

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1
UFAS1 (ALGERIE)**

THESE

**Présentée à la Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique
Pour l'obtention du diplôme de**

DOCTORAT EN SCIENCES

Option : AUTOMATIQUE

Par

Mme : LATRECHE SAMIA

THEME

**Techniques de surveillance des systèmes
multiénergies en génie des procédés**

Soutenu le .. / .. / 2016 devant un Jury composé de :

BELKHIAT SAAD	Prof. à l'université de Sétif	Président
MOSTEFAI MOHAMMED	Prof. à l'université de Sétif	Rapporteur
KHEMLICHE MABROUK	Prof. à l'université de Sétif	Co-rapporteur
TEBBIKH HICHAM	Prof. à l'université de Guelma	Examineur
MOUSS HAYET	Prof. à l'université de Batna	Examinatrice
KECHIDA SIHEM	Prof. à l'université de Guelma	Examinatrice
MEDDAD MOUNIR	M.C.A à l'université de BBA	Invité

Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein d'une collaboration entre le Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS) et le Service d'Automatique et d'Analyse des Systèmes (SAAS) de Bruxelles.

Je tiens tout d'abord à remercier mon Directeur de thèse M. Mohammed Mostefai, Professeur à l'Université Ferhat Abbas – Sétif 1, pour ses orientations quant à la faisabilité de mes travaux de recherche, ses grandes qualités humaines et son encouragement dans tout ce que j'entreprends ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Je ne l'en remercierai jamais assez.

Je remercie vivement mon Co-directeur de thèse M. Mabrouk Khemliche, Professeur à l'Université Ferhat Abbas – Sétif 1 et Directeur du laboratoire LAS pour sa présence sans relâche à mes côtés, pour ses orientations, son aide et pour son suivi de près. Je tiens à le remercier pour la grande liberté qu'il m'a accordée durant ce travail, ainsi que de ses qualités pédagogiques et humaines envers tous ses doctorants. Je le remercie infiniment.

Je remercie les Professeurs Raymond Hanus et Jean Claude Maun, pour leur accueil au sein du laboratoire SAAS à l'ULB de Bruxelles (Belgique) ainsi que dans leur équipe Détection et Isolation de Défauts dans les Systèmes Thermofluides.

Je remercie les Docteurs Mounir Meddad et Adil Eddiai, respectivement de l'université de Bordj Bou Arreridj et de l'université Hassan II de Casablanca, pour le soutien et l'intérêt qu'ils ont manifesté pour cette recherche.

Tous mes remerciements vont aussi aux membres de jury de soutenance de cette thèse. M. Saad Belkhiat, Professeur à l'Université Sétif 1, me fait un grand honneur d'accepter de présider le jury de soutenance.

M. Hicham Tebbikh, Professeur à l'Université de Guelma, dont son expérience lui confère une place honorable dans ce jury, je le remercie infiniment d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mme. Hayet Mouss, Professeur à l'Université de Batna, me fait un grand honneur d'accepter d'examiner ma thèse.

Mme. Sihem Kechida, Professeur à l'Université de Guelma, je la remercie vivement d'avoir répondu favorablement pour participer à l'examen de ce travail.

A un niveau plus personnel, je tiens à remercier mon mari Azzedine et mes enfants Hamza, Imène, Meriem, Ibrahim et Aya d'avoir été pour moi un soutien moral inébranlable et d'avoir accepté, surtout pendant les derniers mois où je cumulais rédaction de la thèse et activité professionnelle, une mère si peu présente.

Enfin, que tous mes collègues du Département d'Electrotechnique de Sétif soient remerciés et que les futurs thésards trouveront dans ce modeste manuscrit des informations utiles à leur recherche.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma mère

Samia

Nomenclature

<i>e</i>	Effort	Pression P, Température T, Potentiel chimique μ
<i>f</i>	Flux	Débit massique \dot{m}_1 , Flux d'enthalpy \dot{H}_1
<i>De</i>	Détecteur d'effort	Effort mesuré
<i>Df</i>	Détecteur de flux	Flux mesuré
<i>Se</i>	Source d'effort	Effort thermique et hydraulique
<i>Sf</i>	Flow source	Flux thermique et hydraulique
<i>R</i>	Composant résistif	Vanne, armature
<i>C</i>	Composant capacitif	Réservoir, tuyauterie
<i>I</i>	Composant inertielle	Phénomène de rotation
<i>RRA</i>	Relation de Redondance Analytique	Indicateur de fautes, Résidus
<i>s</i>	Opérateur de Laplace	$s = d/dt$
<i>1/s</i>	Opérateur intégral	$1/s = \int dt$
Φ	Evolution non linéaire des composants	$\Phi_R; \Phi_{CV}; \Phi_{CL}; \Phi_{CT1}; \Phi_{CT3}; \Phi_{CTS}; \Phi_{RT1}; \Phi_{RT3}; \Phi_{RTS}$
<i>R</i>	Détente de refroidissement	Vanne de détente dans le système de refroidissement
<i>CV</i>	Capacité de la vapeur	Tuyau traversé par le fluide en phase vapeur
<i>CL</i>	Capacité du liquide	Tuyau traversé par le fluide en phase liquide
<i>CT1</i>	Capacité du tube d'entrée 1	Le niveau du fluide dans le tube 1
<i>CT3</i>	Capacité du tube 3	Le niveau du fluide dans le tube 3
<i>CTS</i>	Capacité du tube de sortie	Le distillat dans le ballon de reflux
<i>RT1</i>	La résistance du fluide dans le tube 1	Vanne dans le tube 1
<i>RT3</i>	La résistance du fluide dans le tube 3	Vanne dans le tube 3
<i>RTS</i>	La résistance dans le tube du distillat	Vanne dans le tube de sortie
P_{l1}	Pression du liquide	Phénomène hydraulique
T_{l1}	Température du liquide	Phénomène thermique
C_{l1}	Concentration du liquide	Phénomène chimique
\dot{m}_{v1}	Débit massique de la vapeur	Phénomène hydraulique
\dot{H}_{v1}	Débit d'enthalpie de la vapeur	Phénomène thermique
\dot{n}_{v1}	Débit molaire de la vapeur	Phénomène chimique

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités et Techniques de surveillance par l'approche bond graph	5
I.1. Introduction	5
I.2. Terminologies de base	5
I.2.1. Processus Industriel	5
I.2.2. Défaut	6
I.2.3. Défaillance	6
I.2.4. Défauts capteurs	6
I.2.5. Défauts actionneurs	6
I.2.6. Défauts processus physique	6
I.2.7. Défauts contrôleurs	6
I.2.8. Panne	6
I.2.9. Résidu	6
I.3. Approches de la surveillance	6
I.4. Surveillance des systèmes par bond graph	7
I.5. Approche quantitative	7
I.6. Approche qualitative	8
I.7. Fonctions de la surveillance	8
I.7.1. Détection de défaut	9
I.7.2. Localisation de défaut	9
I.7.3. Diagnostic ou identification de défaut	9
I.8. Cahier de charges de la surveillance	9
I.8.1 Définition des objectifs	9
I.8.2 Définition des performances	9

I.8.3 Définition des contraintes	10
I.9. Représentation bond graph d'un système de surveillance	10
I.10. Généralités sur les relations de redondance analytique	11
I.11. Algorithme de placement de détecteurs	12
I.12. Techniques de génération des résidus en vue de la surveillance	14
I.12.1 Génération des résidus à partir des équations de structure des jonctions et des lois constitutives des éléments	14
I.12.1.1 Substitution de variables	14
I.12.1.2 Méthode directe	17
I.12.2 Génération des résidus à partir des chemins causaux	20
I.12.3 Génération des résidus en analysant le modèle	22
I.12.3.1 Matrice d'incidence	22
I.12.3.2 Graphe biparti orienté	25
I.12.4 Génération des résidus en appliquant l'algorithme de placement de détecteurs	27
I.13. Conclusion	31
Chapitre II : Description de la colonne de distillation	32
II.1. Introduction	32
II.2. Distillation	32
II.2.1. But de la distillation	32
II.2.2. Principes de la distillation	33
II.2.2.1. Pression et ébullition de la vapeur	33
II.2.2.2. Diagramme d'ébullition de point	33
II.2.3. Diverses méthodes de distillation	34
II.2.3.1. Distillation simple (distillation différentielle ou équilibrée)	34
II.2.3.2. Distillation instantanée (distillation à l'équilibre ou	34

vaporisation éclair)

II.2.3.3. Rectification	34
II.3. Colonne de distillation	35
II.3.1. Opération et terminologie de base	35
II.3.2. Conduite d'une colonne	35
II.3.3. Types de colonnes de distillation	37
II.3.3.1. Séparateur flash	37
II.3.3.2. Colonne de distillation continue	38
II.3.3.3. Colonne de distillation discontinue	40
II.3.4. Description de l'unité de distillation continue	39
II.3.4.1. Rebouilleur	39
II.3.4.2. Colonne à garnissage (virole)	40
II.3.4.3. Condenseur	40
II.3.5. Description de l'unité de distillation discontinue	40
II.3.5.1. Rebouilleur	41
II.3.5.2. Colonne à plateaux	41
II.3.5.3. Condenseur	41
II.4. Fonctionnement d'une colonne de distillation	41
II.4.1. Virole	42
II.4.2. Contacteurs liquide-vapeur	42
II.4.2.1. Plateaux	42
II.4.2.2. Garnissages	44

II.4.3. Appareils d'échange thermique	44
II.4.3.1. Rebouilleur	44
II.4.3.2. Condenseur	44
II.5. Caractéristiques d'une colonne de distillation	46
II.5.1. Puissance de la colonne	46
II.5.2. Débit	46
II.5.3. Retenue de la colonne	46
II.5.4. Efficacité	46
II.5.5. Finesse	47
II.5.6. Pertes de charge	47
II.6. Conclusion	47
Chapitre III : Détection et localisation des défauts capteurs dans le rebouilleur	48
III.1. Introduction	48
III.2 Détection et localisation des défaillances dans le rebouilleur	49
III.2.1 Description du rebouilleur	49
III.2.2 Modèle Bond-graph à mots	49
III.2.2.1. Modèle Bond-graph du phénomène hydraulique	52
III.2.2.2 Modèle bond graph du phénomène thermique	52
III.2.2.3 Modèle Bond-graph du phénomène chimique	53
III.3 Simulation	54
III.3.1. Défaillance au niveau du capteur de pression	54
III.3.2. Défaillance au niveau du capteur de température	56

III.3.3. Sensibilité du résidu RRA_3 à la défaillance du flux molaire	57
III.4 Conclusion	59
Chapitre IV : Détection et localisation des défauts composants dans le condenseur	60
IV.1. Introduction	60
IV.2. Description du processus	60
IV.2.1. Condenseur	60
IV.2.2. Présentation du condenseur	60
IV.2.3. Fonctionnement du condenseur d'une colonne de distillation	61
IV.2.4. Bond graph à mots	62
IV.2.5. Modèle Bond Graph d'un condenseur	63
IV.3. Relations de redondance analytique des résidus	67
IV.3.1. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] =$ [1101111110]	67
IV.3.2. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] =$ [0110111110]	68
IV.3.3. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] =$ [0010111110]	69
IV.3.4. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] =$ [01001111010]	70
IV.4. Simulation	70
IV.4.1. Sensibilité du détecteur Df_1	71
IV.4.2. Sensibilité du détecteur De_3	73
IV.4.3. Sensibilité du détecteur Df_3	75
IV.4.4. Sensibilité du détecteur De_4	77
IV.4.5. Sensibilité du détecteur Df_4	79

IV.4.6. Sensibilité du détecteur De_6	81
IV.5. Conclusion	83
Chapitre V : Détection et localisation des défauts processus dans les plateaux de la colonne	84
V.1 Introduction	84
V.2 Modèle chimique d'un plateau	84
V.3 Simulation de la sensibilité du détecteur Df_1 sur le phénomène chimique	88
V.4 Modèle hydraulique d'un plateau	89
V.5 Simulation de la sensibilité du détecteur Df_1 sur le phénomène hydraulique	92
V.5.1 : Schéma bloc de fonctionnement des résidus RRA_1 , RRA_2 et RRA_3	92
V.5.2 Schéma bloc de fonctionnement des résidus RRA_4 et RRA_5	93
V.6 Conclusion	94
Chapitre VI : Détection et localisation de défauts dans l'actionneur ultrasonore	95
VI.1 Introduction	95
VI.2 Modélisation graphique utilisant l'approche bond graph	95
VI.3. Description d'un actionneur piézo-électrique ultrasonore	96
VI.4. Circuit électrique équivalent	98
VI.5. Compilation et validation du modèle bond graph	99
VI.6 Détection et localisation des défauts dans l'actionneur ultrasonore	100
6.1 Linéarisation du modèle bond graph de l'actionneur	100
6.2 Génération des relations de redondance analytique (RRA)	101
6.3 Tableau de signatures des fautes	102
6.4 Sensibilité du détecteur Df_1 à partir des défauts de l'inertie $I1$ et de la résistance $R1$	104
VI.7 Conclusion	105

Sommaire

Conclusion générale et perspectives	106
Références bibliographiques	107
Curriculum Vitae	111

Introduction générale

Les travaux de recherche sur la surveillance ont mobilisé ces dernières années une large communauté de chercheurs dans des domaines différents. Les premiers travaux sur la surveillance proviennent des recherches dans le domaine médical par une application des systèmes experts en intelligence artificielle. [1]

Shortliffe (1984) expose un système de surveillance de maladies du sang dans lequel la connaissance représente l'expertise qu'a pu acquérir le médecin sur les relations qui existent entre les symptômes observés et les causes de dysfonctionnement du système à surveiller (le malade) [2]. De tels systèmes experts ont été plus tard exploités pour la supervision des hauts fourneaux de Sollac Frydman. (2001) [3].

La contribution à la surveillance des processus par l'approche bond graph a été entamée en 1996 à l'ECL (Equipe SFSD – Ecole Centrale de Lille) [4]. Cette collaboration se poursuit dans le cadre de l'axe transversal "Bond graph et Surveillance" mis en place depuis 1998.

L'outil Bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissance des systèmes physiques pluridisciplinaires, est aussi un excellent support pour l'étude de la surveillance des modèles [5], [6], [7], [8]. Cependant, pas mal d'équipes utilisent les Bond graph pour les problèmes de surveillance, on cite principalement Linkens à l'Université de Sheffield, Vergé (LAAM, CNAM de Paris) et Gawthrop à l'Université de Glasgow. Dans ces travaux, le modèle Bond graph est souvent utilisé pour déterminer d'autres formes de représentation des systèmes permettant ainsi l'utilisation des méthodes classiques (schéma bloc Marrison & Gawthrop, Lucas & Evard) [9], [10].

L'étude de la surveillance des systèmes thermodynamiques est importante car comme nous l'avons vu, ce sont des systèmes à risque. Cette étude reste un problème ouvert du fait de la difficulté de modélisation de ces systèmes fortement non linéaires, et l'impossibilité de mesurer directement un grand nombre de variables [11].

Afin de garantir leur compétitivité, les systèmes modernes de production doivent satisfaire à des critères liés à des facteurs de coût de fonctionnement et/ou de productivité et/ou de qualité, ceux-ci peuvent être rassemblés sous un indice de performance global que l'on cherchera à optimiser. A ces contraintes économiques peuvent s'ajouter d'autres contraintes telle que par exemple la sécurité du système de production, voire des contraintes environnementales [12], [13], [14], [15].

Le processus consiste à produire un constituant et le pilotage doit satisfaire des performances données sous certaines contraintes. Cet objectif n'est pas uniquement réservé aux systèmes de production, mais peut concerner tous les systèmes (transport, économie, ...) [16], [17].

Les performances nominales qui sont en général atteintes quand le système opère dans des conditions de fonctionnement normal, se dégradent à l'apparition d'un défaut, qu'il s'agisse d'une défaillance d'instrumentation ou d'un composant du système. Afin de garantir que les performances atteintes correspondent à celles initialement désirées ; il convient de s'assurer que le système opère en mode de fonctionnement normal. Dans ce contexte, la sûreté de fonctionnement est devenue un véritable enjeu sociétal. C'est à cette fin que des méthodes de diagnostic de défauts et de commande tolérante aux défauts ont été développées. Plus qu'en commande, la validité des résultats de diagnostic dépend de l'invariance du modèle utilisé pour décrire le fonctionnement normal. En général, celui-ci n'est validé que dans une région proche du point de fonctionnement nominal, ce qui est donc paradoxal vis-à-vis du but à atteindre. Comment s'assurer que le système de diagnostic développé soit le plus performant possible ? Pour répondre à une telle question, il convient tout d'abord de définir en vertu de quels critères le système peut être évalué. D'une manière générale, nous pouvons regrouper les différents critères de performance du système de détection de la manière suivante : Détectabilité, Isolabilité, Sensibilité, Robustesse, Coût économique et Temps de développement [18], [19].

A l'image de ce qui se pratique en médecine, le diagnostic des systèmes repose sur une stratégie très simple, consistant à évaluer les symptômes obtenus en comparant des indicateurs de l'état courant du système à des indicateurs de fonctionnement normal établis à partir des modèles. Une interprétation de ces symptômes permet en général d'isoler le composant ou l'instrument défaillant [20], [21].

Pour la raison mentionnée précédemment, et dans l'application choisie, dans la colonne de distillation la pression de fonctionnement est un des paramètres fondamentaux lors de la conception. On régule en fait la pression sur chaque plateau, à de faibles variations près, dues à des phénomènes hydrodynamiques et chimiques [22], [23], [24], [25], [26].

La colonne est composée principalement d'un rebouilleur, d'un condenseur et d'une virole (système de plateaux). Le rebouilleur d'une colonne de distillation est composé d'un thermoplongeur sous forme de cartouche qui assure le chauffage électrique du liquide rentrant dans le rebouilleur à travers des vannes d'alimentation [27], [28]. Le condenseur est un appareil d'échange thermique qui a pour rôle d'engendrer le flux liquide et il permet principalement de transformer la vapeur en liquide. Son rôle secondaire est de refroidir le flux de vapeur en le faisant changer d'état, il est donc un échangeur-condenseur [29], [30].

Pour pouvoir modifier les débits internes dans la colonne et adoucir les variations de la composition des produits, on dispose en haut et en bas des ballons contenant des quantités de liquide nettement plus importantes que sur les plateaux :

- Grâce au ballon de tête, on peut augmenter le débit de reflux, donc les débits internes du liquide.
- Par vaporisation du contenu du ballon de fond, on peut augmenter les débits internes de la vapeur.

Pour disposer à tout instant de ces retenues, on régule les niveaux du liquide dans les deux ballons. D'un point de vue automatique, la pression sur le plateau de tête et les deux niveaux sont des sorties du système. En considérant les entrées sur lesquelles on peut agir et les commandes du système, on s'aperçoit qu'il est possible de régler deux autres sorties : on cherche généralement à régler les taux d'impureté dans le distillat et dans les résidus.

Dans la confection du modèle bond graph pour la surveillance, on va tenir compte de l'exclusion du débit de la composition de l'alimentation, qu'il faut considérer comme des perturbations et les entrées suivantes du système [31], [32], [33]:

- La puissance fournie pour condenser le flux des vapeurs de la tête de la colonne.
- Le débit du distillat.
- Le débit du reflux.

- Le débit du résidu.
- La puissance fournie au rebouilleur pour vaporiser une partie du résidu.

On dispose aussi de cinq commandes des cinq sorties suivantes :

- La pression de la tête.
- Le niveau du ballon de tête.
- Le niveau du ballon de fond.
- Le taux d'impureté dans le distillat.
- Le taux d'impureté dans le résidu.

Pour assurer le bon fonctionnement de la colonne, il est nécessaire de régler efficacement la pression de tête et les niveaux dans les ballons ; ces variables ont des dynamiques plus rapides que celles des taux d'impureté. Aborder globalement le problème de la régulation des cinq sorties, implique donc un mélange de dynamique aux constantes de temps sensiblement différentes, qui conduit à des problèmes de robustesse.

- Les régulations de base, pression de tête et de niveaux sont d'abord définies.
- Les régulations des taux d'impureté sont conçues ensuite sous l'hypothèse du bon fonctionnement des régulations de base.

Le manuscrit est composé de six chapitres qui peuvent être résumés comme suit :

- Généralités sur la surveillance et techniques de surveillance par bond graph.
- Description de la colonne de distillation utilisée comme application.
- Détection et localisation des défauts capteurs et actionneurs dans le rebouilleur.
- Détection et localisation des défauts composants dans le condenseur.
- Détection et localisation des défauts processus dans les plateaux.
- Détection et localisation des défauts dans un actionneur ultrasonore.

Généralités et Techniques de surveillance par l'approche bond graph

I.1. Introduction

La surveillance consiste en l'acquisition de données, la détection, la localisation et l'identification des défauts affectant un système réel, tout ceci se base sur la génération des résidus (indicateurs de défauts). La tâche de détection repose sur le placement de détecteurs sur l'installation permettant de comparer un système en fonctionnement réel (données disponibles en ligne à partir de mesures, consignes, ...) à son modèle (données théoriques). Cette comparaison donne lieu à la génération des résidus à partir de lesquels on peut prendre des décisions en poursuivant le fonctionnement en mode normal ou en passant à la localisation. La localisation permet de classer les défauts et ceci en séparant leur influence dans les différents résidus, l'identification des types de défauts est indispensable pour confirmer la tâche de surveillance. Afin d'éviter les terminologies différentes dans les applications industrielles de diagnostic, nous donnons dans ce paragraphe quelques définitions d'après ce qui ressort des tendances actuelles en matière de normalisation. En bond graph, différentes techniques de surveillance sont possibles, on peut citer [11], [12], [13].

- Génération des résidus à partir des structures des jonctions et à partir de la constitution des éléments.
- Génération des résidus en parcourant les chemins causaux sur le modèle de surveillance.
- Génération des résidus en analysant le modèle.
- Génération des résidus en appliquant l'algorithme de placement de détecteurs.

I.2. Terminologies de base

I.2.1. Processus Industriel : La notion de processus recouvre des secteurs industriels très variés. Au sens très large, un processus assure la fabrication d'un produit ou fournit un service

[11]. C'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 [16].

I.2.2. Défaut : Le terme faute ou défaut est généralement défini comme une imperfection physique liée à la conception ou à la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance [16].

I.2.3. Défaillance : La défaillance concerne la modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions prévues [16].

I.2.4. Défauts capteurs : Ecart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure [17].

I.2.5. Défauts actionneurs : Incohérence entre les commandes et la sortie [17].

I.2.6. Défauts processus physique : Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure ou des paramètres du modèle [17].

I.2.7. Défauts contrôleurs : Ecart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure [17].

I.2.8. Panne : La panne est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser une fonction requise sous des conditions de fonctionnement spécifiées [16], [17].

I.2.9. Résidu : Un résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle [16], [17].

I.2.9. Perturbations : Les perturbations sont dues aux bruit blanc qui sont souvent durant le fonctionnement.

I.3. Approches de la surveillance

Les algorithmes de surveillances sont tous basés sur le principe de la redondance des sources d'information. La redondance est obtenue par comparaison des données réelles issues du processus et des données théoriques fournies par un type de modèle. La comparaison des données réelles et celles théoriques permet de vérifier que l'information obtenue à un instant donné, reste conforme à des normes de fonctionnement normal. Cette étape met obligatoirement en œuvre des banques de données contenant tous les modes de fonctionnement.

La stratégie de diagnostic et la forme sous laquelle la connaissance est disponible, conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance.

Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de connaissance, on distingue deux types d'approches : les méthodes avec modèle et sans modèle opératoire [18].

I.4. Surveillance des systèmes par bond graph

Dans la représentation bond graph d'un système de surveillance, on distingue essentiellement deux parties : l'une concerne le transfert de la puissance et de l'énergie (formée par le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde représente les signaux (le système d'information, c'est à dire les capteurs et le système de régulation).

Le modèle Bond Graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graphs usuels (R , C , I , et les jonctions).

Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux). Les sources peuvent être simples (Se , Sf) ou modulées (MSe , MSf), c'est à dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien de puissance) traduite par les variables d'effort et de flux. Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée par un lien d'information (flèche) qui est le même utilisé dans les blocs diagrammes classiques.

Les algorithmes de surveillance (de détection et d'isolation de fautes FDI) reçoivent les informations en ligne issues des capteurs (détecteurs d'effort De et de flux Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. Les informations sur l'état des éléments défaillants sont transmises au service de maintenance.

Dans les sections suivantes les différentes approches de FDI par Bond Graph seront présentées. On distingue principalement deux approches Bond Graph pour la surveillance des processus: l'approche qualitative et l'approche quantitative [18].

I.5. Approche quantitative

Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus et celui du modèle numérique. Contrairement à l'approche qualitative, l'approche quantitative se base sur des lois physiques et nécessite donc une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Les modèles quelque soient leurs formes sont

obtenus sur la base des lois physiques, ou sur la base d'une identification statistique des paramètres [11]. On utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance [18].

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.

I.6. Approche qualitative

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

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 (et de son ordre) 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.

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-énergies 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 [18].

I.7. Fonctions de la surveillance

Pour bien maîtriser les systèmes industriels, il est nécessaire de savoir détecter un défaut en présence d'autres effets (bruits de mesures, perturbations, erreurs de mesures), de le localiser

(processus, capteurs actionneurs ou système de commande), et de le diagnostiquer si possible (instant d'apparition, amplitude, ...) [13].

I.7.1. Détection de défaut : Elle consiste à indiquer la présence d'un défaut par comparaison entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse du fonctionnement normal.

I.7.2. Localisation de défaut : Elle consiste à localiser l'élément défectueux (capteurs, actionneurs, composant du processus, ...etc.) par comparaison entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse de défaillance.

I.7.3. Diagnostic ou identification de défaut : Il correspond à la détermination de son amplitude, son comportement temporel et l'instant de son apparition.

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test sur le processus.

Le problème de diagnostic consiste à résoudre le problème inverse de la relation de causes à effet connaissant principalement l'effet par ses symptômes observables (acoustiques, thermiques, magnétiques, électriques, ...).

