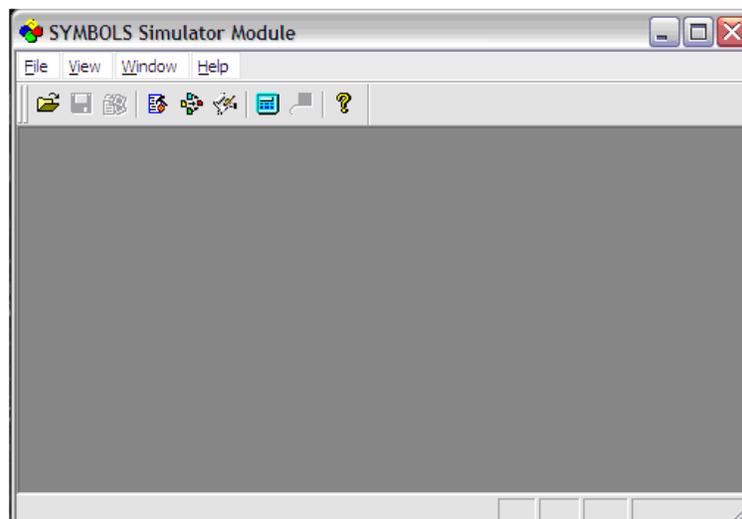
La zone d'objet contient les outils de dessin et de modification du modèle bond graph et contient aussi une bibliothèque de capsules. Les capsules et les outils disponibles dans la zone d'objet permettent de concevoir un modèle bond graph dans la zone de dessin. La zone d'expression permet d'afficher les équations correspondantes au modèle bond graph.



**Figure 4.1:** Fenêtre du module BondPad

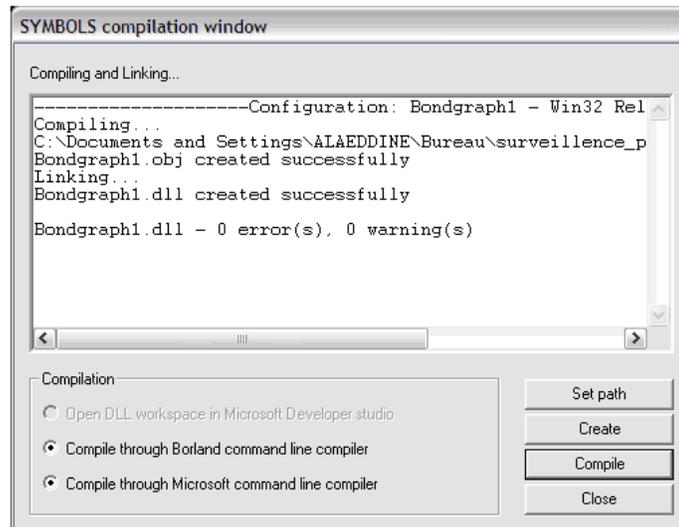
- **Le module du simulateur**

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



**Figure 4.2:** Fenêtre du simulateur

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

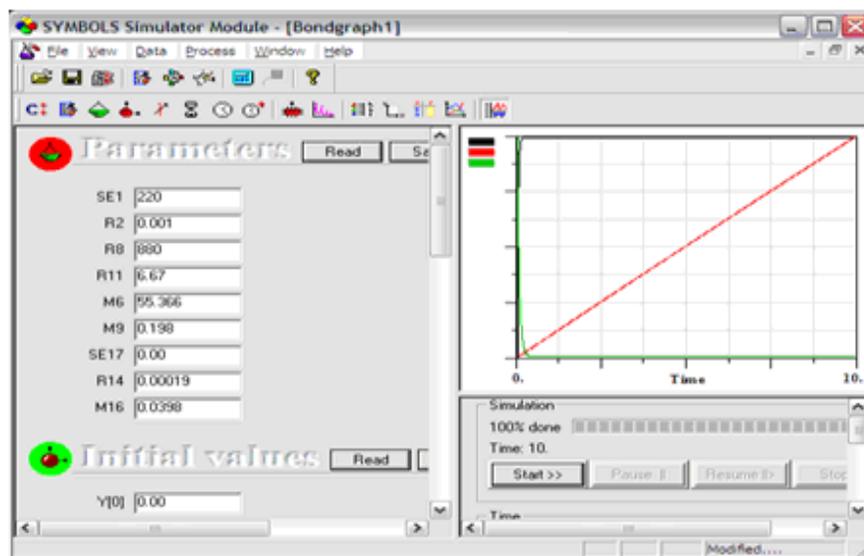


**Figure 4.3:** Fenêtre de compilation.

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

1. Affecter les valeurs des composants.
2. Affecter les valeurs initiales et les valeurs finales des courbes de simulation.
3. Appuyer sur la commande 'START' pour faire la simulation.

Les courbes tracées sont montrées dans la **Figure 4.4**.