I.8. Confection du cahier de charges de la surveillance

Nous avons mentionné que l'on distingue plusieurs types de défauts : les défauts processus physique, les défauts capteurs, les défauts actionneurs et les défauts du système ou algorithme de commande. Le cahier des charges doit répondre aux trois questions suivantes : [14]

I.8.1 Définition des objectifs

On précise les composants (équipement, capteurs, actionneurs, contrôleurs, ...) et les défaillances associées qui doivent être détectées et/ou localisées.

I.8.2 Définition des performances

Elles sont attendues en termes de détection du système de surveillance. Pour cela, on caractérise l'efficacité des procédures de diagnostic par quelques critères d'évaluation suivants [19], [22] :

- **La sensibilité aux défauts** : capacité du système de surveillance de détecter les défauts de faible amplitude.
- **La rapidité de détection** : capacité de détecter les défauts dans les meilleurs délais, afin de permettre au système de supervision de réagir rapidement. Cette qualité de détection est caractérisée par un délai moyen qui s'écoule entre l'application d'une défaillance et l'alarme générée par le système de surveillance.
- **L'isolabilité** : capacité de retrouver l'origine de la défaillance, c'est à dire identifier la cause de la panne parmi les causes prises en compte par le système de surveillance.

I.8.3 Définition des contraintes

On doit préciser l'architecture de l'instrumentation optimale c'est-à-dire la manière de placer les détecteurs en nombre et position selon les critères de coûts et de conditions d'opération. Dans le cadre de ce travail, nous prenons comme cahier de charges, la détection et la localisation des défaillances des processus thermo fluides et chimiques au niveau des détecteurs, des actionneurs et des composants physiques. Les types de fautes à surveiller sont :

- Fuite de matière (fuite de fluide dans un réservoir).
- Défaut de calorifugeage thermique au niveau des composants de stockage d'énergie.
- Bouchage de conduites.

On considère que les algorithmes de commande ne sont pas sujets aux défauts (les signaux de commande sont parfaitement calculés et ne présentent pas d'erreurs), ainsi que les erreurs de modélisation et les entrées de perturbation sont négligeables et sont de l'ordre de la précision des capteurs devant les incertitudes de mesure [13].

I.9. Représentation bond graph d'un système de surveillance

Considérons un système de surveillance comme illustré par la Figure I.1. On distingue essentiellement deux parties : la première produit de la puissance et de l'énergie (le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde produit des signaux (le système d'informations : les capteurs et le système de régulation) [13], [14].

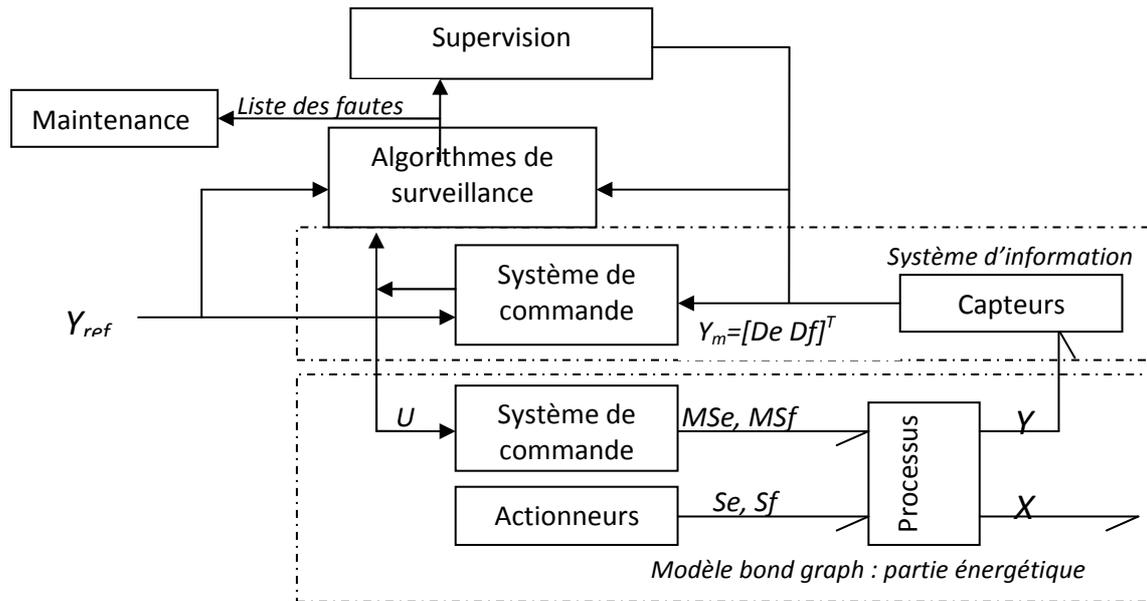


Figure I.1 Représentation Bond-graph d'un système de surveillance

Le modèle bond graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments Bond-graph usuels (R , C , I et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou de flux).

Les sources peuvent être simples (Se , Sf) ou modulées (MSe , MSf), c'est à dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment alors le système d'information.

Les algorithmes de surveillance reçoivent les informations issues des capteurs (De , Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. La génération des résidus est basée sur les relations de redondance analytique, qui sont fonctions de variables connues du système, suivant l'ensemble de paramètres, de variables et de contraintes du processus.

I.10. Généralités sur les relations de redondance analytique

Les procédures de détection et d'isolation des défauts dans le présent travail sont basées uniquement sur les résidus générés par les relations de redondance analytique. En comparaison avec les méthodes de génération de résidus basées sur les observateurs, la méthode basée sur les relations de redondance analytique présente quelques caractéristiques intéressantes [11], [13] :

- Elles sont simples à comprendre, puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph.

- Ces relations sont déduites directement de la représentation graphique.
- Elles peuvent être générées sous forme symbolique et sont donc adaptées à une implémentation informatique.

Une relation de redondance analytique est une relation entre l'ensemble de variables connues de la forme bond-graph :

$$f(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, \theta, U) = 0 \quad (\text{I.1})$$

Le résidu est alors :

$$r = f(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, \theta, U) \quad (\text{I.2})$$

La génération des RRAs est basée sur le parcours des chemins causaux et généralisée sur le modèle graphique afin d'exprimer les variables inconnues en fonction des variables connues.

Le parcours des chemins causaux n'est qu'un couplage particulier qui respecte la causalité affectée au modèle. Le point de départ pour la génération des RRAs peut appartenir à la structure des jonctions (θ , I , TF , GY), donc à l'ensemble des équations structurelles, aussi bien qu'à l'ensemble des composants (R , C , I), avec ces équations de comportement reliées aux jonctions.

On développe l'application de la procédure de détection de défaut par la génération des RRAs à base du modèle bond graph à énergies couplées, sur un processus type de génie des procédés : la colonne de distillation.

I.11. Algorithme de placement de détecteurs

La méthode développée ci-dessous 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 [13].

Soit un modèle bond graph issu d'un processus physique. Nous supposons qu'il n'existe pas une architecture d'instrumentation, les fautes sur les composants ne sont pas multiples et que les détecteurs 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 \mathbf{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.

Soit N_0 le nombre de jonction 0_{C_i}

Soit N_1 le nombre de jonction 1_{R_j}

Soit i le numéro des jonctions 0_{C_i}

Soit j le numéro des jonctions 1_{R_j}

Soit n le nombre de liens accrochés à la jonction 0_{C_i}

Soit m le nombre de liens accrochés à la jonction 1_{R_j}

Soit C l'ensemble des variables connus $C = \{Sf_1, Sf_2, De_i, De_j\}$

Soit X l'ensemble des variables inconnus $X = \{e_{C_i}, f_{C_i}, e_{R_j}, f_{R_j}\}$

Les équations aux jonctions 0_{C_i}

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^n a_k f_k = 0 \quad \text{ou} \quad a_k = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ e_k = e_{C_i} \text{ pour } k = 1..n \end{array} \right. \quad (\text{I.3})$$

Pour les fonctions non linéaires Φ_{C_i} est pour s est l'opérateur de dérivée, les variables de flux et de l'effort à déterminer sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{C_i} = \Phi_{C_i} \left[s \{ (1-x_i) e_{C_i} + x_i D e_i \} \right] \quad \text{ou} \quad i = 1..N_0 \\ e_{C_i} = \frac{1}{s} (1-x_i) \Phi_{C_i}^{-1} (f_{C_i}) + x_i D e_i \end{array} \right. \quad (\text{I.4})$$

Les équations aux jonctions 1_{R_j}

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m a_l e_l = 0 \quad \text{ou} \quad a_l = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ f_l = f_{R_j} \text{ pour } l = 1..m \end{array} \right. \quad (\text{I.5})$$

Pour les fonctions non linéaires Φ_{R_j} , les variables de flux et d'effort à déterminer sont :

$$\begin{cases} e_{R_j} = \Phi_{R_j} \left[(1 - y_j) f_{R_j} + y_j Df_j \right] & \text{avec } j = 1..N_1 \\ f_{R_j} = (1 - y_j) \Phi_{R_j}^{-1} (e_{R_j}) + y_j Df_j \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

Les combinaisons des variables 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 RRA , l'ensemble des variables connues.

$$sr(r, c) = \begin{cases} 1 & \text{si et seulement si } c \text{ apparait à la RRA } r \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

Le vecteur de signature de défaillance binaire sd_i associé à la relation f_i est défini par :

$$sd_i = \left[sr(r_1, f_i), sr(r_2, f_i), \dots, sr(r_k, f_i), \dots, sr(r_m, f_i) \right]^t \quad (\text{I.8})$$

$$sr(r_k, f_i) = \begin{cases} 1 & \text{si le résidu } r_k \text{ utilise la relation } f_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

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 et seulement si elle est détectable et unique dans sa classe, c'est-à-dire :

$$\forall f_i \in F / i \neq j \exists r_k \in R / sr(r_k, f_i) \oplus sr(r_k, f_j) = 1$$

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

I.12. Techniques de génération des résidus en vue de la surveillance

I.12.1 Génération des résidus à partir des équations de structure des jonctions et des lois constitutives des éléments

I.12.1.1 Substitution de variables : La recherche du cas optimal se fait en plaçant des détecteurs virtuels sur toutes les jonctions de type 0 et 1 du modèle. Après génération des résidus on passe à la substitution des variables connues qui composent l'expression du résidu

appelé aussi relation de redondance analytique *RRA* ou indicateur de faute. Après chaque substitution un détecteur sera retiré du modèle et on vérifie la table de signature de fautes jusqu'à l'obtention du nombre minimum de *RRA*s. On se propose dans ce premier cas de surveiller les composants, en supposant que les actionneurs et les détecteurs ne sont pas défectueux. Le nombre de détecteurs placés doit être égal au nombre de *RRA*s générées [14], [15].

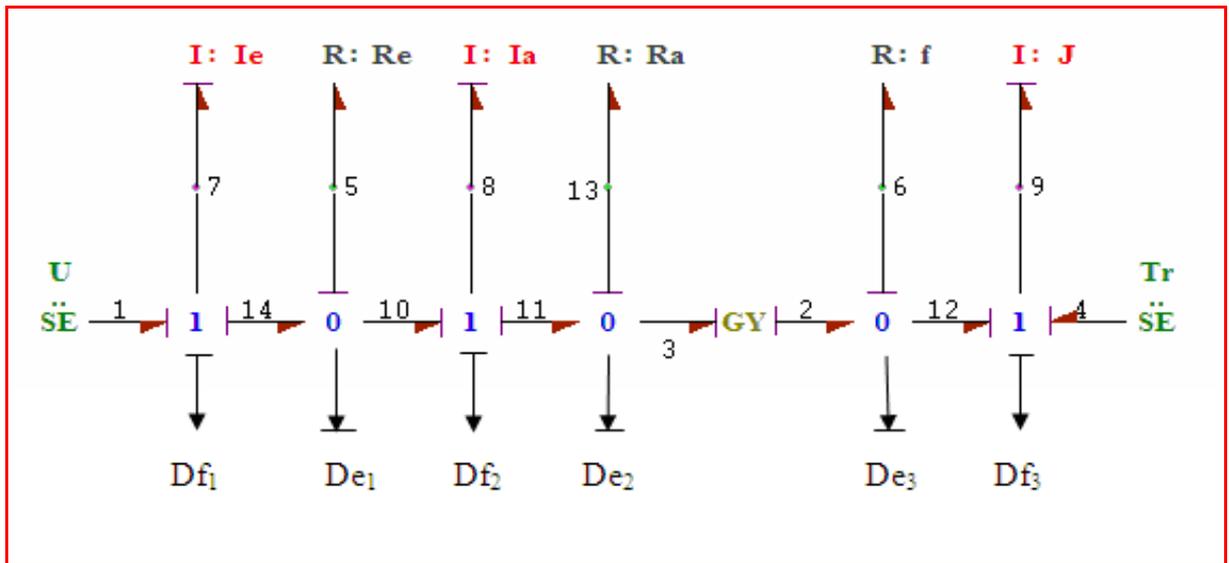


Figure I.2 Modèle bond graph à détecteurs virtuels

a. Equations de structure des jonctions

$$J1: \begin{cases} \begin{cases} e_1 - e_7 - e_{14} = 0 \\ f_1 = f_7 = f_{14} \end{cases} \\ \begin{cases} e_{10} - e_8 - e_{11} = 0 \\ f_{10} = f_8 = f_{11} \end{cases} \\ \begin{cases} e_{12} - e_9 - e_4 = 0 \\ f_{12} = f_9 = f_4 \end{cases} \end{cases} \quad (I.10)$$

$$J0: \begin{cases} \begin{cases} f_{14} - f_5 - f_{10} = 0 \\ e_{14} = e_5 = e_{10} \end{cases} \\ \begin{cases} f_{11} - f_{13} - f_3 = 0 \\ e_{11} = e_{13} = e_3 \end{cases} \\ \begin{cases} f_2 - f_6 - f_{12} = 0 \\ e_2 = e_6 = e_{12} \end{cases} \end{cases} \quad (I.11)$$

$$GY: \begin{cases} e_3 = rf_2 \\ f_3 = r^{-1}e_2 \end{cases} \quad (I.12)$$

b. Lois constitutives des éléments

$$\begin{cases}
 I : \begin{cases} e_7 = \phi_{Ie}(s.f_7) = \phi_{Ie}(s.Df_1) \\ e_8 = \phi_{Ia}(s.f_8) = \phi_{Ia}(s.Df_2) \\ e_9 = \phi_J(s.f_9) = \phi_J(s.Df_3) \end{cases} \\
 R : \begin{cases} e_5 = \phi_{Re}(f_5) = \phi_{Re}(De_1) \\ e_{13} = \phi_{Ra}(f_{13}) = \phi_{Ra}(De_2) \\ e_6 = \phi_f(f_6) = \phi_f(De_3) \end{cases}
 \end{cases} \quad (I.13)$$

c. Relations de redondance analytique

$$\begin{cases}
 RRA_1 = Se_1 - \phi_{Ie}(sDf_1) - De_1 \\
 RRA_2 = Df_1 - \phi_{Ie}^{-1}(De_1) - Df_2 \\
 RRA_3 = De_1 - \phi_{Ia}(sDf_2) - De_2 \\
 RRA_4 = Df_2 - \phi_{Ra}^{-1}(De_2) - r^{-1}De_3 \\
 RRA_5 = r^{-1}De_2 - \phi_f^{-1}(De_3) - Df_3 \\
 RRA_6 = Se_2 - \phi_J(sDf_3) + De_3
 \end{cases} \quad (I.14)$$

d. Table de signature de fautes

	Φ_{Ie}	Φ_{Re}	Φ_{Ia}	Φ_{Ra}	Φ_f	Φ_J
RRA_1	1	0	0	0	0	0
RRA_2	0	1	0	0	0	0
RRA_3	0	0	1	0	0	0
RRA_4	0	0	0	1	0	0
RRA_5	0	0	0	0	1	0
RRA_6	0	0	0	0	0	1

Tableau I. 1 Table de signature de fautes pour 6 détecteurs placés

Nous constatons que tous les vecteurs colonnes de la table sont non nuls et différents l'un de l'autre donc les défaillances dans le système sont détectables et isolables car surveiller 6 composants à l'aide de 6 détecteurs est une évidence. On cherche alors à minimiser le nombre de détecteurs en procédant par substitutions successives.

e. Première substitution

$$\begin{cases}
 RRA_1 = Se_1 - \phi_{Ie}(sDf_1) - \phi_{Re}(Df_1 - Df_2) \\
 RRA_2 = \phi_{Re}(Df_1 - Df_2) - \phi_{Ia}(sDf_2) - De_2 \\
 RRA_3 = Df_2 - \phi_{Ra}^{-1}(De_2) - r^{-1}De_3 \\
 RRA_4 = r^{-1}De_2 - \phi_f^{-1}(De_3) - Df_3 \\
 RRA_5 = Se_2 - \phi_J(sDf_3) + De_3
 \end{cases} \quad (I.15)$$

	Φ_{Ie}	Φ_{Re}	Φ_{Ia}	Φ_{Ra}	Φ_f	Φ_J
RRA_1	1	1	0	0	0	0
RRA_2	0	1	1	0	0	0
RRA_3	0	0	0	1	0	0
RRA_4	0	0	0	0	1	0
RRA_5	0	0	0	0	0	1

Tableau I. 2 Table de signature de fautes pour 5 détecteurs placés

f. Deuxième substitution

$$\begin{cases} RRA_1 = Se_1 - \phi_{Ie}(sDf_1) - \phi_{Re}(Df_1 - Df_2) \\ RRA_2 = \phi_{Re}(Df_1 - Df_2) - \phi_{Ia}(sDf_2) - \phi_{Ra}^{-1}(Df_2 - r^{-1}De_3) \\ RRA_3 = r^{-1}\phi_{Ra}^{-1}(Df_2 - r^{-1}De_3) - \phi_f^{-1}(De_3) - Df_3 \\ RRA_4 = Se_2 - \phi_J(sDf_3) + De_3 \end{cases} \quad (I.16)$$

	Φ_{Ie}	Φ_{Re}	Φ_{Ia}	Φ_{Ra}	Φ_f	Φ_J
RRA_1	1	1	0	0	0	0
RRA_2	0	1	1	1	0	0
RRA_3	0	0	0	1	1	0
RRA_4	0	0	0	0	0	1

Tableau I. 3 Table de signature de fautes pour 4 détecteurs placés

g. Troisième substitution

$$\begin{cases} RRA_1 = Se_1 - \phi_{Ie}(sDf_1) - \phi_{Re}(Df_1 - Df_2) \\ RRA_2 = \phi_{Re}(Df_1 - Df_2) - \phi_{Ia}(sDf_2) - \phi_{Ra}^{-1}(Df_2 - r^{-1}De_3) \\ RRA_3 = r^{-1}\phi_{Ra}^{-1}(Df_2 - r^{-1}De_3) - \phi_f^{-1}(De_3) - \frac{1}{s}\phi_J^{-1}(Se_2 + De_3) \end{cases} \quad (I.17)$$

	Φ_{Ie}	Φ_{Re}	Φ_{Ia}	Φ_{Ra}	Φ_f	Φ_J
RRA_1	1	1	0	0	0	0
RRA_2	0	1	1	1	0	0
RRA_3	0	0	0	1	1	1

Tableau I. 4 Table de signature de fautes pour 3 détecteurs placés

On constate que les deux colonnes de f et J sont identiques alors le résidu r_5 est sensible en même temps aux défauts des deux composants donc l'isolation n'est pas assurée alors le cas optimal sera le précédent c'est à dire surveiller les 6 composants à l'aide de 4 détecteurs.

I.12.1.2 Méthode directe : La recherche du cas optimal se fait en plaçant un seul détecteur après chaque génération de résidu tout en vérifiant la table de signature de fautes à chaque étape et on s'arrête dès qu'on assure à la fois la détection et l'isolation. Les composants sont supposés linéaires et intacts et on surveille les actionneurs et les détecteurs.

$$\begin{cases} RRA_1 = R_1 Df_1 + I_1 s Df_1 + r Df_2 + SE_1 \\ RRA_2 = R_2 Df_2 + I_2 s Df_2 - r Df_1 + De_1 \\ RRA_3 = R_3 Df_3 + I_3 s Df_3 + m^2 R_4 Df_3 + m De_2 - m De_1 \\ RRA_4 = R_5 Df_4 - De_2 + SE_2 \end{cases} \quad (I.20)$$

	SE_1	SE_2	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	De_1	De_2
RRA_1	1	0	1	1	0	0	0	0
RRA_2	0	0	1	1	0	0	1	0
RRA_3	0	0	0	0	1	0	1	1
RRA_4	0	1	0	0	0	1	0	1

Tableau I. 7 Table de signature de fautes pour 4 détecteurs placés

On remarque que les composants (SE_2, Df_4) et (Df_1, Df_2) ont la même signature de défaillance. Il y a un problème de localisation sur Les composants de même signature de défaillance. Donc il faut générer d'autres RRA s pour distinguer les défaillances simultanées.

$$\begin{cases} RRA_1 = R_1 Df_1 + I_1 s Df_1 + r Df_2 + SE_1 \\ RRA_2 = R_2 Df_2 + I_2 s Df_2 - r Df_1 + De_1 \\ RRA_3 = R_3 Df_3 + I_3 s Df_3 + m^2 R_4 Df_3 + m De_2 - m De_1 \\ RRA_4 = R_5 Df_4 - De_2 + SE_2 \\ RRA_5 = C_1 s De_1 + m^{-1} Df_3 - Df_2 \end{cases} \quad (I.21)$$

	SE_1	SE_2	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	De_1	De_2
RRA_1	1	0	1	1	0	0	0	0
RRA_2	0	0	1	1	0	0	1	0
RRA_3	0	0	0	0	1	0	1	1
RRA_4	0	1	0	0	0	1	0	1
RRA_5	0	0	0	1	1	0	1	0

Tableau I.8 Table de signature de fautes pour 5 détecteurs placés

Pour les composants (SE_2, Df_4) on génère RRA_6 .

$$\begin{cases} RRA_1 = R_1 Df_1 + I_1 s Df_1 + r Df_2 + SE_1 \\ RRA_2 = R_2 Df_2 + I_2 s Df_2 - r Df_1 + De_1 \\ RRA_3 = R_3 Df_3 + I_3 s Df_3 + m^2 R_4 Df_3 + m De_2 - m De_1 \\ RRA_4 = R_5 Df_4 - De_2 + SE_2 \\ RRA_5 = C_1 s De_1 + m^{-1} Df_3 - Df_2 \\ RRA_6 = C_2 s De_2 + Df_4 - Df_3 \end{cases} \quad (I.22)$$

	SE_1	SE_2	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	De_1	De_2
RRA_1	1	0	1	1	0	0	0	0
RRA_2	0	0	1	1	0	0	1	0
RRA_3	0	0	0	0	1	0	1	1
RRA_4	0	1	0	0	0	1	0	1
RRA_5	0	0	0	1	1	0	1	0
RRA_6	0	0	0	0	1	1	0	1

Tableau I. 9 Table de signature de fautes pour 6 détecteurs placés

La surveillance des 8 composants est assurée par 6 détecteurs, c'est le cas optimal.

I.12.2 Génération des résidus à partir des chemins causaux

Un chemin causal est une alternance de liens et d'éléments de base (R, C ou I), en suivant l'effort ou le flux. Pour changer la variable il faut passer par un élément passif (R, C ou I) ou par un GY.

a. Chemin causal mixte :

- Direct :

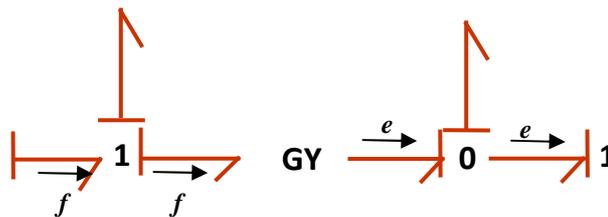


Figure I. 4 Chemin causal direct mixte effort-flux

- Indirect:

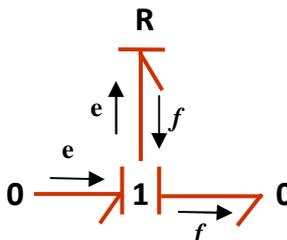


Figure I. 5 Chemin causal indirect mixte effort-flux

b. Chaîne d'action :

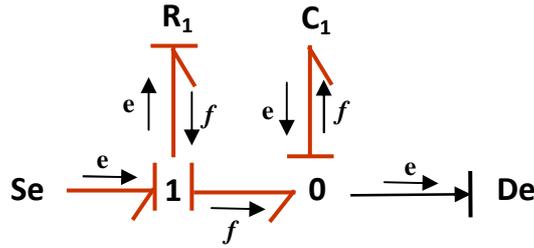


Figure I. 6 Chaîne d'action entrée-sortie

c. Boucle causale :

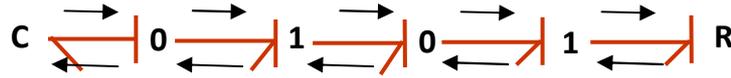


Figure I. 7 Boucle causale entre les éléments C et R

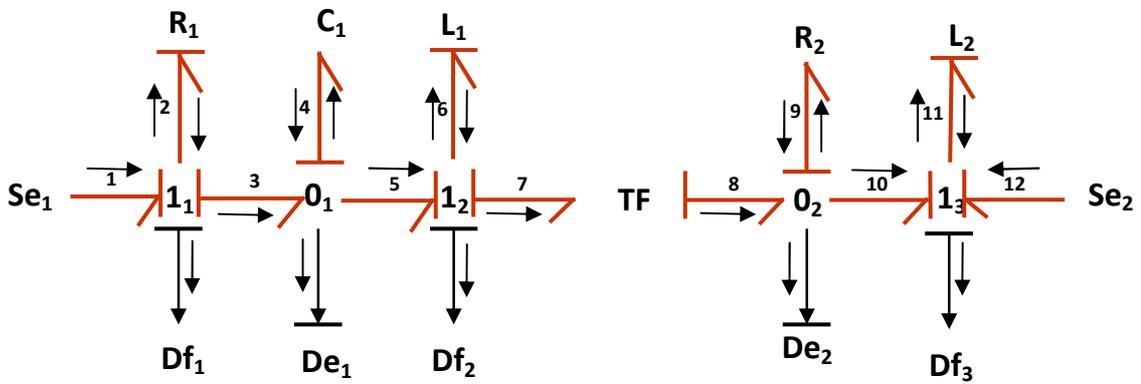


Figure I. 8 Causalité et chemins causaux sur le modèle bond graph

A partir du modèle (Figure I.8) on parcourt les chemins causaux pour déterminer les variables inconnues (effort et flux) et déduire les relations de redondance analytique.

$$J1_1 : e_1 - e_2 - e_3 = 0 \rightarrow X = \{e_1, e_2, e_3\} ?$$

$$e_1 = ? \rightarrow 1 \text{ -- } Se_1 \rightarrow e_1 = Se_1$$

$$e_2 = ? \rightarrow 2 \text{ -- } R_1 \text{ -- } 2 - Df_1 \rightarrow e_2 = \Phi_{R1}(Df_1)$$

$$e_3 = ? \rightarrow 3 \text{ -- } De_1 \rightarrow e_3 = De_1$$

$$\mathbf{RRA}_1 = Se_1 - \Phi_{R1}(Df_1) - De_1 \tag{I.23}$$

$$J0_1 : f_3 - f_4 - f_5 = 0 \rightarrow X = \{f_3, f_4, f_5\} ?$$

$$f_3 = ? \rightarrow 1 \text{ -- } Se_1 \rightarrow f_3 = Df_1$$

$$f_4 = ? \rightarrow 4 \text{ -- } C_1 \text{ -- } 4 - De_1 \rightarrow f_4 = \Phi^{-1}_{C1}(sDe_1)$$

$$f_5 = ? \rightarrow 3 \text{ -- } Df_2 \rightarrow f_5 = Df_2$$

$$\mathbf{RRA}_2 = Df_1 - \Phi^{-1}_{C1}(sDe_1) - Df_2 \tag{I.24}$$

$$J1_2 : e_5 - e_6 - e_7 = 0 \rightarrow X = \{e_5, e_6, e_7\} ?$$

$$e_5 = ? \rightarrow 5 \text{ -- } De_1 \rightarrow e_5 = De_1$$

$$e_6 = ? \rightarrow 6 \text{ -- } L_1 \text{ -- } 6 \text{ -- } Df_2 \rightarrow e_6 = \Phi_{L1}(sDf_2)$$

$$e_7 = ? \rightarrow 7 \text{ -- } TF - 8 \text{ -- } De_2 \rightarrow e_7 = mDe_2$$

$$\mathbf{RRA}_3 = \mathbf{De}_1 - \Phi_{L1}(sDf_2) - mDe_2 \tag{I.25}$$

$$J0_2 : f_8 - f_9 - f_{10} = 0 \rightarrow X = \{f_8, f_9, f_{10}\} ?$$

$$f_8 = ? \rightarrow 8 \text{ -- } TF - 7 \text{ -- } Df_2 \rightarrow f_8 = mDf_2$$

$$f_9 = ? \rightarrow 9 - R_2 - 9 - De_2 \rightarrow f_9 = \Phi^{-1}_{R2}(De_2)$$

$$f_{10} = ? \rightarrow 10 \text{ -- } Df_3 \rightarrow f_{10} = Df_3$$

$$\mathbf{RRA}_4 = mDf_2 - \Phi^{-1}_{R2}(De_2) - Df_3 \tag{I.26}$$

$$J1_3 : e_{10} - e_{11} + e_{12} = 0 \rightarrow X = \{e_{10}, e_{11}, e_{12}\} ?$$

$$e_{10} = ? \rightarrow 10 \text{ -- } De_2 \rightarrow e_{10} = De_2$$

$$e_{11} = ? \rightarrow 11 - L_2 - 11 - Df_3 \rightarrow e_{11} = \Phi_{L2}(sDf_3)$$

$$e_{12} = ? \rightarrow 12 \text{ -- } Se_2 \rightarrow e_{12} = Se_2$$

$$\mathbf{RRA}_5 = \mathbf{De}_2 - \Phi_{L2}(sDf_3) + \mathbf{Se}_2 \tag{I.27}$$

I.12.3 Génération des résidus en analysant le modèle

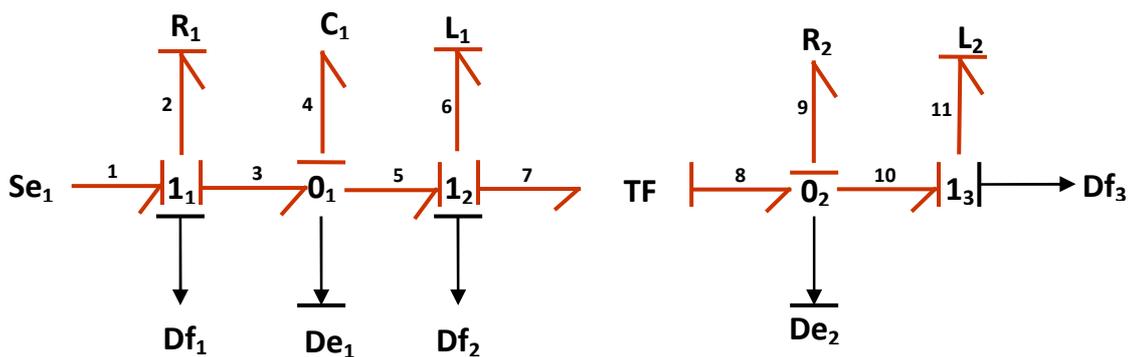


Figure I. 9 Modèle bond graph à analyser

I.12.3.1 Matrice d'incidence : La conception de la matrice d'incidence se fait à partir des contraintes, des variables, de la structure des jonctions et de la constitution des éléments.

a. Contraintes

Equations de contrôle $\Phi_c = [\{\Phi_{c1}\} \cup \{\Phi_{c2}\} \cup \dots \cup \{\Phi_{nc}\}]$

Equations des sources contrôlées $\Phi_a = [\{\Phi_{MSf_1}\} \cup \{\Phi_{MSf_2}\} \cup \dots \cup \{\Phi_{MSf_j}\} \cup \dots \cup \{\Phi_{MSe_{na}}\}]$

Equations de structure $\Phi_s = \Phi_{j0} \cup \Phi_{j1} \cup \Phi_{TF} \cup \Phi_{GY}$

Equations de comportement $\Phi_b = \Phi_R \cup \Phi_C \cup \Phi_I \cup \Phi_{RS}$

Equations de mesure $\Phi_m = \Phi_{De} \cup \Phi_{Df}$

$\Phi = \Phi_s \cup \Phi_b \cup \Phi_m \in R^{(nj + ne + ns + nc + na)}$

avec **na** le nombre d'actionneurs, **nc** le nombre de contrôleurs, **ns** le nombre de capteurs, **ne** le nombre d'éléments, **nj** le nombre de jonctions.

b. Variables :

Variables inconnues $X(t) = [\{e_1(t), f_1(t)\} \cup \{e_2(t), f_2(t)\} \dots \cup \{e_{ne}(t), f_{ne}(t)\}]$

Avec $X(t) \in R^{2*Ne*Ncm + 2*Ncs}$

Ncs le nombre de composants simples, **Ncm** le nombre de composants multiports, **Ne** le nombre d'énergies.

Variables connues $K = [\{MSe\} \cup \{MSf\} \cup \{Sf\} \cup \{Se\} \cup \{De\} \cup \{Df\} \cup \{u\}]$

$K \in R^{na+nc+n}$ avec $Z=X \cup K$

c. Equations de structure des jonctions :

$$J1_1 : e_1 - e_2 - e_3 = Se - e_2 - e_4 = 0,$$

$$J1_2 : e_5 - e_6 - e_7 = e_4 - e_6 - e_9 = 0,$$

$$J1_3 : e_{10} - e_{11} = e_9 - e_{11} = 0,$$

$$J0_1 : f_3 - f_4 - f_5 = f_2 - f_4 - f_6 = 0,$$

$$J0_2 : f_8 - f_9 - f_{10} = f_6 - f_9 - f_{11} = 0 \quad (I.28)$$

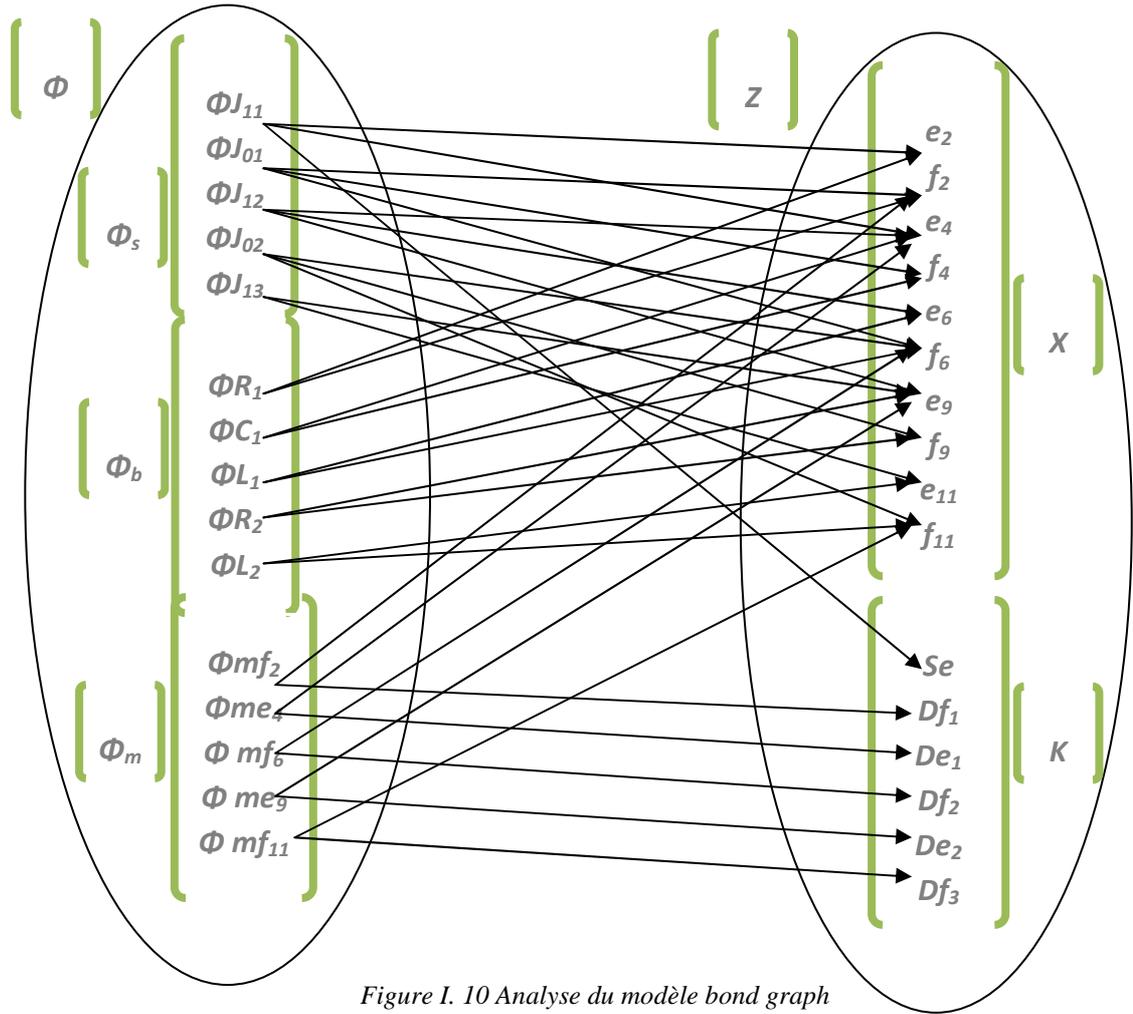


Figure I. 10 Analyse du modèle bond graph

d. Matrice d'incidence : En introduisant les lois constitutives des éléments, on confectionne la matrice d'incidence et on en déduit les RRAs.

	e_2	f_2	e_4	f_4	e_6	f_6	e_9	f_9	e_{11}	f_{11}	Se	Df_1	De_1	Df_2	De_2	Df_3
ΦJ_{11}	1		1								1	$RR A_1 = Se_1 - \Phi_{R1}(Df_1) - De_1$				
ΦJ_{01}		1		1		1						$RR A_2 = Df_1 - \Phi_{C1}^{-1}(sDe_1) - Df_2$				
ΦJ_{12}			1		1		1					$RR A_3 = De_1 - \Phi_{L1}(sDf_2) - mDe_2$				
ΦJ_{02}						1		1		1		$RR A_4 = mDf_2 - \Phi_{R2}^{-1}(De_2) - Df_3$				
ΦJ_{13}							1		1			$RR A_5 = De_2 - \Phi_{L2}(sDf_3)$				
ΦR_1	1	1														
ΦC_1			1	1												
ΦL_1					1	1										
ΦR_2							1	1								
ΦL_1									1	1						

Φmf_2		1									1				
Φme_4			1									1			
Φmf_6					1								1		
Φme_9						1								1	
Φmf_{11}								1							1

Tableau I.10 Génération des RRAs à partir de la matrice d'incidence

I.12.3.2 Graphe biparti orienté : A partir des équations de structure des jonctions et des lois constitutives des éléments on développe le graphe suivant dont sa sortie est la relation de redondance analytique RRA.

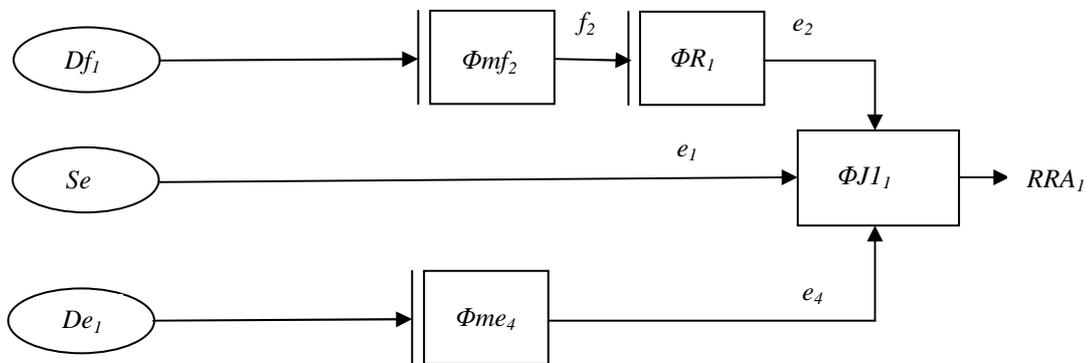


Figure I.11 Graphe orienté de la RRA1

Le graphe biparti orienté de la figure I.10 permet de déterminer l'expression de la RRA1 comme suit :

$$e_1 - e_2 - e_3 = 0 \Rightarrow RRA_1 = Se_1 - \Phi_{R1}(Df_1) - De_1 \tag{I.29}$$

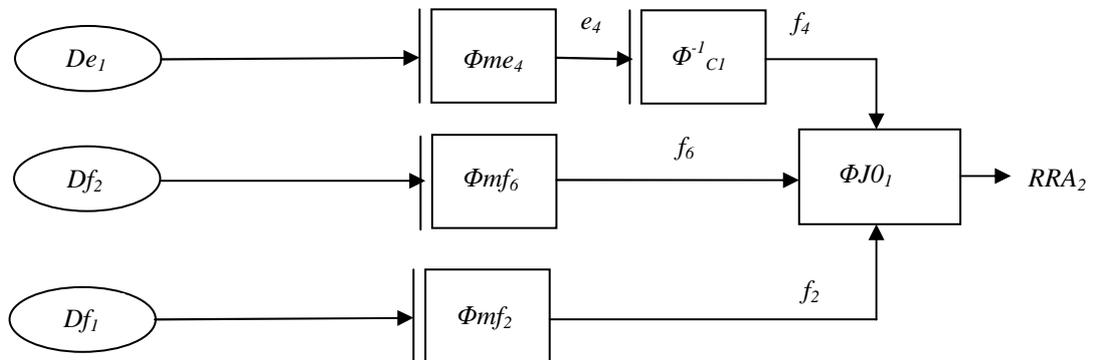


Figure I.12 Graphe orienté de la RRA2

$$f_3 - f_4 - f_5 = 0 \Rightarrow RRA_2 = Df_1 - \Phi^{-1}_{C1}(sDe_1) - Df_2 \tag{I.30}$$

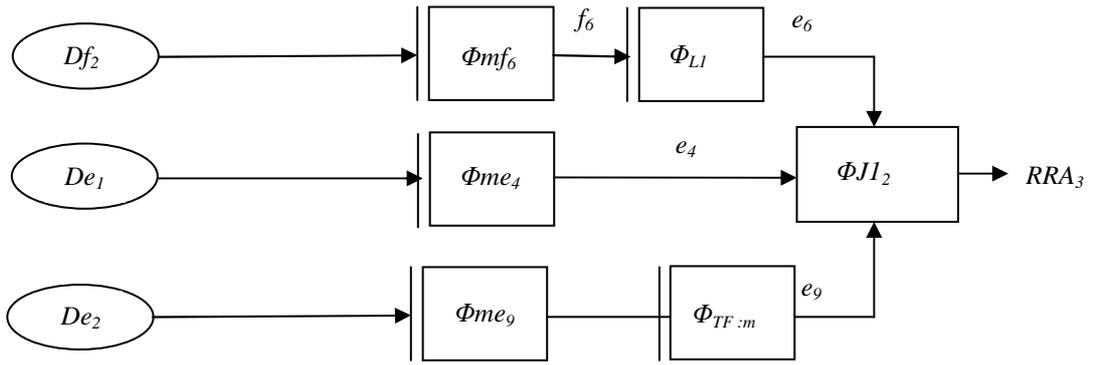


Figure I. 13 Graphe orienté de la RRA₃

$$e_5 - e_6 - e_7 = 0 \Rightarrow RRA_3 = De_1 - \Phi_{L1}(sDf_2) - mDe_2 \quad (I.31)$$

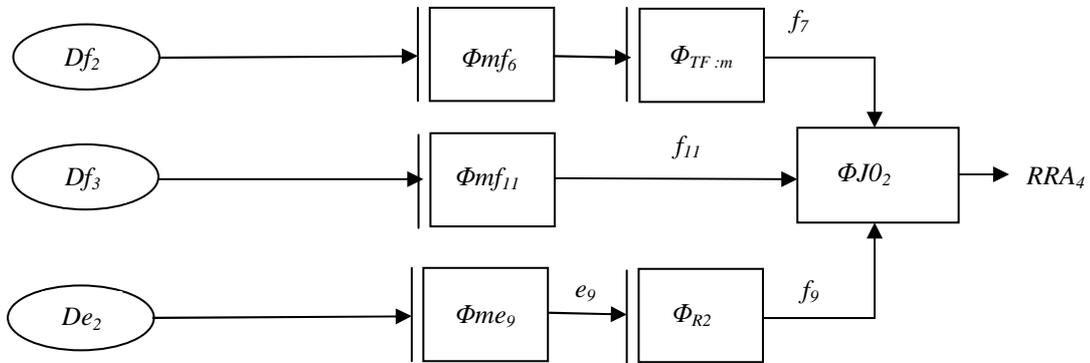


Figure I. 14 Graphe orienté de la RRA₄

$$f_8 - f_9 - f_{10} = 0 \Rightarrow RRA_4 = mDf_2 - \Phi^{-1}_{R2}(De_2) - Df_3 \quad (I.32)$$

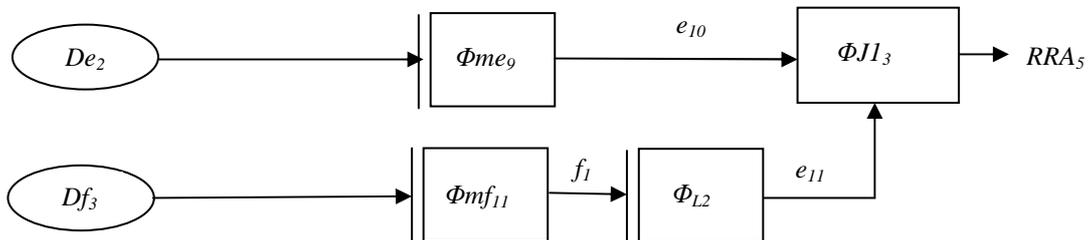


Figure I. 15 Graphe orienté de la RRA₅

$$e_{10} - e_{11} + e_{12} = 0 \Rightarrow RRA_5 = De_2 - \Phi_{L2}(sDf_3) \quad (I.33)$$

I.12.4 Génération des résidus en appliquant l'algorithme de placement de détecteurs

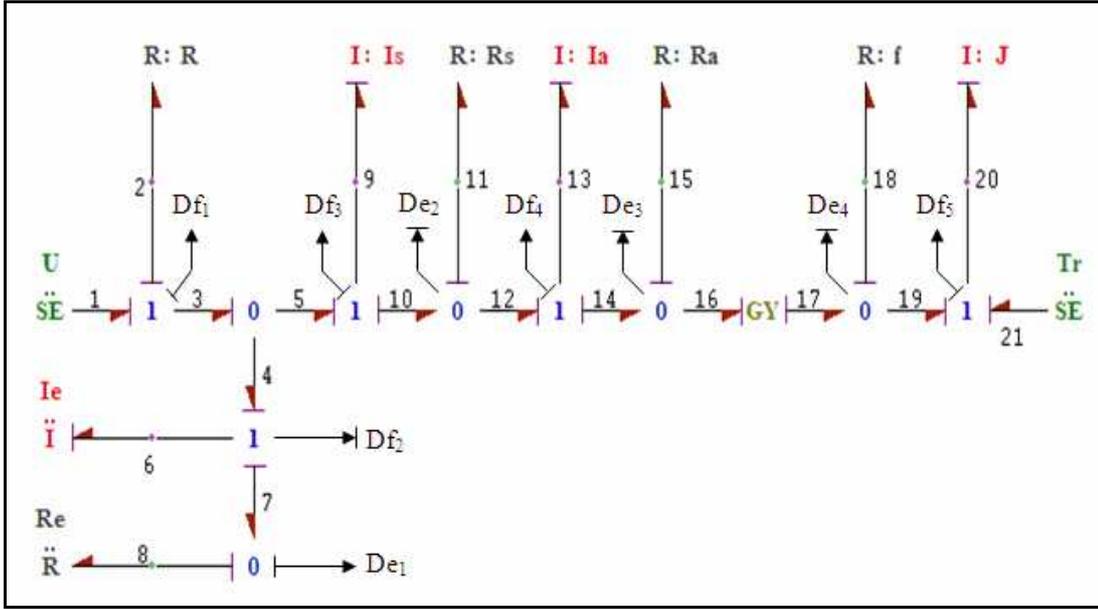


Figure I. 16 Modèle bond graph de surveillance par placement de détecteurs

A partir des équations de structure des jonctions et des lois constitutives des éléments on aboutit aux équations des résidus suivantes sachant que le placement est conditionné par les variables binaires y et z :

$$\begin{cases} r_1:e_1-e_2-e_3=0 \\ r_1:s e_1 -\Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2+z_1*D_{f_1}\right]-\Phi_{I_6}\left[s\left\{(1-z_2)*f_6+z_2*D_{f_2}\right\}\right]-\Phi_{R_8}*(1-y_1)*f_8-y_1*D_{e_1}=0 \end{cases} \quad (I.34)$$

$$\begin{cases} r_2:e_4-e_6-e_7=0 \\ r_2:s e_1 -\Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2+z_1*D_{f_1}\right]-\Phi_{I_6}\left[s\left\{(1-z_2)*f_6+z_2*D_{f_2}\right\}\right]-\Phi_{R_8}*(1-y_1)*f_8-y_1*D_{e_1}=0 \end{cases} \quad (I.35)$$

$$\begin{cases} r_3:f_7-f_8=0 \\ r_3:\frac{1}{s}*(1-z_2)*\Phi_{I_6}^{-1}*(e_6)+z_2*D_{f_2}-(1-y_1)*\Phi_{R_8}^{-1}*(e_8)-\Phi_{R_8}^{-1}*y_1*D_{e_1}=0 \end{cases} \quad (I.36)$$

$$\begin{cases} r_4:e_5-e_9-e_{10}=0 \\ r_4:s e_1 -\Phi_{R_2}\left[(1-z_1)*f_2+z_1*D_{f_1}\right]-\Phi_{I_9}\left[s\left\{(1-z_3)*f_9+z_3*D_{f_3}\right\}\right]-\Phi_{R_{11}}*(1-y_2)*f_{11}-y_2*D_{e_2}=0 \end{cases} \quad (I.37)$$

$$\begin{cases} r_5:f_{10}-f_{11}-f_{12}=0 \\ r_5:\frac{1}{s}*(1-z_3)*\Phi_{I_9}^{-1}*(e_9)+z_3*D_{f_3}-(1-y_2)*\Phi_{R_{11}}^{-1}*(e_{11})-\Phi_{R_{11}}^{-1}*y_2*D_{e_2}-\frac{1}{s}*(1-z_4)*\Phi_{I_{13}}^{-1}*(e_{13})-z_4*D_{f_4}=0 \end{cases} \quad (I.38)$$

$$\begin{cases} r_6:e_{12}-e_{13}-e_{14}=0 \\ r_6:\Phi_{R_{11}}*(1-y_2)*f_{11}+y_2*D_{e_2}-\Phi_{I_{13}}\left[s\left\{\left(1-z_4\right)*f_{13}+z_4*D_{f_4}\right\}\right]-\Phi_{R_{15}}*(1-y_3)*f_{15}-y_3*D_{e_3}=0 \end{cases} \quad (I.39)$$

$$\begin{cases} r_7:f_{14}-f_{15}-f_{16}=0 \\ r_7:\frac{1}{s}\left(1-z_4\right)*\Phi_{I_{13}}^{-1}\left(e_{13}\right)+z_4*D_{f_4}-\left(1-y_3\right)*\Phi_{R_{15}}^{-1}\left(e_{15}\right)-\Phi_{R_{15}}^{-1}*y_3*D_{e_3}-r^{-1}*\Phi_{R_{18}}*(1-y_4)*f_{18}-r^{-1}*y_4*D_{e_4}=0 \end{cases} \quad (I.40)$$

$$\begin{cases} r_8:f_{17}-f_{18}-f_{19}=0 \\ r_8:r^{-1}*\Phi_{R_{15}}*(1-y_3)*f_{15}+r^{-1}*y_3*D_{e_3}-\left(1-y_4\right)*\Phi_{R_{18}}^{-1}\left(e_{18}\right)-\Phi_{R_{18}}^{-1}*y_4*D_{e_4}-\frac{1}{s}\left(1-z_5\right)\Phi_{I_{20}}^{-1}\left(e_{20}\right)-z_5*D_{f_5}=0 \end{cases} \quad (I.41)$$

$$\begin{cases} r_9:e_{21}+e_{19}-e_{20}=0 \\ r_7:s e_{e_2}+\Phi_{R_{19}}*(1-y_4)*f_{19}+y_4*D_{e_4}-\Phi_{I_{20}}\left[s\left\{\left(1-z_5\right)*f_{20}+z_5*D_{f_5}\right\}\right]=0 \end{cases} \quad (I.42)$$

Les combinaisons possibles du placement des détecteurs sont présentées sur le tableau suivant :

Nombre de détecteurs	Combinaisons possibles	Composants surveillés	Composants détectables et non localisables
9	[111111111]	Tous	ϕ
8	[011111111]	Tous	ϕ
7	[010111111]	R, Ra, Ia, Rs, Is, f, J	{Re, Ie}
7	[011011111]	Re, Ra, Ia, f, J	{R, Ie}, {Rs, Is}
7	[011101111]	Tous	ϕ
6	[010101111]	R, Ra, Ia, Rs, Is, f, J	{Re, Ie}
6	[011010111]	Re, Ra, Ia, f, J	{R, Ie}, {Rs, Is}
6	[011101011]	Tous	ϕ
5	[011101010]	R, Ra, Ia, Rs, Is, Re, Ie	{f, J}

Tableau I. 11: Recherche du cas optimal : Nombre et Position des détecteurs

Ce qui est clair à voir sur ce tableau, c'est qu'on peut surveiller le modèle avec six détecteurs seulement.