**Figure 4.4:** Fenêtre des courbes

Ou bien l'affichage de chaque graphe dans une échelle, les titres d'axes, les couleurs des courbes, les sous-titres, les échelles et les étiquettes ...etc. peuvent être modifié en utilisant la commande de format.

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

# BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternatif (volume 4). Edition tec&doc, 1995.
- [2] *Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications*. Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [3] *Onduleurs et harmoniques*, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.
- [4] T. Wildi : *Electrotechnique*, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999). .
- [5] *Commande numérique, régimes intermédiaires et transitoires*, Techniques d'ingénieur, traité de génie électrique D.3643-3.
- [6] R. Lozano, D. Taoutaou, *Identification et commande adaptatif*, HERMES, Parie 2001.
- [7] C. Canudas de Wit, *Modélisation, Contrôle vectoriel et DTC. Commande des moteurs asynchrones I* Editions Hermès.
- [8] P. Borne, G. Dauphin, *Modélisation et identification des processus*, T2, Edition Technip, Paris, 1992.
- [9] F. Busson, *Les Bond-Graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie de procédés*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 2002.
- [10] G. Dauphin-Tanguy, *Les bond graphs et leur application en mécatronique*, Techniques d'ingénieur, traiter Informatique industrielle, S 7 2222, 1999.
- [11] G. Gandanegara, DEA Systèmes Automatiques, *Méthodologie de conception systémique en Génie Electrique à l'aide de l'outil Bond Graph : Application à une chaîne de traction ferroviaire*, Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 7 Novembre 2003.
- [12] B. Ould Bouamama, J.U. Thoma et J.P. Cassar, *Bond graph modélisation of stream condensers*, in: proceeding of the IEEE international conference on systems, man and cybernetic, Vol.3, pp.2490-2494, Olando, USA, 16-17October, 1997.
- [13] B. Ould Bouamama et J. Thoma, Les Bond Graphs, sous la direction de Geneviève Dauphin-Tanguy, *Chap. 6 : Procédés thermodynamiques et chimiques*, pp. 236-277, Collection IC2, Edition Hermes, Paris, 2000.
- [14] J. Thoma, B. Ould Bouamama, *Modélisation et Simulation Des Processus Thermiques et Chimique : Application des bond-Ggraphs en génie des procédés*, Lille, France, Juillet 1998.

- [15] Basse Sambre-E.R.I.SA Moustier-sur-Sambre, *Conduite de colonne de distillation Application sur simulateur*, ENSPM Formation industrie, 2002.
- [16] M. Vergé, D. Jaume. *Modélisation structurée des systèmes avec les Bond-Graphs*, Editions TECHNIP 2004.
- [17] M. Vergé, *Modélisation pour l'ingénieur : approche par Bond Graph*, LMSP, ENSAM, 151 Bd de l'hôpital, Paris, 75013 France, 19-22 septembre 2005.
- [18] M. Chami, *Modélisation et simulation des systèmes multi-physiques à l'aide de réseaux dynamiques hybrides à composants : Application à la conversion d'énergie et au transport électrique terrestre*. Thèse de Doctorat université de Franche-Comté et de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'Université Hassan II Ain Chok du Maroc, 2005.
- [19] M. ALHAJ DIBO, *Validation de données et diagnostic des systèmes incertains à l'aide de l'analyse par intervalle*. Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 18 juillet 2005.
- [20] Y. Boudjemline, K. Nemla, *Surveillance d'un système des réservoirs par Bond Graph*. Mémoire d'ingénieur d'état, institut d'électrotechnique, université de Sétif. Juin 2005
- [21] F. Busson. *Les Bond Graphs multienergie pour la modélisation et surveillance en génie des procédés*. France, 2002.
- [22] W. Elostá, *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 2005.
- [23] M. Khemliche, B. Ouled Bouamama et H. Haffaf, *Sensors and actuators journal* « sensors placement for diagnosability on Bond Graph model, page 92-98, volume 4, Mars 2006.
- [24] C. Lurette, *Développement d'une technique auto-adaptative pour la classification dynamique de données évolutives : Application à la supervision d'une presse hydraulique*. Thèse de Doctorat université de Lille, 2003.
- [25] K. Medjaher, *Contribution de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels*. Thèse de Doctorat université de Lille, 2005.
- [26] A. Molina, *Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic*. Thèse de Doctorat université de Toulouse, 2005.
- [27] R. Mrani Alaoui Maître IEEA, *Conception d'un module de diagnostic a base des suites de bandes temporelles en vue de la super vision des procédés énergétique, 'Application en ligne à un générateur de vapeur'*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille, France, 9 Novembre 2004.