Les détecteurs sont placés selon la combinaison [011101011]. Cette dernière nous permet d'écrire les équations des résidus comme suit :

$$\begin{cases} RRA_2 = Se_1 - \phi_R(Df_2 + Df_3) - \phi_{Ie}(sDf_2) - De_1 \\ RRA_3 = Df_2 - \phi_{Re}^{-1}(De_1) \\ RRA_4 = Se_1 - \phi_R(Df_2 + Df_3) - \phi_{Is}(sDf_3) - \phi_{Rs}(Df_3 - Df_4) \\ RRA_6 = \phi_{Rs}(Df_3 - Df_4) - \phi_{Ra}(Df_4 - r^{-1}De_4) - \phi_{Ia}(sDf_4) \\ RRA_8 = r^{-1}\phi_{Ra}(Df_4 - r^{-1}De_4) - \phi_f^{-1}(De_4) - Df_5 \\ RRA_9 = Se_2 - \phi_J(sDf_5) + De_4 \end{cases} \quad (I.43)$$

	Φ_R	Φ_{Ie}	Φ_{Re}	Φ_{Is}	Φ_{Rs}	Φ_{Ia}	Φ_{Ra}	Φ_f	Φ_J
$r_2=RRA_2$	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$r_3=RRA_3$	0	0	1	0	0	0	0	0	0
$r_4=RRA_4$	1	0	0	1	1	0	0	0	0
$r_6=RRA_6$	0	0	0	0	1	1	1	0	0
$r_8=RRA_8$	0	0	0	0	0	0	1	1	0
$r_9=RRA_9$	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Tableau I. 12: Matrice de signature des défaillances de la combinaison [011101011].

Pour la simulation, on construit le schéma bloc des 6 relations de redondance analytique et on les associe au modèle bond graph afin de pouvoir injecter le défaut sur un composant et on les affiche sur le scope (afficheur) du logiciel SYMBOLS.

On montre sur la Figure I.17 comment construire ce schéma en prenant comme exemple le résidu r_6 .

$$r_6 = RRA_6 = \phi_{Rs}(Df_3 - Df_4) - \phi_{Ra}(Df_4 - r^{-1}De_4) - \phi_{Ia}(sDf_4)$$

En analysant la table de signature de fautes sur les composants, précisément **Re**, on peut prévoir que le résidu r_3 soit sensible à la défaillance de cet élément injectée par simulation à t=5s, d'ailleurs ça apparaît nettement sur la figure I.18.

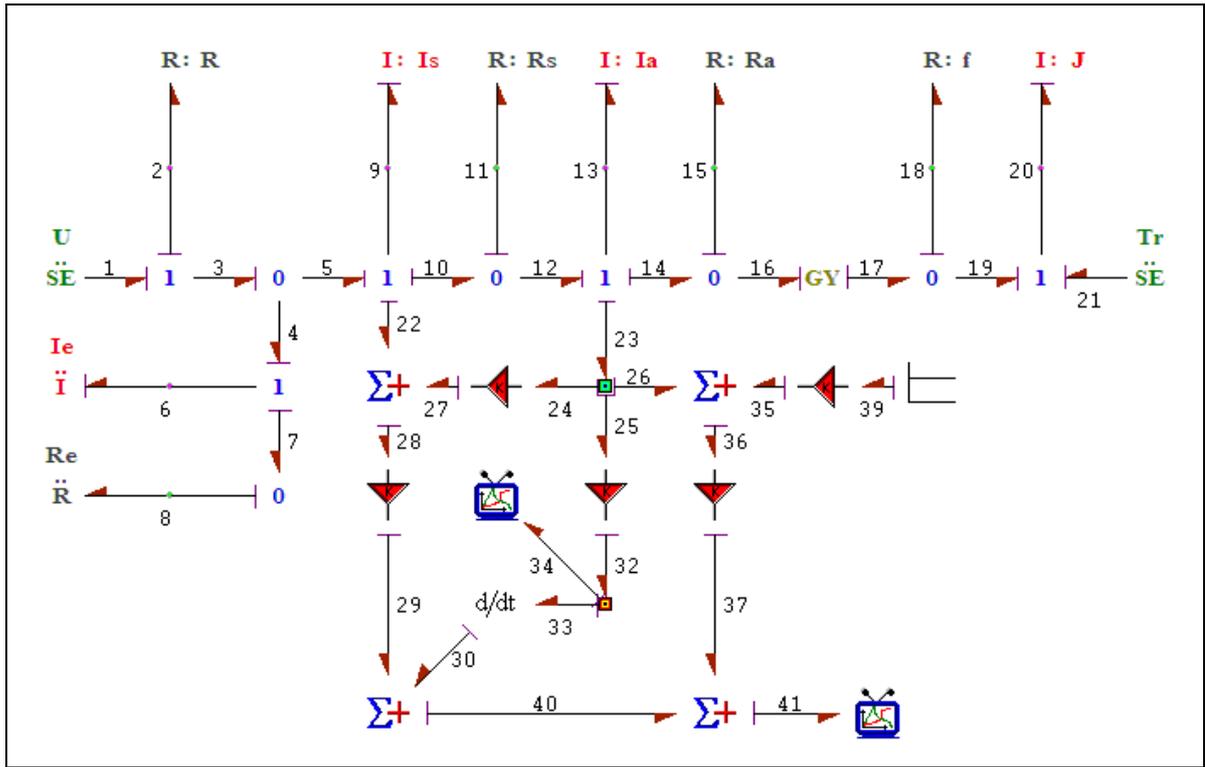
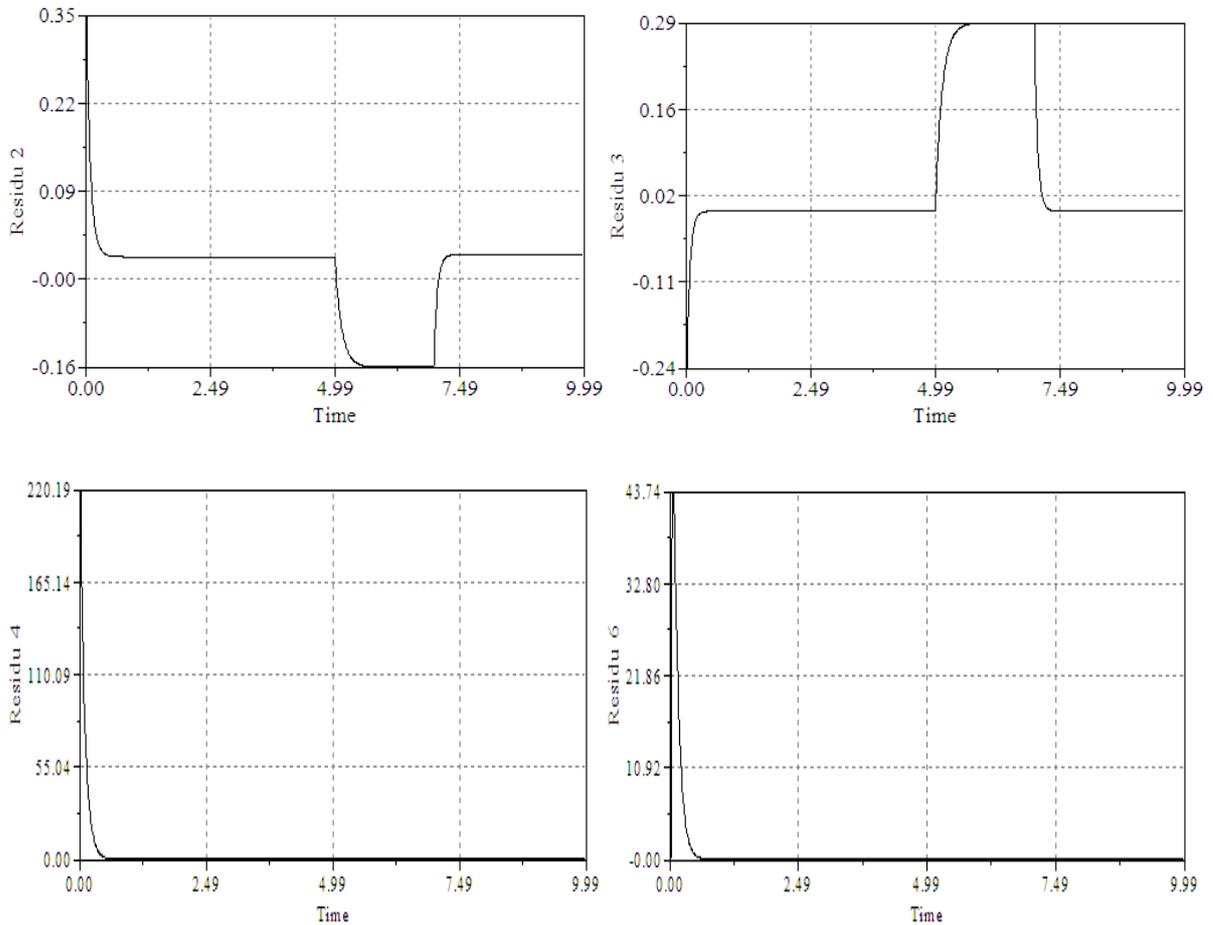


Figure I. 17 Schéma bloc associé au modèle bond graph du résidu r_6



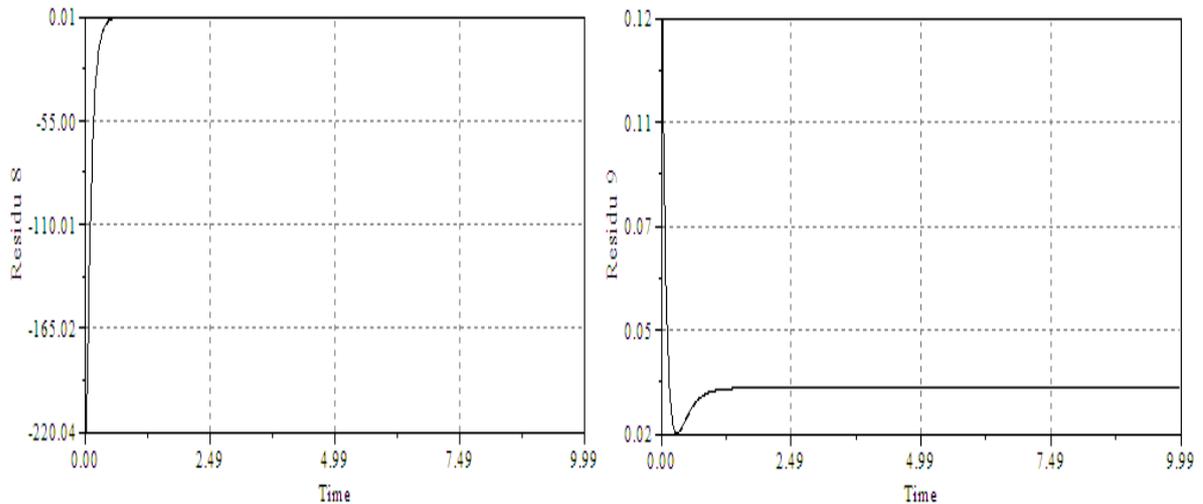


Figure I. 18 Réponses des résidus à la défaillance de Re

A partir de ces simulations on constate que r_2 et r_3 sont sensibles à la défaillance de Re cela est dû à la présence de De_1 dans leurs expressions. Le reste des résidus ne sont pas sensibles à la défaillance de cet élément.

I.13. Conclusion

Toutes les techniques possibles de surveillance en bond graph ont été expliquées dans ce chapitre. On a constaté que la tâche primordiale qui intrigue le chercheur est l'optimisation du nombre et de la position des capteurs (détecteurs) sur l'installation afin que le processus industriel soit fiable et peu couteux.

Les tâches de détection et de localisation des défauts ont été clairement expliquées afin de faciliter la compréhension de la suite de cette thèse.

L'application choisie est la colonne de distillation qui a été modélisée auparavant et qu'on vient de la surveiller en utilisant le modèle bond graph. Le principe de fonctionnement de cette colonne sera brièvement décrit dans le chapitre suivant.

Description de la colonne de distillation

II.1. Introduction

La distillation est un processus dans lequel un mélange de liquide ou de vapeur de deux substances ou plus est séparé dans ses fractions composantes de la pureté désirée, par l'application et le déplacement de la chaleur [23].

La distillation est basée sur le fait que la vapeur d'un mélange d'ébullition sera plus riche en composants ayant les points de base d'ébullition. Par conséquent, quand cette vapeur est refroidie et condensée, le condensât contiendra des composants plus volatils. Les colonnes de distillation sont conçues pour réaliser cette séparation efficacement [24]. Bien que beaucoup de gens aient une idée juste sur ce que signifie le sens de distillation, les aspects importants qui semblent être marqués du point de vue de fabrication sont :

- La distillation est la technique de séparation la plus commune.
- Elle consomme d'énormes quantités d'énergie en termes de conditions de refroidissement et de chauffage.
- Elle peut contribuer à plus de 50% des frais d'exploitation des usines.

La meilleure manière de réduire les frais d'exploitation des unités existantes, est d'améliorer leur efficacité et l'opération d'optimisation et de commande des processus. Pour réaliser cette amélioration, une compréhension complète des principes de distillation et savoir comment elle est essentielle la manière dont les systèmes de distillation sont conçus [25], [26].

II.2. Distillation

II.2.1. But de la distillation

Le but d'une opération de distillation est la séparation par voie physique dans divers constituants d'un mélange liquide, liquéfiable ou fusible, le choix de la méthode résulte dans trois considérations [26]:

- Les conditions physiques du problème.
- Les conditions locales (implantation, disponibilité de chauffage et de main-d'œuvre)

- Les conditions économiques.

La distillation est la principale méthode de séparation qui doit être effectuée dans une colonne de distillation. Il n'existe pas une méthode absolument rigoureuse pour obtenir une solution unique et optimale.

Nous allons cependant essayer de présenter la démarche du raisonnement à suivre pour arriver à une solution pratique et poser correctement un problème de distillation.

II.2.2. Principes de la distillation

La séparation des composants d'un mélange liquide à l'aide de la distillation dépend des différences entre les points d'ébullition des différents composants. En outre, selon les concentrations des composants actuels, le mélange liquide aura différentes caractéristiques du point d'ébullition. Par conséquent, les processus de distillation dépendent des caractéristiques de pression de la vapeur des mélanges liquides.

II.2.2.1. Pression et ébullition de la vapeur

La pression de la vapeur d'un liquide à une température particulière, est la pression d'équilibre exercée par des molécules de la surface liquide.

Voici quelques points importants concernant la pression de vapeur :

- L'absorption d'énergie soulève la pression de la vapeur.
- La pression de la vapeur est liée à l'ébullition.
- On dit qu'un liquide 'bout' quand la pression de la vapeur est égale à la pression environnante.
- La facilité avec laquelle un liquide bout dépend de sa volatilité.
- Les liquides ayant des pressions élevées de vapeur (liquides volatils) bouilliront à de plus basses températures.
- La pression de vapeur est par conséquent le point d'ébullition d'un mélange liquide, dépend des quantités relatives des composants dans le mélange.
- La distillation se produit en raison des différences dans la volatilité des composants dans le mélange liquide.

II.2.2.2. Diagramme d'ébullition de point

Le diagramme d'ébullition de point montre comment les compositions d'équilibre des composants dans un mélange liquide changent avec la température à une pression fixe.

II.2.3. Diverses méthodes de distillation

Le terme « distillation » englobe en fait plusieurs procédés qui diffèrent par leur mise en œuvre.

II.2.3.1. Distillation simple (distillation différentielle ou équilibrée)

La distillation simple consiste à éliminer, en continu par condensation, la vapeur enrichie en produit le plus volatil d'un mélange porté à ébullition. Ce liquide s'appauvrit continuellement en composé volatil au cours de l'opération. La distillation simple peut être considérée comme le résultat d'une infinité de distillations instantanées. Cette méthode est utilisée en discontinu pour séparer un mélange de plusieurs liquides de points d'ébullition assez différents, en fraction (ou coupes) correspondant à des produits plus ou moins riches en chaque constituant. C'est la méthode utilisée par le bouilleur de cru ou le chimiste de laboratoire, pour séparer des produits possédant de grandes différences de point d'ébullition. Cet enrichissement est généralement insuffisant pour obtenir un distillat avec une pureté satisfaisante.

II.2.3.2. Distillation instantanée (distillation à l'équilibre ou vaporisation éclairée)

La distillation instantanée consiste à vaporiser partiellement, en discontinu ou en continu, un mélange liquide, puis consiste à séparer à chaque instant la phase vapeur de la phase liquide, ces deux phases étant en équilibre permanent. Le mélange est vaporisé dans le rebouilleur puis détendu dans une chambre de type cyclone dans laquelle se fait la séparation entre la vapeur et le liquide. Cette méthode est surtout utilisée pour les mélanges à composants multiples en vue de séparer, grossièrement, les produits volatils (industrie pétrolière).

II.2.3.3. Rectification

La rectification est l'opération industrielle de distillation qui consiste à séparer plusieurs constituants d'un mélange liquide par échange de matière et d'énergie entre une phase vapeur et une phase liquide. Cette séparation se fait au moyen d'une série de vaporisations et de condensations entre le liquide descendant (reflux) et la vapeur ascendante qui circulent à contre-courant dans la colonne. Avec une colonne à plateaux, ce contact se renouvelle au niveau de chaque étage et plus il y aura de plateaux, plus le distillat sera riche en produits volatils. Pour les colonnes à garnissage, le contact entre les deux phases est permanent et son efficacité dépend du type et de la longueur du garnissage. La rectification permet donc de séparer des constituants d'un mélange, avec une grande pureté. Il existe en réalité plusieurs

types de rectification : la rectification ordinaire, la rectification azéotropique, la rectification extractive.

II.3. Colonne de distillation

II.3.1. Opération et terminologie de base

Le mélange liquide qui doit être traité est connu pendant que l'alimentation est présente sur un plateau connu sous le nom de plateau d'alimentation. Ce dernier divise la colonne en section supérieure et autre inférieure. L'alimentation coule en base de la colonne où elle est rassemblée au fond du rebouilleur. La chaleur est fournie au rebouilleur pour produire de la vapeur. La source d'entrée de la chaleur peut être n'importe quel fluide approprié, bien qu'à la plupart des usines de produits chimiques soit normalement vapeur. Dans les raffineries, la source de chaleur peut être les jets du produit d'autres colonnes. La vapeur augmentée dans le rebouilleur est connue comme produit des fonds ou simplement, base. La vapeur relève la colonne, et au moment où elle sort du dessus de l'unité, elle est refroidie par un condenseur. Le liquide condensé est stocké dans une cuve connue sous le nom de tambour de reflux. Une partie de ce liquide est réutilisée de nouveau au dessus de la colonne et ceci s'appelle le reflux. Le liquide condensé qui est enlevé du système est connu comme produit de distillat. Ainsi, il y a des écoulements internes de vapeur et de liquide dans la colonne aussi bien que des sorties externes des alimentations que des jets de produit [23].

Cependant, les rebouilleurs peuvent être considérés comme les échangeurs de chaleur qui sont exigés pour transférer assez d'énergie pour apporter le liquide du fond de la colonne au point d'ébullition. Dans ce qui suit nous présentons des exemples typiques des rebouilleurs.

II.3.2. Conduite d'une colonne

Pour la raison mentionnée précédemment, la pression de fonctionnement est un des paramètres fondamentaux lors de la conception sur le plateau de tête autour de cette valeur. On régule en fait la pression sur chaque plateau, à de faibles variations près dues à des phénomènes hydrodynamiques.

Pour pouvoir modifier les débits internes dans la colonne et adoucir les variations de la composition des produits, on dispose en haut et en bas des ballons des quantités de liquide nettement plus importantes que sur les plateaux :

- Grâce au ballon de tête, on peut augmenter le débit de reflux, donc les débits internes du liquide.
- Par vaporisation du contenu du ballon de fond, on peut augmenter les débits internes de la vapeur.

Pour disposer à tout instant de ces retenues, on règle les niveaux du liquide dans les deux ballons. D'un point de vue automatique, la pression sur le plateau de tête et les deux niveaux sont des sorties du système. En comptant les entrées sur lesquelles on peut agir (commandes du système), on s'aperçoit qu'il est possible de régler deux autres sorties : on cherche généralement à régler les taux d'impureté dans le distillat et dans les résidus.

Le débit et la composition de l'alimentation sont considérés comme des perturbations et les entrées du système sont :

- La puissance fournie pour condenser le flux des vapeurs de tête.
- Le débit du distillat.
- Le débit du reflux.
- Le débit du résidu.
- La puissance fournie au rebouilleur pour vaporiser une partie du résidu.

On dispose donc de cinq commandes pour commander cinq sorties :

- La pression de tête.
- Le niveau du ballon de tête.
- Le niveau du ballon de fond.
- Le taux d'impuretés dans le distillat.
- Le taux d'impuretés dans le résidu.

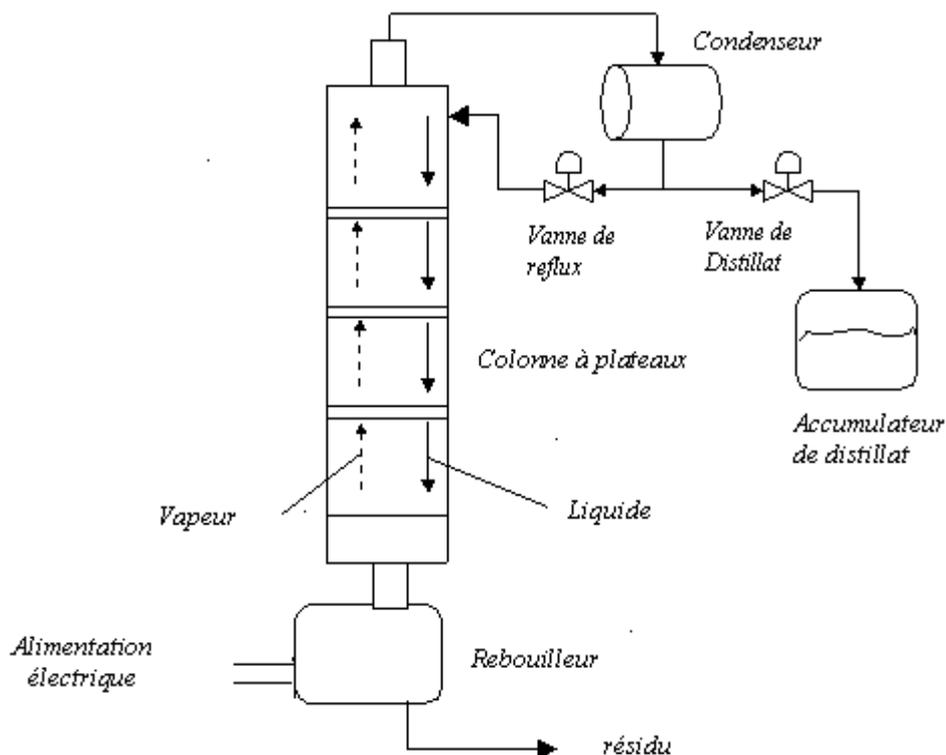


Figure II.1 : Colonne de distillation

Pour assurer le bon fonctionnement de la colonne, il est nécessaire de régler efficacement la pression de tête et les niveaux dans les ballons ; ces variables ont des dynamiques plus rapides que celles des taux d'impuretés. Aborder globalement le problème de la régulation des cinq sorties, implique donc un mélange de dynamique aux constantes de temps sensiblement différentes, qui conduit à des problèmes de robustesse. On préfère à cette approche une commande hiérarchisée :

- Les régulations de base, pression de tête et de niveaux sont d'abord définies, leurs dynamiques ont des constantes de temps de l'ordre de cinq minutes.
- Les régulations des taux d'impureté sont conçues ensuite sous l'hypothèse du bon fonctionnement des régulations de base, leurs dynamiques ont des constantes de temps de l'ordre de la demi-heure.

II.3.3. Types de colonnes de distillation

Il existe plusieurs types de colonnes de distillation, chacune est conçue pour exécuter des types spécifiques de séparation et chaque conception diffère en termes de complexité et de fonctionnement. Selon le nombre et le type de plateaux utilisés et le mode de conduite de la colonne, on distingue les types suivants : [25]

1. Le séparateur flash
2. La colonne de distillation continue
3. La colonne de distillation discontinue

Ces trois classes de colonnes peuvent aussi contenir plusieurs configurations selon le mélange à séparer et les conditions opérationnelles (température, pression).

II.3.3.1. Séparateur flash

Le séparateur flash est la plus simple méthode de séparation par la distillation. Quand un mélange est placé dans une enceinte sous certaines conditions de température et de pression, deux phases différentes apparaissent, l'une liquide et l'autre vapeur, et l'équilibre thermique s'établit entre elles.

Une analyse de la composition des deux phases révèle que la vapeur contient les composés dont la masse molaire est petite, cette opération de séparation est appelée flash, elle peut s'effectuer de façon continue.

Les opérations flash ont physiquement lieu sur des plateaux empilés à l'intérieur d'une colonne.

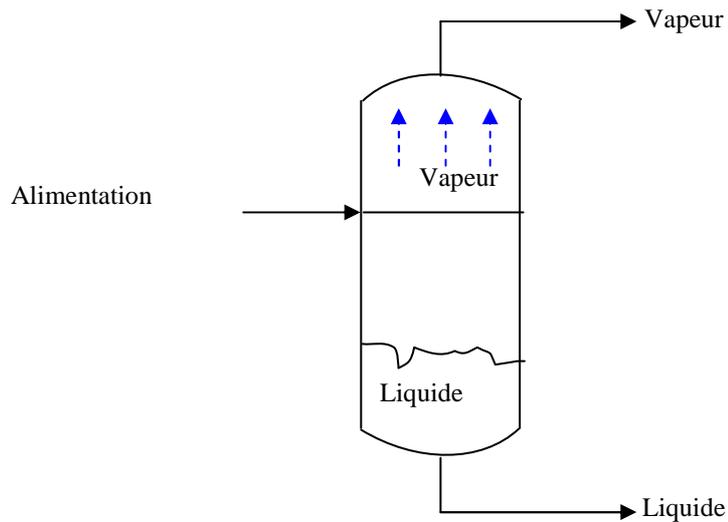


Figure II.2 Schéma général d'un séparateur flash.

II.3.3.2. Colonne de distillation continue

Ce type est le plus utilisé dans l'industrie pour la séparation des mélanges liquide-gazeux à des compositions chimiques différentes.

A la distillation continue, le mélange à traiter est introduit par le plateau d'alimentation qui est désigné spécial, puisqu'il reçoit le mélange à séparer de façon continue de l'extérieur de la colonne.

Les colonnes de distillation continues peuvent être classifiées selon leur :

1. Nature de l'alimentation

- Colonne binaire : c'est la colonne à distiller qui sépare un mélange de deux composants; de la tête sort le distillat, le composé léger de la charge avec un peu du composé lourd, et du fond sort le résidu, le composé lourd de la charge avec un peu du composé léger.
- Colonne multi composants : l'alimentation contient plus de deux composants.

2. Nombre de jets de produit

- Colonne diversifiée : c'est une colonne à plus de deux jets de produits.

3. Sortie d'aliments sortant quand ils sont employés pour faciliter la séparation

- Distillation extractive où les aliments apparaissent dans le jet inférieur de produits.
- Distillation azéotropique où les aliments apparaissent au jet supérieur de produits.

4. Conception interne :

- Colonne à plateaux : les plateaux de conceptions diverses sont employés pour supporter le liquide afin de fournir le meilleur contact entre la vapeur et le liquide, dans ces colonnes les plateaux sont conçus pour assurer une dispersion de la vapeur au sein du liquide.
- Colonne à garnissage où les garnissages sont employés pour augmenter le contact entre la vapeur et le liquide, dans les colonnes garnies le transfert s'effectue à la surface du liquide sans occlusion appréciable des bulles gazeuses.

Il existe plusieurs schémas en distillation continue, sauf pour les mélanges binaires. Dans ce cas, il est évident que le produit volatil sortira en tête et le produit lourd sortira en pied de la colonne.

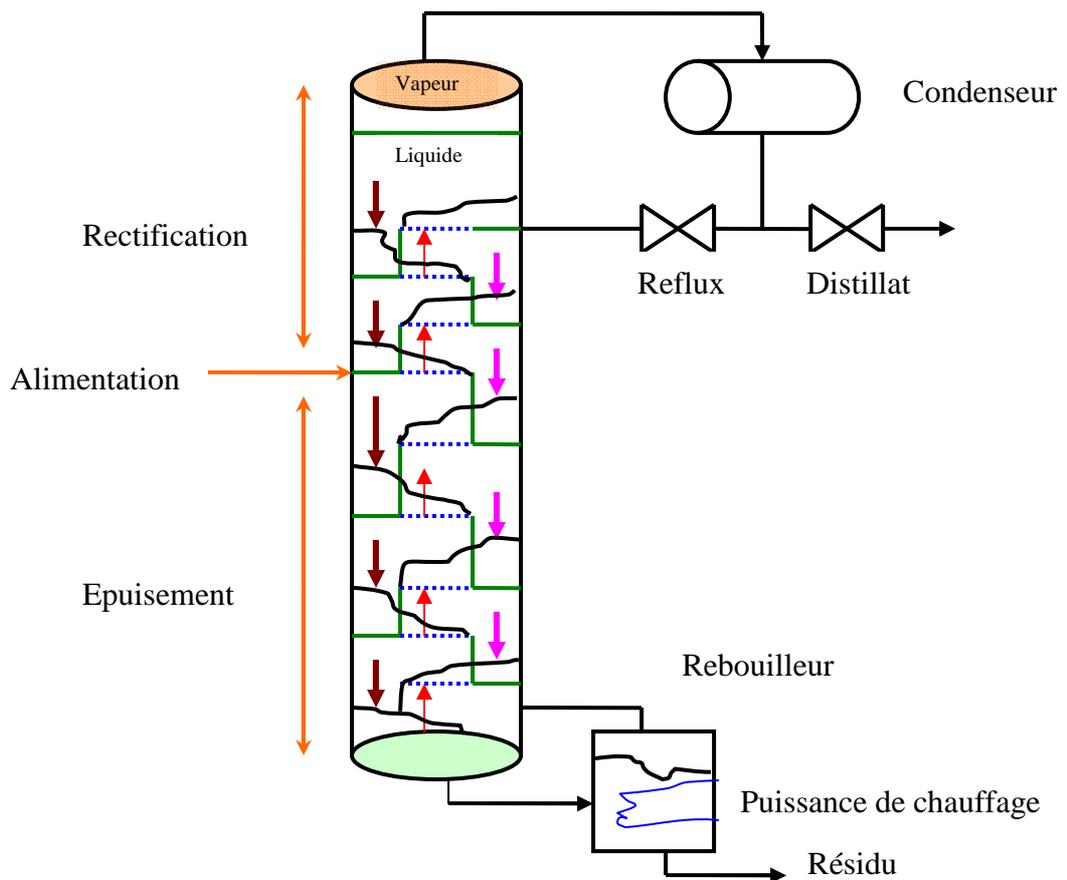


Figure II.3 Schéma d'une colonne de distillation continue

II.3.3.3. Colonne de distillation discontinue

Le schéma de la colonne de distillation discontinue est généralement simple et est toujours le même.

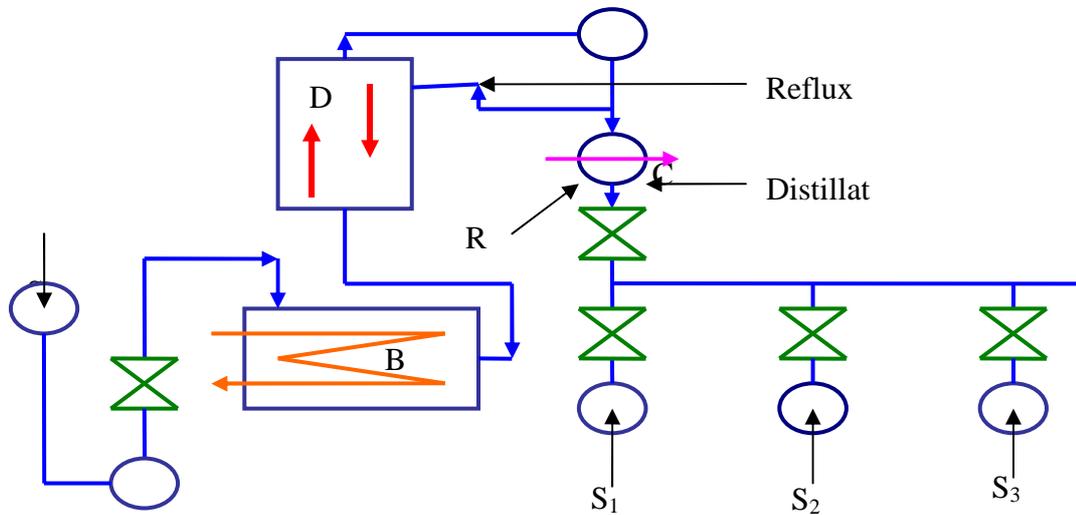


Figure II.4 Schéma de la colonne de distillation discontinue

Ce type de colonnes est utilisé pour séparer des petites quantités de produits, tels que les produits chimiques et pharmaceutiques qui sont généralement purifiés par cette distillation. Le produit stocké dans S_0 est chargé dans une chaudière **B** munie d'un moyen de chauffage. La vapeur produite dans **B** monte à travers une colonne **D** en s'enrichissant en produit léger avant d'arriver au condenseur **C**.

Le condensat est partagé par réglage entre le reflux qui est renvoyé en tête de la colonne et rétrograde jusqu'à la chaudière en s'enrichissant en produit lourd, et le soutirage ou distillat qui traverse généralement un réfrigérant **R** avant d'être envoyé au stockage.

Le produit le plus léger sera stocké dans le réservoir S_1 , tant que la composition du distillat restera convenable. Puis, il s'enrichit en produit lourd et on stockera la fraction intermédiaire dans S_2 . Le second constituant, par ordre de volatilité décroissante, arrivera ensuite à une pureté suffisante pour être coulé dans S_3 .

On peut avoir ainsi un nombre assez important de fractions pures que l'on appelle aussi les cœurs et un nombre de fractions intermédiaires que l'on appelle tête pour la première et queues ou culots, ou résidu pour la dernière. Il est exceptionnel que l'on dépasse les fractions. Les fractions intermédiaires peuvent contenir seulement les constituants qu'elles séparent dans ce cas, on les remélange à la charge brute qui va suivre.

Elles peuvent aussi contenir des produits intermédiaires indésirables ; dans ce cas, on attendra d'avoir recueilli une quantité suffisante pour constituer une charge complète dès la chaudière ; on recueillera une fraction de produit léger, qui sera coulée ou recyclée, une fraction intermédiaire concentrée en impuretés indésirables, et il restera dans la chaudière une fraction lourde que l'on distillera en mélange avec la charge suivante.

II.3.4. Description de l'unité de distillation continue

L'unité de distillation continue comprend plusieurs éléments :

II.3.4.1. Rebouilleur : le rebouilleur est constitué d'un réservoir cylindrique muni d'un échangeur à serpentin dans lequel circule de la vapeur sous pression.

Le rebouilleur est équipé de plusieurs accessoires :

- Sonde de température mesurant la température intérieure du rebouilleur.
- Dispositif de prélèvement d'échantillons.
- Col de changement avec bouchon et joint en PTFE.
- Sous-verre permettant d'évacuer les produits les moins volatils par débordement continu.

II.3.4.2. Colonne à garnissage (virole) : c'est l'organe dans lequel se fait la séparation.

II.3.4.3. Condenseur : il est constitué d'un cylindre double enveloppes, comportant une bougie interne verticale dans laquelle circule le produit de refroidissement.

II.3.5. Description de l'unité de distillation discontinue

L'unité de distillation discontinue constituée avec les mêmes éléments de l'unité de distillation continue mais avec des petites différences :

II.3.5.1. Rebouilleur : est constitué d'un ballon dans lequel la charge à séparer est placée au début de la manipulation.

II.3.5.2. Colonne à plateaux : c'est l'organe dans lequel se fait la séparation, la colonne à distiller est calorifugée avec un dispositif en demi-coquille amovible.

II.3.5.3. Condenseur : le circuit de refroidissement est équipé :

- D'un débitmètre à flotteur.
- D'une sonde de température.
- D'une bougie réfrigérante.
- D'un dispositif de prélèvement d'échantillons.

II.4. Fonctionnement d'une colonne de distillation

L'installation d'une colonne de distillation se compose d'une virole, un contact liquide-vapeur est assuré par les plateaux ou les garnissages. Deux appareils d'échange thermique, le condenseur et le rebouilleur permettent d'engendrer les deux flux liquide et vapeur [23], [24], [25].

II.4.1. Virole

La virole est l'enveloppe de la colonne, c'est un corps cylindrique en tôles d'acier soudées. Elle doit résister aux efforts de pression, de dilatation et éventuellement aux efforts du vent et aux séismes.

La virole peut être constituée de sections de différents diamètres, si le débit et les propriétés physiques du flux de vapeur varient fortement entre le pied et la tête de la colonne, il sera plus économique d'ajuster la colonne aux conditions opératoires et de prévoir une colonne à deux ou à trois diamètres. Deux types de viroles sont possibles : virole monobloc, virole tronçon.

II.4.2. Contacteurs liquide-vapeur

Les unités de distillation peuvent comporter des appareils divers et l'appareil spécifique est constitué d'un contacteur liquide-vapeur dont la diffusion à contre-courant instaure les phases liquide et gazeuse et le phénomène qui régit la distillation. Le transfert de matière et de chaleur s'établit au moyen du dispositif de contact qui engendre la surface d'échange entre les deux phases (liquide-vapeur). Le contact est effectué par une série d'éléments actifs qui sont les plateaux et les garnissages dans un but d'effectuer un transfert de masse entre ces deux phases. Cet élément reçoit en effet deux alimentations : un liquide descendant et une vapeur ascendante (Figure II.5).

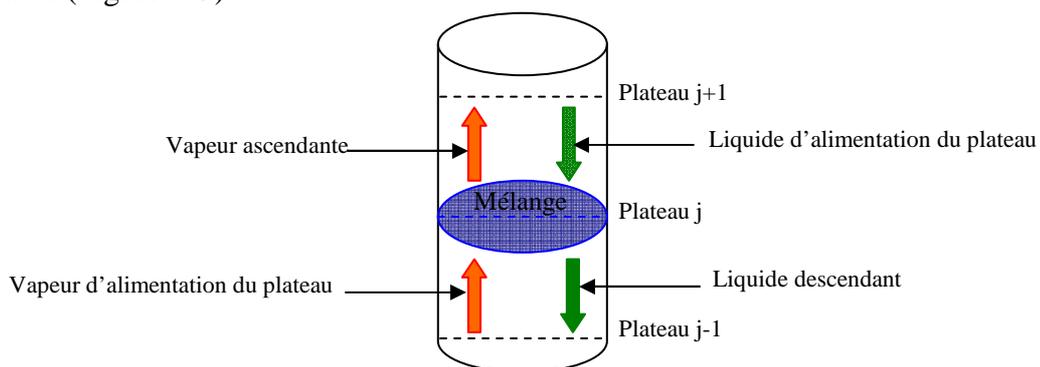


Figure II.5 Contact liquide vapeur.

II.4.2.1. Plateaux

Les plateaux sont des éléments actifs de la colonne. Le plateau a pour fonction la mise en contact de phase liquide et de la phase gazeuse de façon à les amener le plus près possible de l'état d'équilibre [4].

Le long de la colonne de distillation, les constituants d'un mélange initial vont se déplacer en masse d'une phase à une autre tel que le liquide descend de plateau en plateau et sous l'effet de la chaleur, les produits les plus volatils se vaporisent.

Pour ce faire, on utilise directement l'énergie de pression de la vapeur pour disperser les phases l'une de l'autre.

Il existe donc deux types de dispositifs utilisés :

- Une dispersion du gaz dans une phase liquide continue correspondante aux colonnes à plateaux.
- Une dispersion du liquide dans une phase gazeuse continue correspondante aux colonnes à garnissage.

A part ces quelques dispositifs particuliers, ils peuvent se ranger en deux grandes catégories :

- Les plateaux à courants croisés avec trop-plein.
- Les plateaux à contre-courant sans trop-plein.

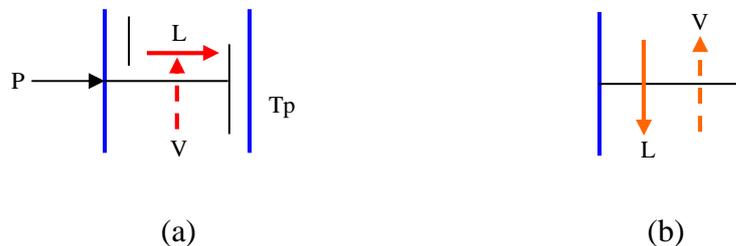


Figure II.6 Types de plateaux d'après l'écoulement des phases

(a) : Plateau à courants croisés

(b) : Plateau à contre-courants

Dans les plateaux à courants croisés, la phase gazeuse ascendante traverse le liquide qui se déplace horizontalement sur le plateau. Le liquide s'écoule par gravité d'un plateau à l'autre par une conduite (trop-plein). Les plateaux à contre-courant, ne comportent pas de barrage de sortie ni de trop-plein. Le liquide et la vapeur s'écoulent par les mêmes orifices.

II.4.2.2. Garnissages

Le garnissage est déposé sur toute la section de la colonne soit en vrac soit donné en fraction.

Il existe plusieurs garnissages qui diffèrent par la forme et les matériaux de construction.

La phase liquide et la phase vapeur circulent en contre-courant, le liquide ruisselle sur les éléments du garnissage formant un film qui est léché par la phase gazeuse.

Le garnissage présente des pertes de charge moins élevées que les plateaux, par contre sa souplesse de fonctionnement est fiable. Il convient dans les cas suivants :

- Produit très corrosif.
- Petites dimensions.

II.4.3. Appareils d'échange thermique

La colonne de distillation comporte deux appareils d'échange thermique, le rebouilleur et le condenseur qui ont pour rôle d'engendrer les débits du liquide et de la vapeur.

II.4.3.1. Rebouilleur

Il est constitué d'un ballon dans lequel la charge à séparer est placée en début de la manipulation.

Il y a différents types de rebouilleurs :

- **Rebouilleur type Kettle**

Ce rebouilleur vaporise partiellement le liquide du fond de la colonne et réalise la séparation des phases obtenues.

- **Rebouilleur à thermosiphon vertical**

Dans ce type, le liquide du fond de la colonne circule naturellement vers le rebouilleur dans lequel il est partiellement vaporisé.

- **Rebouilleur à passage unique**

Prélevé sur le dernier plateau, le liquide passe en une fois à travers le rebouilleur, les deux phases (liquide et vapeur) sont séparées au fond de la colonne.

- **Rebouilleur par four**

Poussé par une pompe, le liquide de fond de la colonne est partiellement vaporisé dans les tubes du four.

II.4.3.2. Condenseur

Le condenseur est un appareil d'échange thermique où la condensation est un procédé de changement de phases, il permet d'obtenir le flux liquide. Il a pour rôle de condenser totalement ou partiellement les vapeurs de tête de la colonne de manière à disposer du reflux qui permet d'initier le courant liquide sur les plateaux.

Les condensations les plus souvent rencontrées sont :

- **Condensation totale**

Le liquide provenant de la condensation des vapeurs de tête se partage entre le débit de reflux et le débit du produit de tête (Figure II.7), il n'y a pas de dégazage.

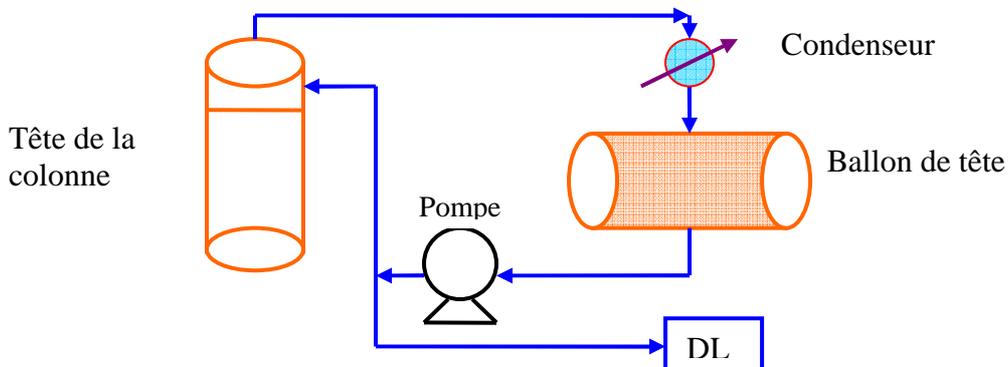


Figure II.7 Condensation totale

- **Condensation partielle**

Dans la figure II.8.a, une partie des vapeurs de tête non condensées, constitue le distillat gazeux. Les parties condensées se répartissent entre le reflux externe et le distillat liquide. Dans le cas d'une condensation partielle avec produit de tête totalement condensé, (figure II.8.b), seule la fraction vapeur correspondant au reflux externe est condensée.

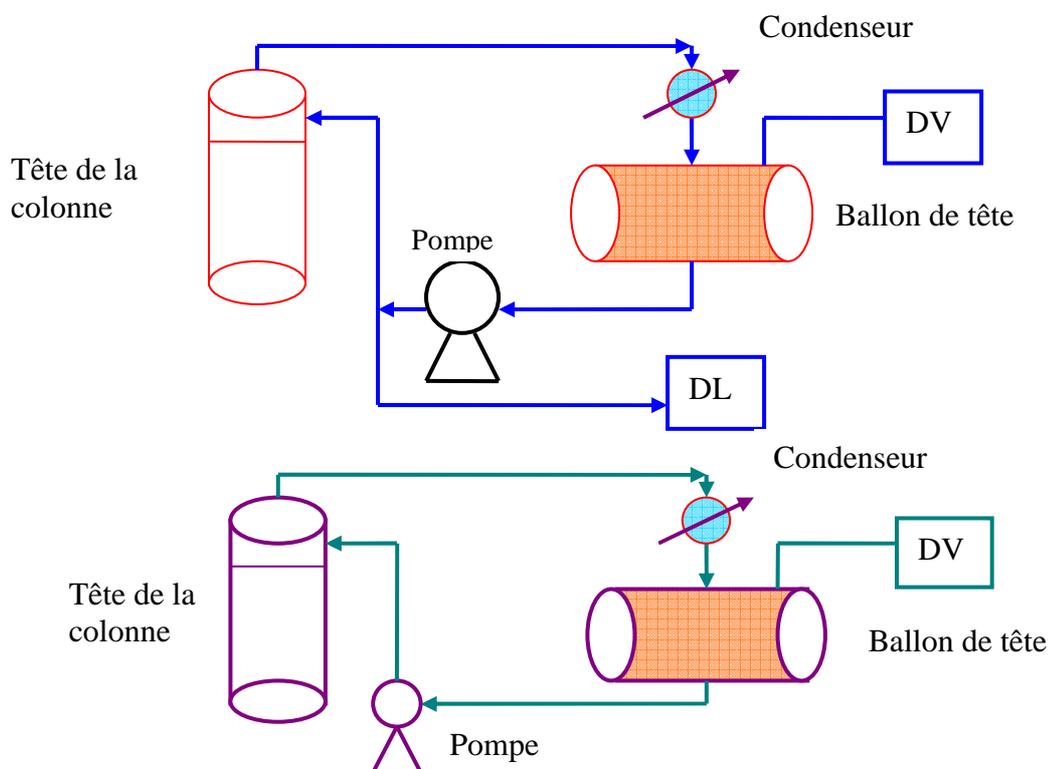


Figure II.8 Condensation partielle

(a) Produit de tête liquide et gazeux

(b) Produit totalement gazeux

II.5. Caractéristiques d'une colonne de distillation

II.5.1. Puissance de la colonne

C'est le nombre théorique de plateaux de la colonne ou c'est la hauteur équivalente à un plateau théorique (H.E.P.T). Pour une colonne donnée, il varie largement en fonction des conditions d'utilisation ; on détermine la H.E.P.T expérimentalement [23].

II.5.2. Débit

C'est le volume de vapeur passant dans la colonne pendant une unité de temps. Le débit sera fonction du diamètre de la colonne.

On ne peut pas augmenter le débit au-delà d'une certaine valeur sous peine de provoquer l'engorgement de la colonne, il se forme un bouchon liquide lorsque la vapeur empêche le liquide de refluer vers le rebouilleur. Les débits molaires du liquide et de la vapeur sont identiques dans la colonne comme le montre la figure II.9.

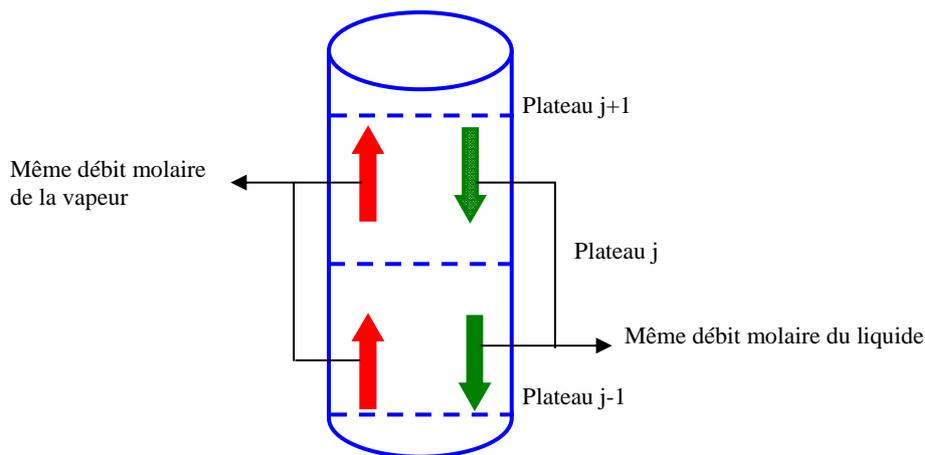


Figure II.9 Débit molaire dans la colonne

II.5.3. Retenue de la colonne : La retenue de la colonne est la quantité de liquide présente dans la colonne à chaque instant (volume de rétention), on distingue généralement :

- **La retenue statique :** c'est la quantité de liquide dans l'appareillage à l'arrêt.
- **La retenue dynamique :** c'est la quantité de liquide dans l'appareillage en cours de fonctionnement.