- [28] W. Nuninger, *Stratégie de diagnostic robuste à l'aide de la redondance analytique*. Thèse de Doctorat université de Lorraine, 1997.
- [29] B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, R. Litwak, *Surveillance d'un générateur de vapeur*, in: *Automatique et statistiques pour le diagnostic*, B. Dubuisson, ed, 166-199, Hermès, Paris, décembre 2001.
- [30] S. Rimaux, *Etude Des Propriétés Structurelles de Certaines Classes de Systèmes Physiques Non Linéaires Modélisés Par Bond Graph*. Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 1995.
- [31] M. Tagina, *Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 1995.
- [32] S. Taouaf, *Diagnostic logique des systèmes complexe dynamiques dans un contexte multi agent*. Thèse de Doctorat université de Grenoble 1, 2005.
- [33] R. Toscano, *Commande et diagnostic des systèmes dynamiques*. Ellipses, Paris, 2005.
- [34] M. Vergé et D. Jaune, *Détection de défauts par estimation d'état*. In AGI97, Angers, France, 1997.
- [35] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances*. Hermes, Paris, 1995.

## ملخص

إن الأنظمة الكهربائية تتميز بتنفيذ الطاقة الكهربائية. أداة الربط البيانية بخصائصها الهيكلية و السببية من جهة و بأسلوبها المتعدد المجالات لانجاز النماذج بطريقة عملية من جهة أخرى يسمح للطبيعة البيانية للمساهمة في تصميم أنظمة المراقبة لهذا النوع من محولات إلكترونيك الطاقة. إن تطبيق هذه الأداة على العاكس ذو طور واحد وثلاثة أطوار سمح بتمثيل بصفة واضحة ظواهر تحويل الطاقة (من المستمر إلى المتناوب) داخل هذا النظام باستغلال خاصيته التمثيلية من جهة و التنبؤ بتطور الأنظمة بواسطة تمثيل القواطع من جهة أخرى.

يتعلق هذا العمل المنجز بشكلين مختلفين لنمذجة العاكس بواسطة الرسم البياني ، الذي يسمح لنا لحساب العلاقات التحليلية الزائدة و الملتقطات (مبيانات الأعطاب ) للأنظمة الغير خطية في القطاع الصناعي التي تهتم بالأخطاء في الأنظمة. إستعملنا في هذا الإنجاز خوارزمية لوضع أجهزة إستشعار لإكتشاف و عزل هذه الأخطاء، و نقدم تشخيصا لهذه العملية، بواسطة الحد الأدنى من أجهزة الإستشعار.

**الكلمات المفتاحية :** الروابط البيانية، عاكس، النمذجة، التشخيص، العلاقات التحليلية الزائدة، الملتقطات.

---

---

## ABSTRACT

The electrical systems are characterized by the implementation of electrical power. The bond graph tool to its structural and causal properties in one hand and multi disciplinary models to achieve a generic manner in other hand, allows the designer contribution to the diagnostic process for these converters types power electronics. The application of this tool on a single-phase inverter and three-phase permit clearly to represent the phenomena of energy conversion (from continuous to alternative) within the system through a graphic model and predict the evolution of system through its representation of commutations (switches).

This work done here concerns two inverter types by bond graph modeling. In the first phase it concerns the single phase inverter and the second concerns the three Phase inverter. It shows the Analytical Redundancy Relations (residuals or fault indicators) of non-linear systems in the industry (the single and three phase inverters) which focuses on the shortcomings of the process, it uses an algorithm sensors placement to detect and isolate these failures and to provide the diagnosis of this process with the minimum of sensors.

**Key-word :** Bond graph, Inverter, Modeling, Diagnostic, Analytical Redundancy Relations, Sensors.

---

---

## RÉSUMÉ

Les systèmes en électrotechnique sont caractérisés par la mise en œuvre d'énergie électrique. L'outil bond graph à propriétés structurelles et causales d'une part, et à caractères multi disciplinaires pour réaliser les modèles d'une manière génériques, d'autre part, permet la contribution pour designer les processus de diagnostic pour ces types des convertisseurs de l'électronique de puissance. L'application de cet outil sur un onduleur monophasé et triphasé a permis de représenter clairement les phénomènes de conversion d'énergie (du continu à l'alternatif) au sein du système grâce au caractère graphique du modèle d'une part et de prédire l'évolution du système grâce à sa représentation des commutations (interrupteurs) d'autre part.

Le travail développé ici concerne deux volets de modélisation de l'onduleur par bond graph. Le premier est l'onduleur monophasé, et le second concerne l'onduleur triphasé. Il illustre les Relations de Redondance Analytique (résidus ou indicateurs de défauts) des systèmes non linéaires dans l'industrie (l'onduleur monophasé et triphasé) qui s'intéressent aux défauts du processus. On utilise un algorithme de placement de capteurs pour détecter et isoler ces défauts. On assure le diagnostic de ce processus avec le minimum de capteurs.

**Mots clés :** Bond graph, Onduleur, Modélisation, Diagnostic, Relations de Redondance Analytique, Capteurs.