II.5.4. Efficacité : C'est le rapport du nombre théorique de plateaux par rapport au nombre réel de plateaux. L'efficacité dépend du reflux et de la verticalité de la colonne.

II.5.5. Finesse : La finesse permet de comparer des colonnes ayant la même efficacité et le même pouvoir séparateur pour un mélange. La colonne présentant la plus grande finesse est celle qui a le plus faible volume de rétention.

II.5.6. Pertes de charge : C'est la force que doit vaincre la vapeur pour monter dans la colonne. Pour des obstacles rencontrés par la vapeur dans son mouvement ascendant, le liquide reflux et les changements de direction sont liés à la conception de la colonne.

II.6. Conclusion

On désigne par le nom générique de distillation les opérations fondamentales de transfert de matières et d'énergie permettant de séparer plusieurs composés possédant une différence de volatilité suffisante. Cette séparation se réalise par une succession de vaporisations et de condensations. Elle est basée sur le fait qu'une vapeur produit par un liquide est en équilibre avec le liquide qui lui a donné la naissance et est généralement enrichie en constituant le plus volatil.

L'intérêt du passage par la phase vapeur est donc mis à profit, dans la distillation, pour séparer au moins deux composés en phase liquide. La séparation est effectuée dans une colonne assurant le meilleur contact possible entre la vapeur ascendante et le liquide descendant. On va utiliser les notions de distillation et les techniques de surveillance pour assurer la détection et la localisation des défaillances du rebouilleur dans le chapitre suivant.

Détection et localisation des défauts capteurs dans le rebouilleur

III.1. Introduction

Le diagnostic industriel est le savoir détecter et localiser les défaillances de matériels dans les systèmes industriels. Il joue un rôle primordial pour contribuer à faire gagner des points de disponibilité et de productivité des capitaux investis dans l’outil de production. Tout ceci par l’amélioration des produits fabriqués et essentiellement savoir éviter les dégradations fonctionnelles qui mènent à des arrêts indésirables de production ou des accidents catastrophiques [27], [31], [34].

Les travaux de recherche sur le diagnostic ont mobilisé ces dernières années une large communauté internationale de chercheurs, donnant naissance à plusieurs approches et méthodes sur ce sujet.

Suivant la complexité et la forme de connivence sur le système étudié, on distingue souvent les méthodes de surveillance à base de modèle ou les méthodes de surveillance sans modèle [32], [33].

Ce chapitre a pour but de présenter les notions et les outils nécessaires pour la conception des systèmes de surveillance.

A travers l’extension des procédures graphiques issues de la notion de causalité du bond graph, on définit les conditions de surveillance.

Le principe de génération des relations de redondance analytique directement à partir du modèle bond graph multi-énergie découplé [28].

L’application sur le rebouilleur de la colonne permet d’illustrer l’efficacité de la méthode proposée pour la surveillance des capteurs et des sources de contrôle du processus.

III.2 Détection et localisation des défaillances dans le rebouilleur

III.2.1 Description du rebouilleur

Le rebouilleur d'une colonne de distillation est un processus physique, il est composé d'un thermoplongeur sous forme de cartouche qui assure le chauffage électrique du liquide rentrant dans le rebouilleur à travers des vannes d'alimentation.

Le rebouilleur est connecté à travers une colonne par une série de plateaux qui assurent le transfert de la matière entre les phases. Le système d'instrumentation est composé de capteur de température (T), capteur de pression (P), et capteur de niveau (L) [28].

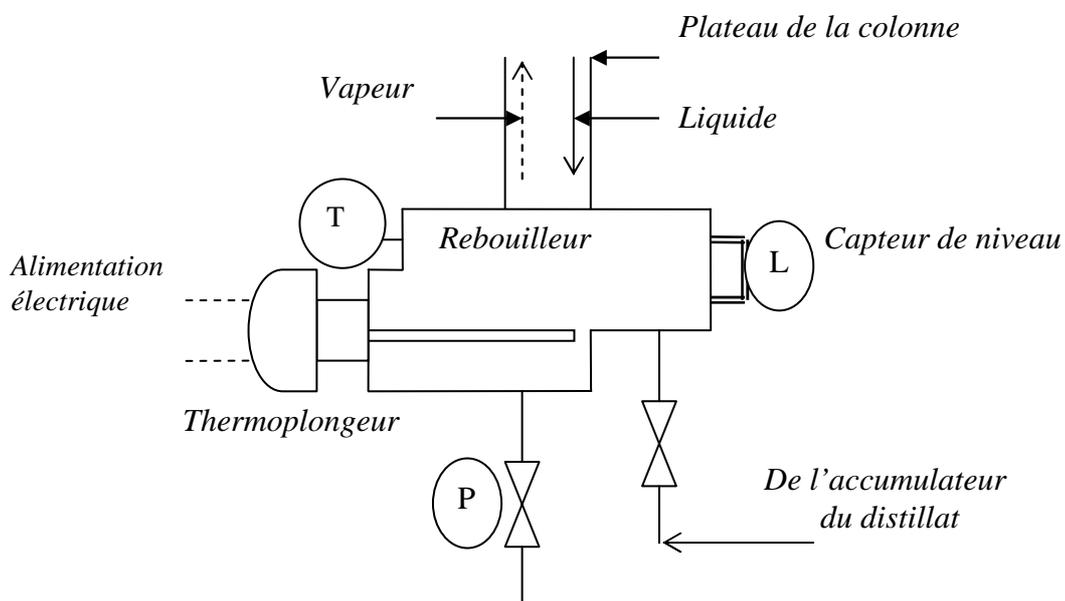


Figure III.1 Schéma fonctionnel du rebouilleur d'une colonne

III.2.2 Modèle Bond-graph à mots

Le modèle bond graph à mots présente l'interconnexion de plusieurs sous systèmes de natures différentes :

- Un circuit électrique alimente le thermoplongeur en puissance électrique. Le thermoplongeur donne une puissance de chauffage au rebouilleur présenté par un lien thermique simple énergie de conduction.
- Deux sources d'alimentation en liquide représentées par des multi liens (liens entourés) assureront l'alimentation en matière de mélange, et qui se comportent comme des sources d'énergie hydraulique, thermique et chimique.

- Le rebouilleur se comporte comme un élément de stockage d'énergie hydraulique thermique et chimique, connecté par une série de plateaux.

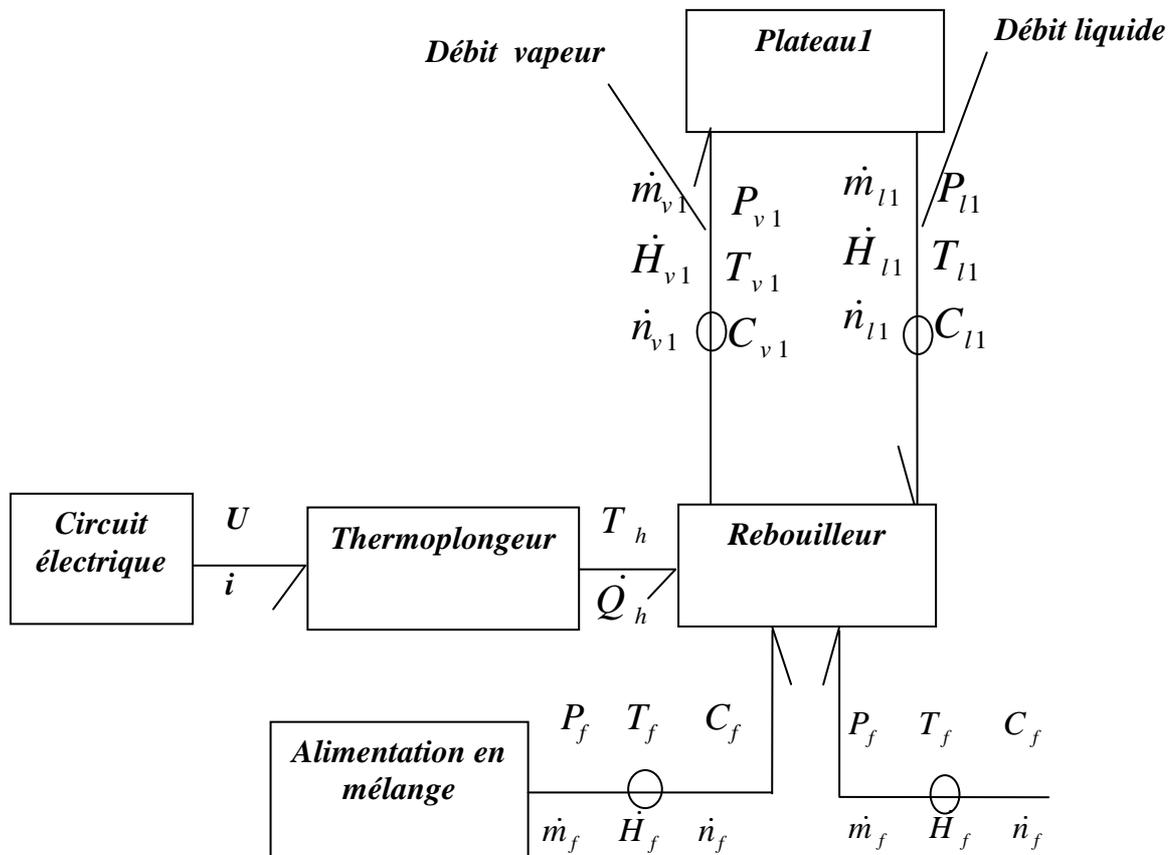


Figure III.2 Modèle bond graph multi-énergie

- Le modèle bond graph à mots permet de voir l'interaction entre les sous modèles du système. Il permet de définir l'ensemble de connexions entre eux.
- Chaque sous système a un modèle bond graph à part entière. On se limite pour cette partie au modèle du rebouilleur avec ses bonds entrants (sortants) de l'extérieur (vers l'extérieur).
- On peut modéliser ces bonds par des sources d'effort ou de flux suivant la causalité du modèle du rebouilleur
- Le modèle bond graph multi-énergie du rebouilleur est donné par la figure (Figure III.3) avec des éléments dotés par l'index '*' se sont des éléments fictifs (dualisés).

Nous avons utilisé des liens en simple et multi-énergie.

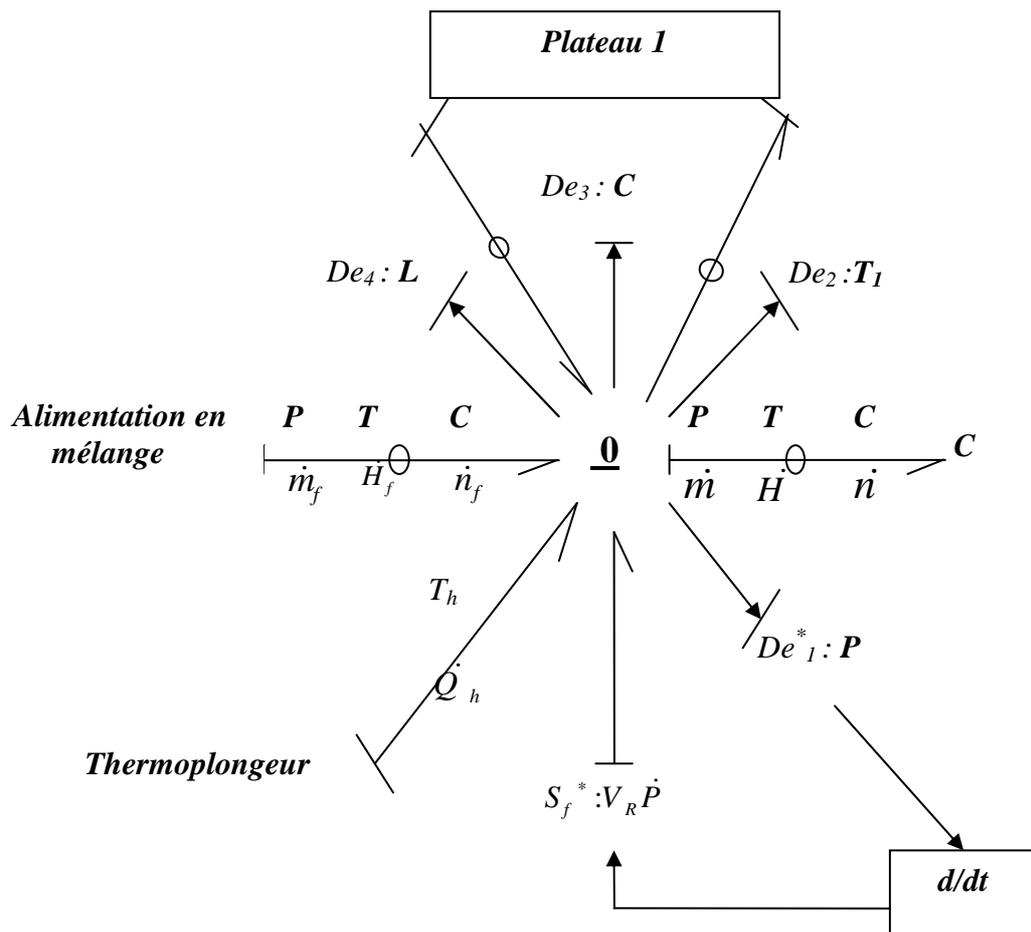


Figure III.3 Modèle Bond-graph multi-énergie du rebouilleur de la colonne

Les variables de puissance choisies pour représenter le modèle sont en pseudo bond graph. Pour le phénomène de convection (dans le thermoplongeur), on utilise la paire (P, \dot{m}) pour l'énergie hydraulique et la paire (T, \dot{H}) pour l'énergie thermique.

Pour le phénomène de conduction (la puissance fournie par le rebouilleur), on utilise la paire (T, \dot{Q}) pour l'énergie thermique et (C, \dot{n}) pour l'énergie chimique.

L'élément multiport représente le phénomène de stockage des trois formes de l'énergie rencontrée.

Le modèle bond graph découplé du rebouilleur est représenté par les trois phénomènes : hydraulique (Figure III.4), thermique (Figure III.5) et chimique (Figure III.6).

Les trois énergies sont vues séparément avec les éléments C qui présentent un même élément multiport.

III.2.2.1. Modèle bond graph du phénomène hydraulique

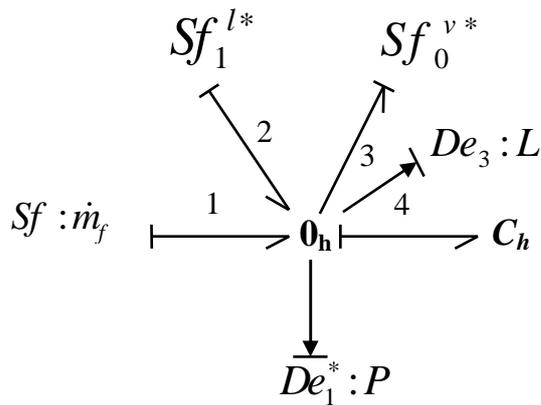


Figure III.4 Modèle Bond-graph du phénomène hydraulique

La relation de redondance analytique déduite de ce modèle est donnée comme suit :

- Jonction 0_h : effort commun, on a une redondance d'information due au placement du capteur de niveau $De_3 : L$, et le capteur de pression $De_1 : P$. La relation constitutive de cette jonction est :

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \tag{III.1}$$

$f_4 = C_h \cdot s \cdot De_1^*$ représente la masse accumulée par l'élément C_h avec De_1^* est supposé comme un capteur de pression fictif, s est l'opérateur de Laplace.

$f_1 = Sf : \dot{m}_f$ est le débit massique du liquide d'entrée.

$f_2 = Sf_1^{l*}$ est le débit massique du liquide venant du plateau 1.

$f_3 = Sf_0^{v*}$ est le débit massique de la vapeur vers le plateau 1. On obtient alors :

$$RRA_1 = C_h \cdot s \cdot De_1^* - \dot{m}_f - Sf_1^{l*} + Sf_0^{v*} \tag{III.2}$$

III.2.2.2 Modèle bond graph du phénomène thermique

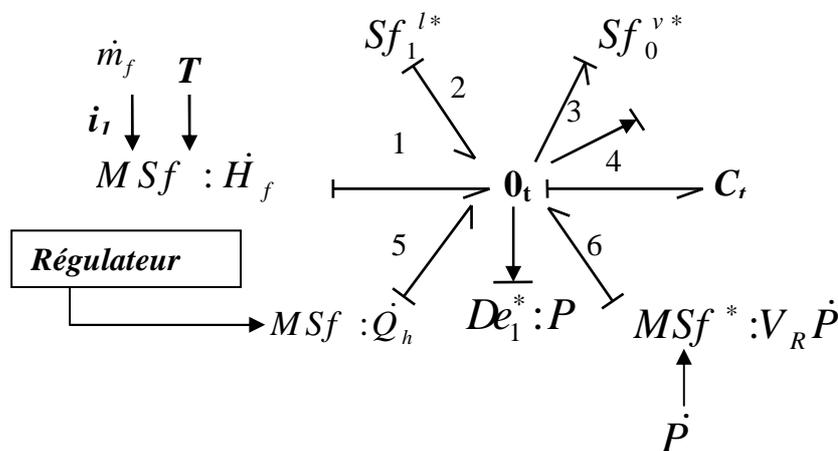


Figure III.5 Modèle Bond-graph du phénomène thermique

La relation de redondance analytique déduite de ce modèle est donnée comme suit :

- Jonction 0_t : effort commun donné par le capteur de température $De_2 : T$.

La relation constitutive de cette jonction est :

$$f_4 = f_1 + f_2 + f_6 + f_5 - f_3 \quad (III.3)$$

Avec $f_4 = C_t . s . De_2$ représente le flux d'enthalpie accumulé par l'élément C_t , le détecteur De_2 est un capteur de température.

$f_1 = MSf : \dot{H}_f$ représente la source de flux d'enthalpie, modulée par les signaux \dot{m}_f et T .

$f_2 = Sf_1^{l*}$ est le débit d'enthalpie du liquide venant du plateau 1.

$f_3 = Sf_1^{v*}$ est le débit d'enthalpie de convection par la vapeur vers le plateau 1.

$f_5 = MSf : \dot{Q}_h$ est une source de flux de chaleur qui représente le thermoplongeur, commandé par un régulateur.

$f_6 = MSf^* : V_R \dot{P}$ est une source de flux fictive, elle représente la puissance thermique des forces de pressurisation. On obtient alors :

$$RRA_2 = C_t s De_2 - \dot{H}_f - Sf_1^{l*} - \dot{Q}_h - V_R \dot{P} + Sf_0^{v*} \quad (III.4)$$

III.2.2.3 Modèle Bond-graph du phénomène chimique

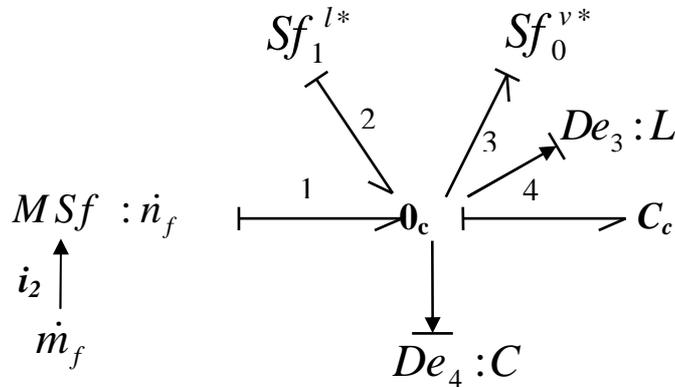


Figure III.6 Modèle Bond-graph du phénomène chimique

La relation de redondance analytique déduite de ce modèle est donnée comme suit :

- Jonction 0_c : effort commun donné par le capteur de concentration $De_4 : C$.

La relation constitutive de cette jonction est :

$$f_4 = f_1 + f_2 - f_3 \quad (III.5)$$

Avec $f_4 = C_c . s . De_4$ représente la concentration des composants du mélange accumulée par l'élément C_c .

$f_1 = MSf : \dot{n}_f$ est le flux molaire du mélange d'entrée.

$f_2 = Sf_1^{l*}$ est le flux molaire du liquide venant du plateau 1.

$f_3 = Sf_1^{v*}$ est le flux molaire de la vapeur vers le plateau 1. On obtient alors :

$$RRA_3 = C_c sDe_1 - \dot{n}_f - Sf_1^{l*} + Sf_0^{v*} \quad (\text{III.6})$$

D'après les relations constitutives des jonctions, on peut obtenir les relations de redondance analytique pour la conception du système de surveillance pour la détection et la localisation des défauts affectant les capteurs et les actionneurs, supposant que les flux de vapeur et de liquide sortant et entrant au rebouilleur sont connus.

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

- La première relation est sensible à la défaillance du capteur de pression ainsi qu'à la défaillance de la source du fluide.
- La deuxième relation représente une collection d'information sur le capteur de température, la source thermique d'entrée \dot{H}_f , la source de convection \dot{Q}_h et d'information sur la puissance de pressurisation $V_R \dot{P}$.
- La troisième relation donne une information sur le débit molaire \dot{n}_f .

III.3 Simulation

La simulation permet de valider le modèle en comparant les résultats du cahier de charges avec les résultats théoriques.

La simulation d'un système en temps continu est généralement obtenue à partir d'un algorithme décrivant les étapes à suivre dans l'exécution d'une procédure; nécessite le choix de celui qui est le mieux adapté (méthode, pas de calcul et précision).

On peut construire une base de simulation du modèle bond graph à l'aide du logiciel SYMBOLS (System Modeling Bond graph Language Simulation). L'outil bond graph permet une étude et une analyse du modèle de façon qualitative (qui ne dépend pas des valeurs numériques des composants qui le constituât).

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

Les figures suivantes montrent l'efficacité de l'approche bond graph pour la détection des défauts injectés sur chaque composant à travers la déviation de la relation considérée.

III.3.1. Défaillance au niveau du capteur de pression

On intègre l'expression de RRA_I dans le modèle bond graph qui correspond au phénomène hydraulique pour obtenir le modèle bond graph sous un diagramme bloc (Figure III.7).

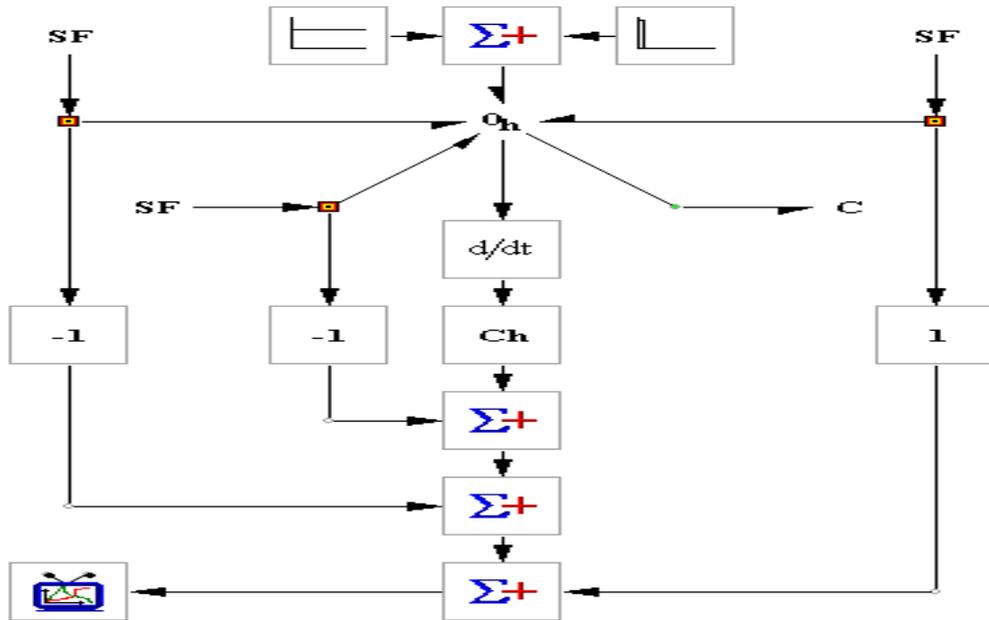


Figure III.7 Diagramme bloc de surveillance du phénomène hydraulique.

Au début, on fait la simulation sans défaillance, la courbe obtenue est une constante au courant du domaine de temps de simulation (Figure III.8.a), il confirme le fonctionnement normal du processus.

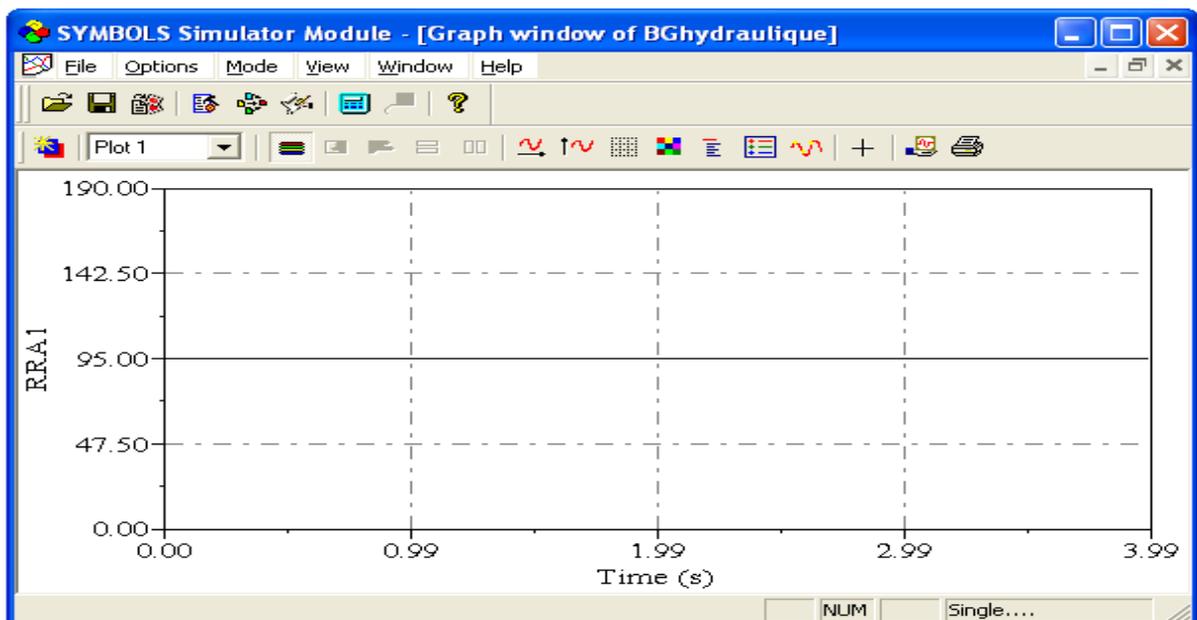


Figure III.8.a Réponse de la RRA1 sans défaillance

On crée un défaut au niveau du capteur de pression entre le temps $t_1=1.5(s)$ et $t_2=1.51(s)$ par l'addition de l'échelon unitaire et l'impulsion de Dirac. On voit que la RRA_1 générée réagit exactement au même instant par un pic, comme le montre la Figure III.8.b.

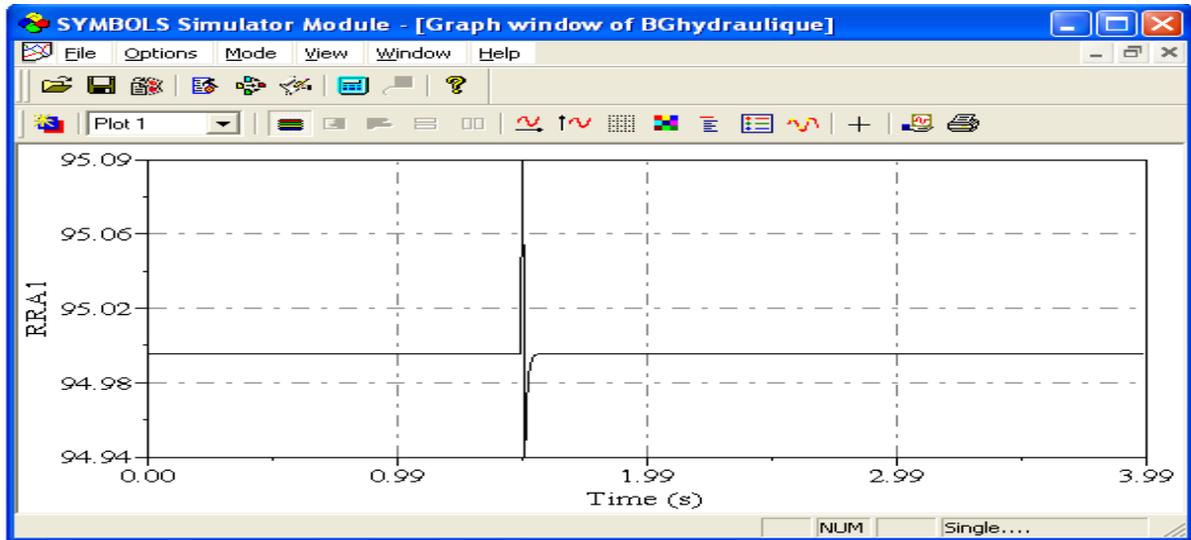


Figure III.8.b Réponse de la RRA_1 à la défaillance du capteur de pression.

III.3.2. Défaillance au niveau du capteur de température

On intègre l'expression de la relation RRA_2 dans le modèle bond graph correspondant au phénomène thermique pour obtenir le diagramme bloc suivant (Figure III.9) :

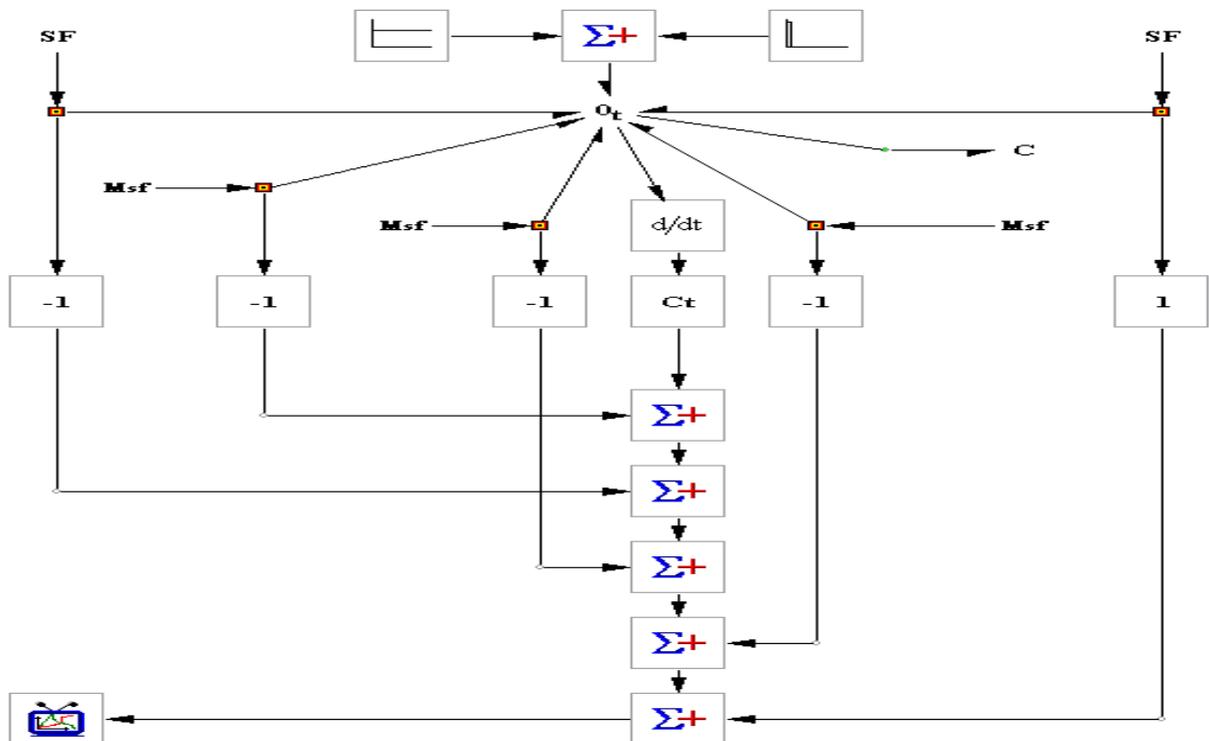


Figure III.9 Diagramme bloc du phénomène thermique

Au début, on fait la simulation sans défaillance, la courbe obtenue est une constante au courant du domaine de temps (Figure III.10.a), il confirme le fonctionnement normal du processus.

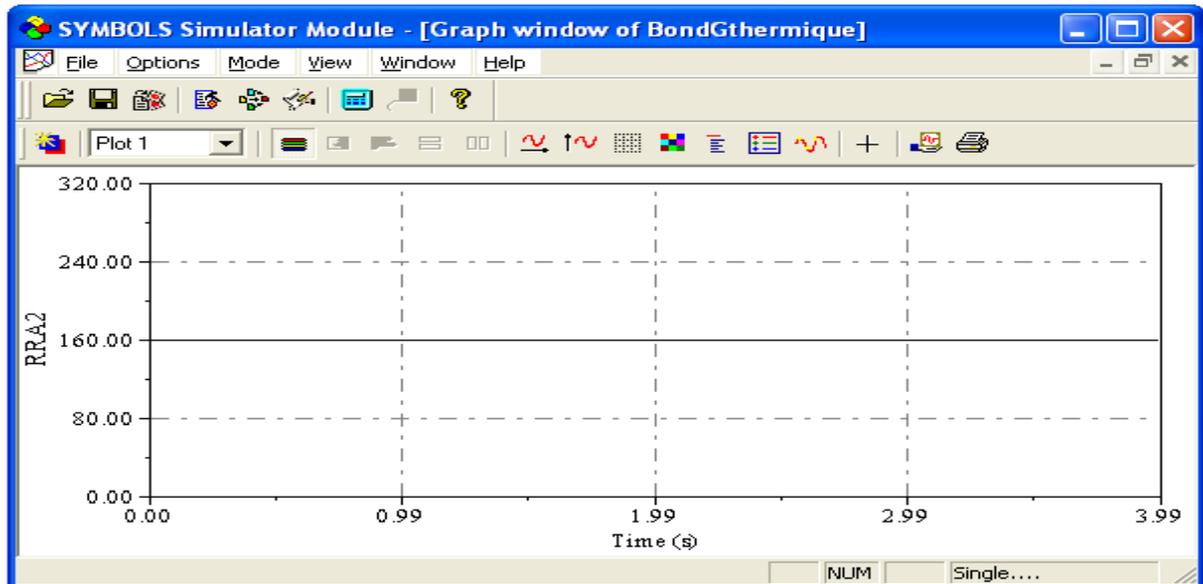


Figure III.10.a Réponse de la RRA_2 sans défaillance

On crée un défaut au niveau du capteur de pression entre le temps $t_1=2.5(s)$ et $t_2=2.51(s)$ par l'addition de l'échelon unitaire et l'impulsion de Dirac. On voit que la RRA_2 générée réagit rapidement par un pic comme le montre la Figure III.10.b.

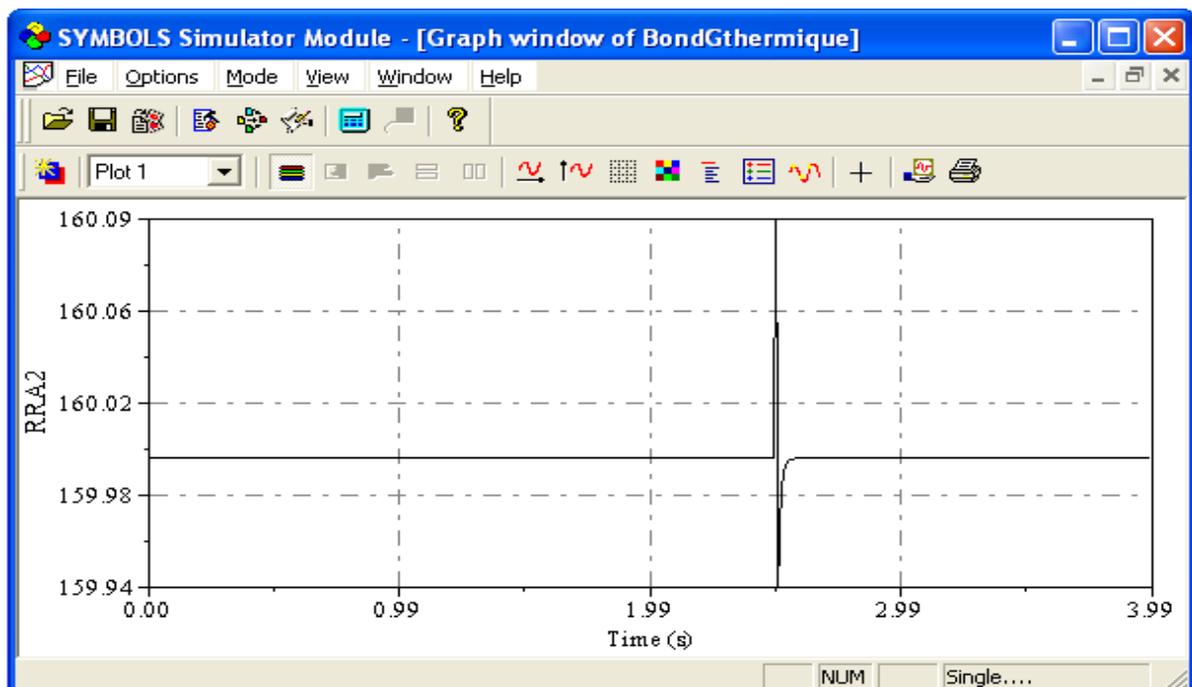


Figure III.10.b Réponse de la RRA_2 à la défaillance du capteur de température

III.3.3. Sensibilité du résidu RRA_3 à la défaillance du capteur de flux molaire:

On intègre l'expression du résidu RRA_3 dans le modèle bond graph correspondant au phénomène chimique pour obtenir le diagramme bloc suivant (Figure III.11).

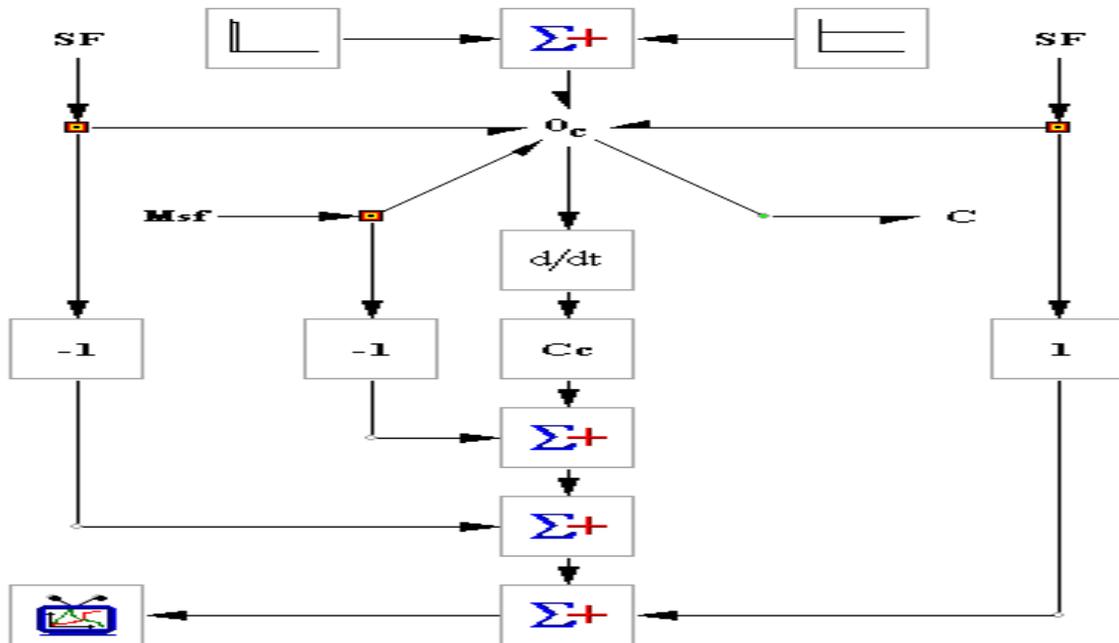


Figure III.11 Diagramme bloc du phénomène chimique

Au début, on fait la simulation sans défaillance, la courbe obtenue est une constante en fonction du temps (Figure III.12.a), ce qui confirme le fonctionnement normal du processus.

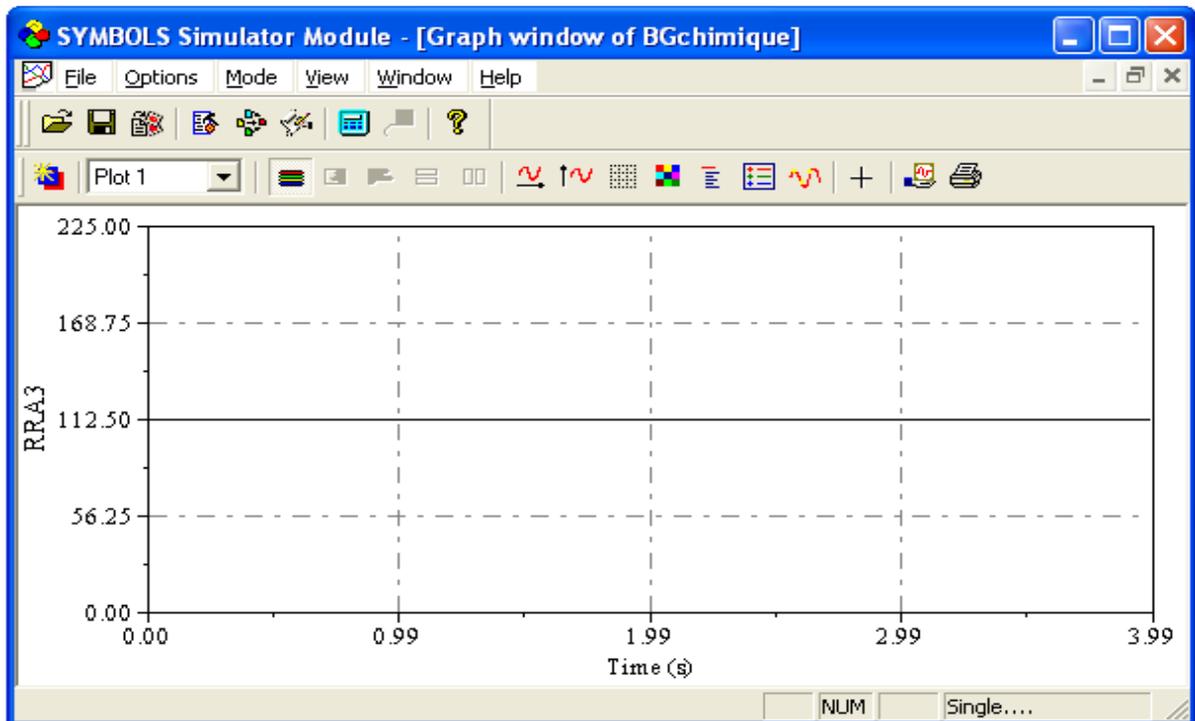


Figure III.12.a Réponse de la RRA3 sans défaillance

On crée un défaut entre le temps $t_1=3.5$ (s) et $t_2=3.51$ (s) par l'annulation de la valeur du débit molaire. On voit que la RRA_3 générée réagit par un pic comme le montre la Figure III.12. b.

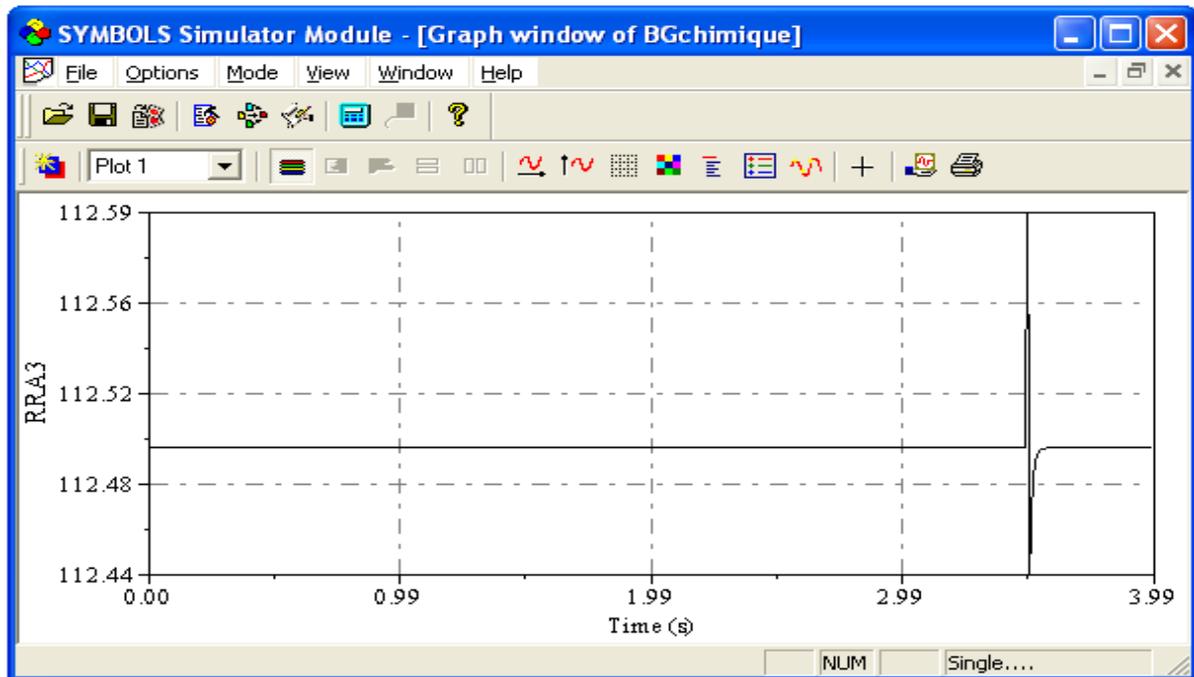


Figure III.12.b Réponse de la RRA_3 à la défaillance.

III.4 Conclusion

La détection et la localisation de défaillances dans le rebouilleur de la colonne de distillation s'est avérée simple à réaliser. La nécessité d'utiliser trois capteurs est due aux trois phénomènes qui se déroulent à l'intérieur du rebouilleur. Le comportement de ce processus est non linéaire dû à l'interaction mutuelle de phénomènes de natures différentes. On a résolu le problème par la séparation des trois phénomènes : hydraulique, thermique et chimique, la facilité et l'efficacité de la séparation pour la détection et la localisation des défauts apparaissent nettement à chaque phénomène.

L'utilisation des relations de structure des jonctions nous a permis de générer les relations de redondance analytique comme indicateurs de défaillance. Des simulations sont faites à l'aide du logiciel SYMBOLS pour montrer l'efficacité de la technique de surveillance choisie pour assurer la détection et la localisation des défauts dans les capteurs et actionneurs. Dans la partie suivante nous allons réaliser la surveillance du condenseur de la colonne.

Détection et localisation des défauts composants dans le condenseur

IV.1. Introduction

Afin que les pannes puissent être traitées le plus rapidement possible, deux types d'informations sont à fournir à l'opérateur de supervision. La première information concerne le niveau *FDI* (Fault Detection and Isolation), qui consiste à détecter et isoler les défaillances qui peuvent survenir sur l'installation afin de pouvoir diagnostiquer précisément l'origine des pannes. Le deuxième niveau concerne la commande tolérante aux fautes *FTC* (Fault Tolerant Control). Cette étape indique les moyens de continuer à conduire le processus en présence de défaillances. La mise en œuvre de cette étape permet la reconfiguration du système ou la mise en œuvre de lois de commande tolérantes aux fautes. [29], [30]

IV.2. Description du processus

IV.2.1. Condenseur

Le condenseur est un appareil d'échange thermique qui a pour rôle d'engendrer le flux liquide et il permet principalement de transformer la vapeur en liquide. Son rôle secondaire est de refroidir le flux de vapeur en le faisant changer d'état, il est donc un échangeur-condenseur.

Ces deux rôles sont thermodynamiquement liés c'est-à-dire lors de la transformation vapeur-liquide, la vapeur se refroidit forcément, et lorsque l'on refroidit suffisamment la vapeur, elle se transforme en liquide. [23], [25], [26]

IV.2.2. Présentation du condenseur

Le condenseur est un module de quatre entrées-sorties «entrée vapeur, sortie liquide, entrée-sortie du fluide de refroidissement ». Il est composé d'un circuit de refroidissement constitué d'un ensemble de tubes qui conduisent le liquide dit de refroidissement, par exemple l'eau. Le

liquide de refroidissement entre froid, accumule la chaleur en passant dans la vapeur puis sort chaud. Selon l'élévation de la température on distingue deux circuits de refroidissement :

- Si l'élévation est peu importante, le liquide de refroidissement fonctionne en boucle fermée, il se refroidit grâce aux pertes thermiques lors de son retour à l'entrée du condenseur, le circuit est dit court.
- Si l'élévation est plus importante, les pertes thermiques ne suffisent plus, il est donc préférable de refroidir le liquide par un aéroréfrigérant, le circuit est dit long.

Quand le flux de vapeur arrive et passe dans le condenseur, un contact s'obtient entre cette vapeur et les tubes du circuit de refroidissement dans lequel circule le fluide de refroidissement froid et la vapeur se condense en fines gouttelettes qui se forment au fond du condenseur, c'est ce qu'on appelle le condensât [23], [25], [26].

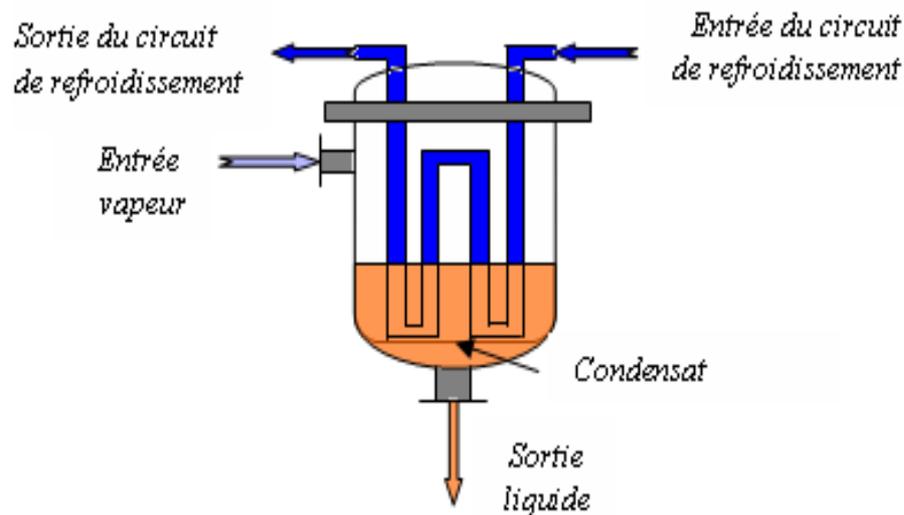


Figure IV.1 Schéma d'un condenseur

IV.2.3. Fonctionnement du condenseur d'une colonne de distillation

La vapeur en circulation dans la colonne provient pour une partie de l'alimentation quand elle est vaporisée et surtout du rebouilleur dans lequel le mélange liquide du début est chauffé pour le revaporiser.

Les vapeurs qui arrivent dans la ligne de tête de la colonne sont condensées soit totalement par un condenseur total, soit partiellement par un condenseur partiel.

Lorsque la vapeur arrive en contact des tubes de refroidissement dans lesquels circule le liquide de refroidissement froid, elle se condense en liquide qui s'écoule vers le bas par simple gravité et recueille au fond du condenseur et forme le condensât (c'est le distillat dans le cas d'une colonne) [23], [25], [26].

Une partie du liquide obtenu est renvoyée généralement dans la colonne sous le nom de reflux par une tubulaire de reflux qui joue le rôle d'une tubulaire d'alimentation, amorçant le flux liquide.

L'autre partie est recueillie comme un distillat et la partie non vaporisée de l'alimentation vient également contribuer au débit liquide. L'opération se répète, en assurant la condensation des vapeurs de la tête de la colonne.

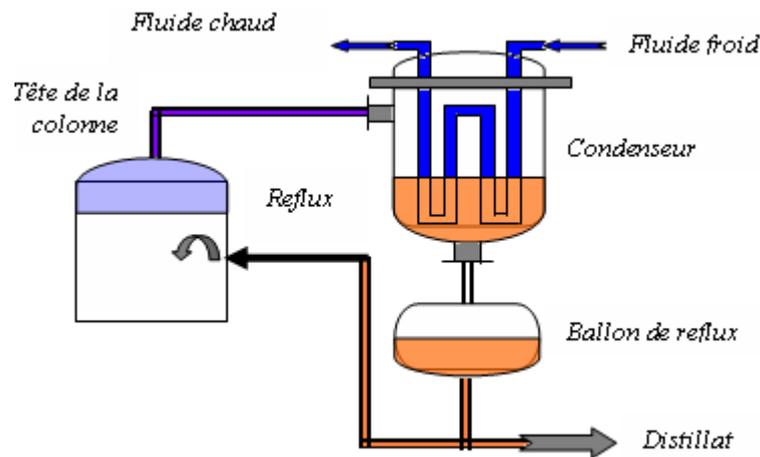


Figure IV.2 Fonctionnement du condenseur dans une colonne

IV.2.4. Bond graph à mots

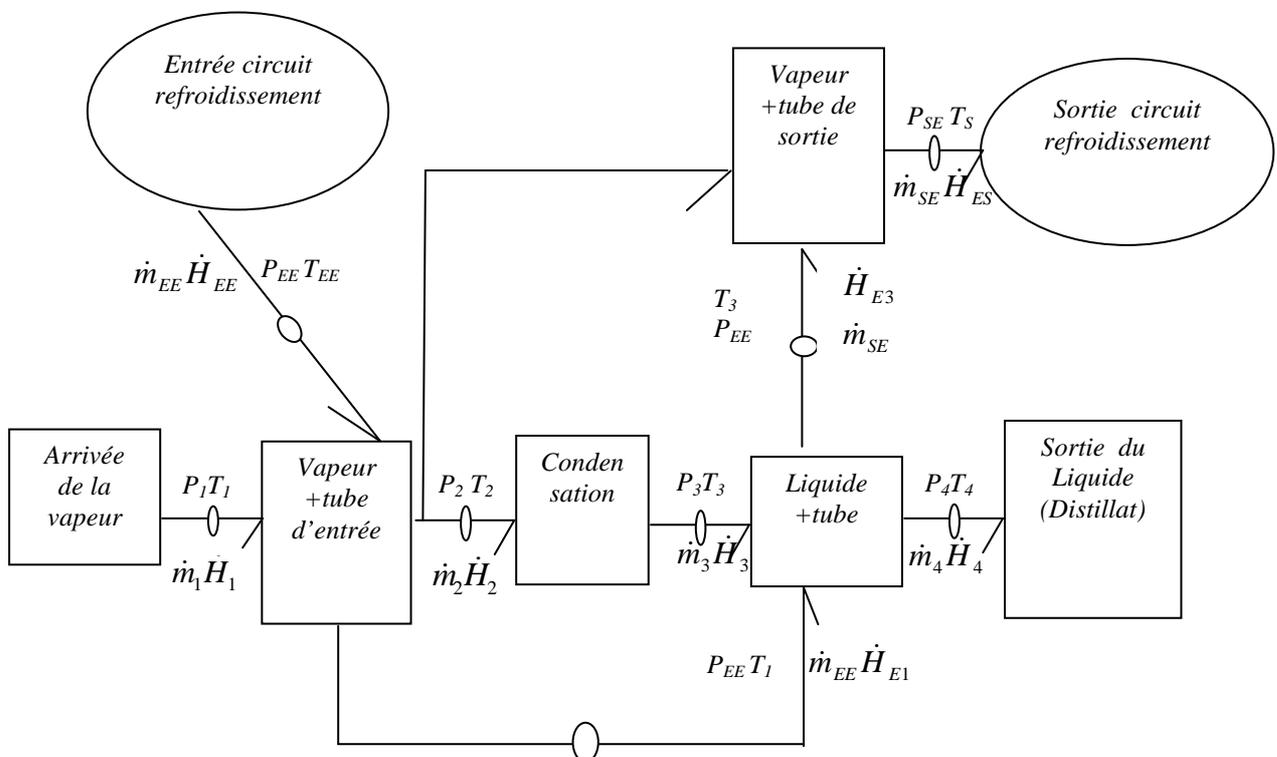


Figure IV.3 Bond Graph à mots d'un condenseur

IV.2.5. Modèle Bond Graph d'un condenseur

Le modèle Bond Graph d'un condenseur d'une colonne de distillation avec le placement des capteurs (détecteurs d'effort, détecteurs de flux) est représenté par la figure suivante [5], [6] :

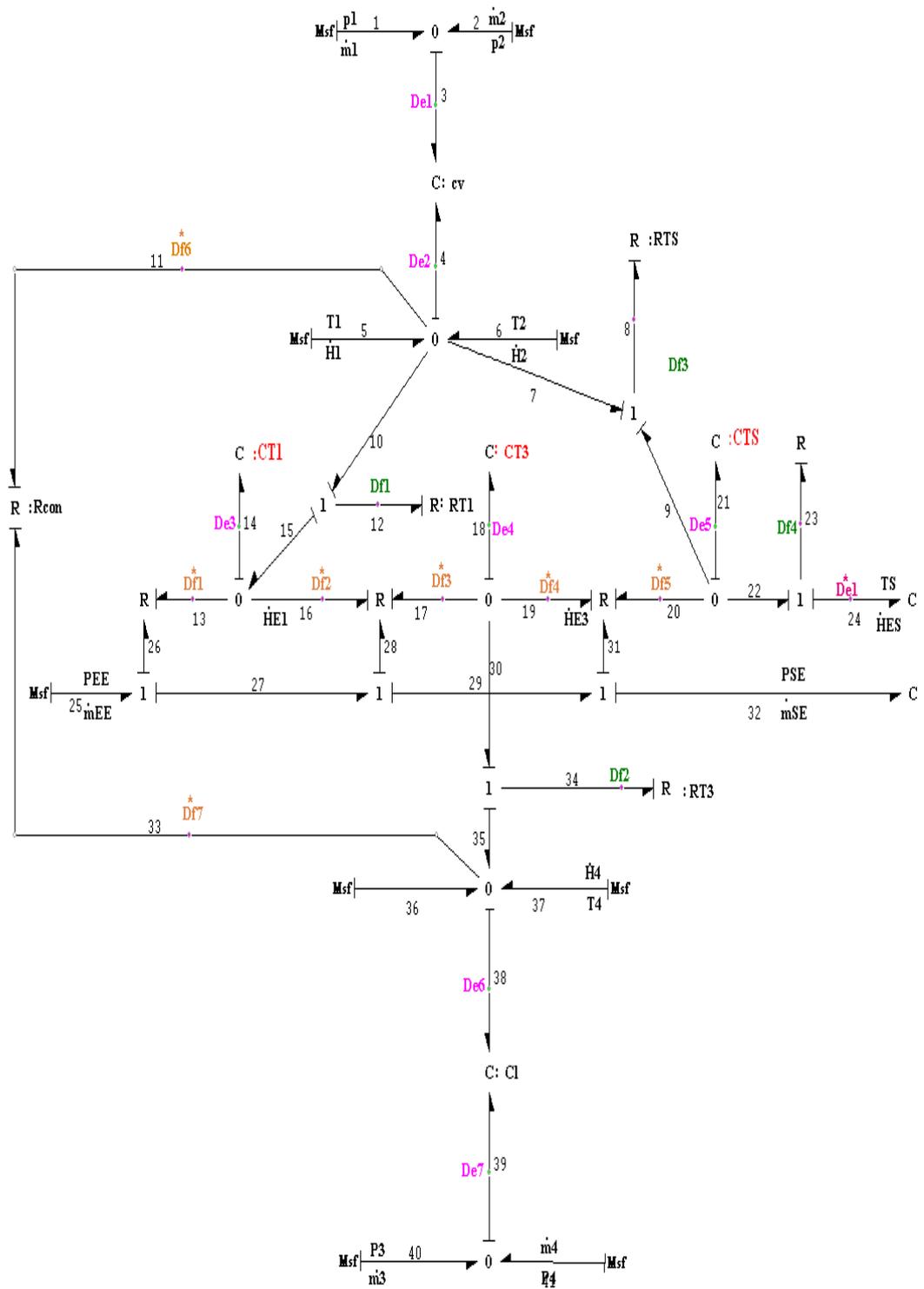


Figure IV.4 Modèle Bond Graph du condenseur

Le système est composé des éléments suivants : CV (capacité de la vapeur), CL (capacité du liquide), CT1(capacité du tube d'entrée 1), RT1 (vanne dans le tube 1), CT3 (capacité du tube 3), RT3 (vanne dans le tube 3), CTS (capacité du tube de sortie), RTS (vanne dans le tube de sortie) et R (détente de refroidissement) [13].

Les équations de structure des jonctions :

Jonction 0₁ :

$$\begin{cases} e_1 = e_2 = e_3 \\ f_3 - f_1 - f_2 = 0 \\ f_1 = sf_1, f_2 = sf_2 \\ f_{CV} = f_3 = \phi_{CV} [s\{(1-x_1)e_3 + x_1De_1\}] \\ e_{CV} = e_3 = \frac{1}{s}(1-x_1)\phi_{CV}^{-1}(f_3) + x_1De_1 \end{cases} \quad (IV.1)$$

Jonctions 0₂ :

$$\begin{cases} e_6 = e_4 = e_5 = e_7 = e_{10} = e_{11} \\ f_4 - f_5 - f_6 + f_7 + f_{10} + f_{11} = 0 \\ f_{CV} = f_4 = \phi_{CV} [s\{(1-x_2)e_4 + x_2De_2\}] \\ e_{CV} = e_4 = \frac{1}{s}(1-x_1)\phi_{CV}^{-1}(f_4) + x_2De_2 \end{cases} \quad (IV.2)$$

Jonction 0₃ :

$$\begin{cases} e_{13} = e_{14} = e_{15} = e_{16} \\ f_{14} + f_{15} + f_{16} + f_{13} = 0 \\ f_{CT1} = f_{14} = \phi_{CT1} [s\{(1-x_3)e_{14} + x_3De_3\}] \\ e_{CT1} = e_{14} = \frac{1}{s}(1-x_3)\phi_{CT1}^{-1}(f_{14}) + x_3De_3 \end{cases} \quad (IV.3)$$

Jonction 0₄ :

$$\begin{cases} e_{17} = e_{18} = e_{19} = e_{30} \\ f_{17} + f_{18} + f_{19} + f_{30} = 0 \\ f_{CT3} = f_{18} = \phi_{CT3} [s\{(1-x_4)e_{18} + x_4De_4\}] \\ e_{CT3} = e_{18} = \frac{1}{s}(1-x_4)\phi_{CT3}^{-1}(f_{18}) + x_4De_4 \end{cases} \quad (IV.4)$$

Jonction 0₅ :

$$\begin{cases} e_{20} = e_{21} = e_{22} = e_9 \\ f_{20} + f_{21} + f_{22} + f_9 = 0 \\ f_{CTS} = f_{21} = \phi_{CTS} [s\{(1-x_5)e_{21} + x_5De_5\}] \\ e_{CTS} = e_{21} = \frac{1}{s}(1-x_5)\phi_{CTS}^{-1}(f_{21}) + x_5De_5 \end{cases} \quad (IV.5)$$

Jonction 0₆ :

$$\begin{cases} e_{35} = e_{36} = e_{37} = e_{38} = e_{33} \\ f_{38} - f_{36} + f_{35} - f_{37} + f_{33} = 0 \\ f_{Cl} = f_{38} = \phi_{Cl} [s\{(1-x_6)e_{38} + x_6De_{38}\}] \\ e_{Cl} = e_{38} = \frac{1}{s}(1-x_6)\phi_{Cl}^{-1}(f_{38}) + x_6De_6 \end{cases} \quad (IV.6)$$

Jonction 0₇ :

$$\begin{cases} e_{39} = e_{40} = e_{41} \\ f_{39} - f_{40} - f_{41} = 0 \\ f_{Cl} = f_{39} = \phi_{Cl} [s\{(1-x_7)e_{39} + x_7De_{39}\}] \\ e_{Cl} = e_{39} = \frac{1}{s}(1-x_7)\phi_{Cl}^{-1}(f_{39}) + x_7De_7 \end{cases} \quad (IV.7)$$

Jonction 1₁ :

$$\begin{cases} f_{10} = f_{12} = f_{15} \\ e_{12} - e_{10} - e_{15} = 0 \\ e_{12} = \phi_{RT1} [(1-y_1)f_{12} + y_1Df_1] \\ f_{12} = f_{RT1} = (1-y_1)\phi_{RT1}^{-1}e_{12} + y_1Df_1 \end{cases} \quad (IV.8)$$

Jonction 1₂ :

$$\begin{cases} f_{30} = f_{34} = f_{35} \\ e_{34} - e_{30} - e_{35} = 0 \\ e_{34} = \phi_{RT3} [(1-y_2)f_{34} + y_2Df_2] \\ f_{34} = f_{RT3} = (1-y_2)\phi_{RT3}^{-1}e_{34} + y_2Df_2 \end{cases} \quad (IV.9)$$

Jonction 1₃ :

$$\begin{cases} f_7 = f_8 = f_9 \\ e_8 - e_7 - e_9 = 0 \\ e_8 = \phi_{RTS} [(1-y_3)f_8 + y_3Df_3] \\ f_8 = f_{RTS} = (1-y_3)\phi_{RTS}^{-1}e_8 + y_3Df_3 \end{cases} \quad (IV.10)$$

Jonction 1₄ :

$$\begin{cases} f_{22} = f_{23} = f_{24} \\ e_{23} - e_{22} + e_{24} = 0 \\ e_{23} = \phi_R [(1-y_4)f_{23} + y_4Df_4] \\ f_{23} = f_R = (1-y_4)\phi_R^{-1}e_{23} + y_4Df_4 \end{cases} \quad (IV.11)$$

A partir des équations précédentes, on obtient le système (IV.12) qui comporte les variables connues $K = \{De_i, Df_j, Sf_j\}$ et les variables inconnues $X = \{e_i, f_j\}$:

$$\begin{aligned}
\phi_{CV} [s\{(1-x_1)e_3 + x_1De_1\}] - Sf_1 - Sf_2 &= 0 \\
\phi_{RT1} [(1-y_1)f_{12} + y_1Df_1] - \left[\frac{1}{s}(1-x_2)\phi_{CV}^{-1}f_4 + x_2De_2 \right] - \left[\frac{1}{s}(1-x_3)\phi_{CT1}^{-1}f_{14} \right] - x_3De_3 &= 0 \\
\phi_{CV} [s(1-x_2)e_4 + x_2De_2] - [(1-y_3)\phi_{RT3}^{-1}e_8 + y_3Df_3] - [(1-y_1)\phi_{RT1}^{-1}e_{12} + y_1Df_1] - Df_7 &= 0 \\
\phi_{RT3} [(1-y_2)f_{34} + y_2Df_2] - \left[\frac{1}{s}(1-x_4)\phi_{CT3}^{-1}f_{18} + x_4De_4 \right] - \left[\frac{1}{s}(1-x_6)\phi_{CL}^{-1}f_{38} \right] - x_6De_6 &= 0 \\
\phi_{CT1} [s(1-x_3)e_{14} + x_3De_3] - [(1-y_1)\phi_{RT1}^{-1}e_{12} + y_1Df_1] + Df_1 + Df_2 &= 0 \quad (IV.12) \\
\phi_{RTS} [(1-y_3)f_8 + y_3Df_3] - \left[\frac{1}{s}(1-x_2)\phi_{CV}^{-1}f_4 + x_2De_2 \right] - \left[\frac{1}{s}(1-x_5)\phi_{CTS}^{-1}f_{21} + x_5De_5 \right] &= 0 \\
\phi_{CT3} [s(1-x_4)e_{18} + x_4De_4] + [(1-y_2)\phi_{RT3}^{-1}e_{34} + y_2Df_2] + Df_3 + Df_4 &= 0 \\
\phi_R [(1-y_4)f_{23} + y_4Df_4] - \left[\frac{1}{s}(1-x_5)\phi_{CTS}^{-1}f_{21} + x_5De_5 \right] + De_1 &= 0 \\
\phi_{CTS} [s(1-x_5)e_{21} + x_5De_5] + [(1-y_4)\phi_R^{-1}e_{23} + y_4Df_4] + Df_5 + [(1-y_3)\phi_{RT3}^{-1}e_8 + y_3Df_3] &= 0 \\
\phi_{CL} [s(1-x_6)e_{38} + x_6De_6] + [(1-y_2)\phi_{RT3}^{-1}e_{34} + y_2Df_2] + Df_5 - Sf_{36} - Sf_{37} &= 0 \\
\phi_{CL} [s(1-x_7)e_{39} + x_7De_7] - Sf_{40} - Sf_{41} &= 0
\end{aligned}$$

Le système d'équations ci-dessus permet selon les variables booléennes x_i et y_j de déterminer la structure finale du système à surveiller. $x_i = y_j = 1$ lorsqu'on place un détecteur, autrement $x_i = y_j = 0$.

IV.3. Relations de redondance analytique des résidus

Lorsqu'on place partout des détecteurs la surveillance du processus est évidente, alors on procède par élimination des détecteurs jusqu'à l'obtention du cas optimal et ceci en validant à chaque étape par la table de signature de fautes. La détection sera assurée si le vecteur-colonne de la table de signature de fautes est non nul et la localisation sera assurée pour des vecteur-colonnes différents dans toute la table [39], [40].

IV.3.1. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [1101111110]$

Les résidus sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 R_1 &= -sf_1 - sf_2 + \phi_{CV} [SDe_1] \\
 R_2 &= \phi_{RT1} [Df_1] - \frac{1}{s} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_1 - Df_3 - Df_6^* \right) \\
 R_3 &= \phi_{RT3} [Df_2] - De_4 - De_6 \\
 R_4 &= \phi_{CT1} [SDe_3] + Df_1 + Df_1^* + Df_2^* \\
 R_5 &= \phi_{RTS} [Df_3] - \frac{1}{s} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_1 - Df_3 - Df_6^* \right) - De_5 \\
 R_6 &= \phi_{CT3} [SDe_4] + Df_2 + Df_3^* - Df_4^* \\
 R_7 &= \phi_R [Df_4] - De_5 + De_1^* \\
 R_8 &= \phi_{CTS} [SDe_5] + Df_3 + Df_4 - Df_5^* \\
 R_9 &= -sf_{36} - sf_{37} + \phi_{CL} [SDe_6] + Df_2 + Df_7^*
 \end{aligned} \tag{IV.13}$$

La table de structures des résidus (lignes) ou de signatures de fautes (colonnes) est :

	CV	CL	CT1	RT1	CT3	RT3	CTS	RTS	R
R1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R4	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R5	1	0	0	0	0	0	0	1	0
R6	0	0	0	0	1	0	0	0	0
R6	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R8	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R9	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Tableau IV.1 Signature de fautes pour 9 détecteurs placés

- On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles. Donc les composants CV, CL, CT1, RT1, CT3, RT3, CTS, RTS et R sont surveillables.
- La question qui se pose alors, peut-on surveiller ce modèle avec huit détecteurs et quelle serait la combinaison qui assure cette propriété ?

IV.3.2. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [01101111110]$

Les résidus sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 R1 &= \phi_{RT1}[Df] - [SDe] - [SDe_3] \\
 R2 &= \phi_{CV}[SDe_2] - [Df_3] - [Df_1] - sf_5 - sf_6 \\
 R3 &= \phi_{CT1}[SDe_3] + Df_1 + Df_1^* + Df_2^* \\
 R4 &= \phi_{RTS}[Df_3] - De_2 - De_5 \\
 R5 &= \phi_{CT3}(SDe_4) + \phi_{RT3}(De_4 + De_6) + Df_3^* + Df_4^* \\
 R6 &= \phi_R(Df_4) - De_5 + De_1 \\
 R7 &= \phi_{CTS}(SDe_5) + Df_3 + Df_4 \\
 R8 &= \phi_{CL}(SDe_6) + \phi_{RT3}(De_4 + De_6) + Df_7^* - sf_{36} - sf_{37}
 \end{aligned} \tag{IV.14}$$

La table des structures des résidus est :

	CV	CL	CT1	RT1	CT3	RT3	CTS	RTS	R
R1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
R2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
R3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R5	0	0	0	0	0	1	0	0	0
R6	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R8	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tableau IV.2 Signatures de fautes pour 8 détecteurs placés

- On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles la détection et localisation sont toutes les deux assurées donc les composants CV, CL, CT1, RT1, CT3, RT3, CTS, RTS et R sont surveillables.
- La question qui se pose alors, peut-on surveiller ce modèle avec sept détecteurs et quelle serait la combinaison qui assure cette propriété ?

IV.3.3. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [0010111110]$

Les résidus sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 R_1 &= -sf_5 - sf_6 + \phi_{CV} [SDe_1] - \phi_{RT1}^{-1} [De_2 + De_3] - Df_7^* \\
 R_2 &= \phi_{CT1} [SDe_3] + \phi_{RT1}^{-1} [De_2 + De_3] + Df_1^* + Df_2^* \\
 R_3 &= \phi_{RTS} [Df_3] + De_2 - De_5 \\
 R_4 &= \phi_{CT3} [SDe_4] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_3^* + Df_4^* \\
 R_5 &= \phi_R [Df_4] - De_5 + De_1 \\
 R_6 &= \phi_{CTS} [SDe_5] + Df_3 + Df_4 + Df_5^* \\
 R_7 &= -sf_{36} - sf_{37} + \phi_{CL} [SDe_6] + \phi_{RT3}^{-1} [De_4 + De_6] + Df_7^*
 \end{aligned} \tag{IV.15}$$

La table des structures des résidus est :

	CV	CL	CT1	RT1	CT3	RT3	CTS	RTS	R
R1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R2	0	0	1	1	0	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	0	0	1	0
R4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R6	0	0	0	0	0	0	1	0	0
R7	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tableau IV.3 Signatures de fautes pour 7 détecteurs placés

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulle. Donc les composants CV, CL, CT1, RT1, CT3, RT3, CTS, RTS et R sont surveillables.

La question qui se pose alors, peut-on surveiller ce modèle avec six capteurs et quelle serait la combinaison qui assure cette propriété ?

IV.3.4. Pour la combinaison $[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, x_6, x_7] = [01001111010]$

Les résidus sont donnés par :

$$\begin{aligned}
R1 &= \phi_{RT1}(Df_1) - \left[\frac{1}{S} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_6^* - Df_1 - Df_3 \right) \right] - (De_3) \\
R2 &= \phi_{CT1}(SDe_3) + Df_1 + Df_1^* + Df_2^* \\
R3 &= \phi_{RTS}(Df_3) - \left[\frac{1}{S} \phi_{CV}^{-1} \left(sf_5 + sf_6 - Df_6^* - Df_1 - Df_3 \right) \right] - \left[\frac{1}{S} \phi_{CTS}^{-1} \left(Df_4 - Df_3 - Df_5^* \right) \right] \\
R4 &= \phi_{CT3}(SDe_3) + Df_1 + Df_1^* + Df_2^* \\
R5 &= \phi_R(Df_4) - \left[\frac{1}{S} \phi_{CTS}^{-1} \left(-Df_4 - Df_3 - Df_5^* \right) \right] + De_1 \\
R6 &= \phi_{CL}(SDe_6) + \phi_{RT3}^{-1}(De_4 + De_6) + Df_7 - sf_{36} - sf_{37}^*
\end{aligned} \tag{IV.16}$$

La table de structures des résidus est :

	CV	CL	CT1	RT1	CT3	RT3	CTS	RTS	R
R1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
R2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
R3	1	0	0	0	0	0	1	1	0
R4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	1	0	1
R6	0	1	0	0	0	1	0	0	0

Tableau IV.4 Signatures de fautes pour 6 détecteurs placés

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont aussi différentes et non nulles, donc les composants CV (capacité de la vapeur), CL (capacité du liquide), CT1 (capacité du tube d'entrée 1), RT1 (vanne dans le tube 1), CT3 (capacité du tube 3), RT3 (vanne dans le tube 3), CTS (capacité du tube de sortie), RTS (vanne dans le tube de sortie) et R (détente de refroidissement) sont surveillables.

Pour le placement de 5 détecteurs, toutes les combinaisons ont été vérifiées mais aucune n'a pu garantir la détection et la localisation [37], [38].

IV.4. Simulation

Pour la simulation on va procéder par des essais sur le processus représenté par le modèle du placement optimal afin de détecter les principales fautes sur les composants. En fonctionnement normal, les résidus doivent être constamment nuls. Ce n'est pas toujours le cas, car les erreurs de modélisation introduisent parfois des résidus différents de zéro [41], [42].

En bond graph et à l'aide du logiciel SYMBOLS, on associe le modèle au diagramme bloc des *RRA* puis on injecte le défaut (somme d'un échelon unitaire et d'une impulsion de Dirac)

par simulation sur le composant et on suit la sensibilité des détecteurs à travers les relations de redondance analytique.

IV.4.1. Sensibilité du détecteur Df_1

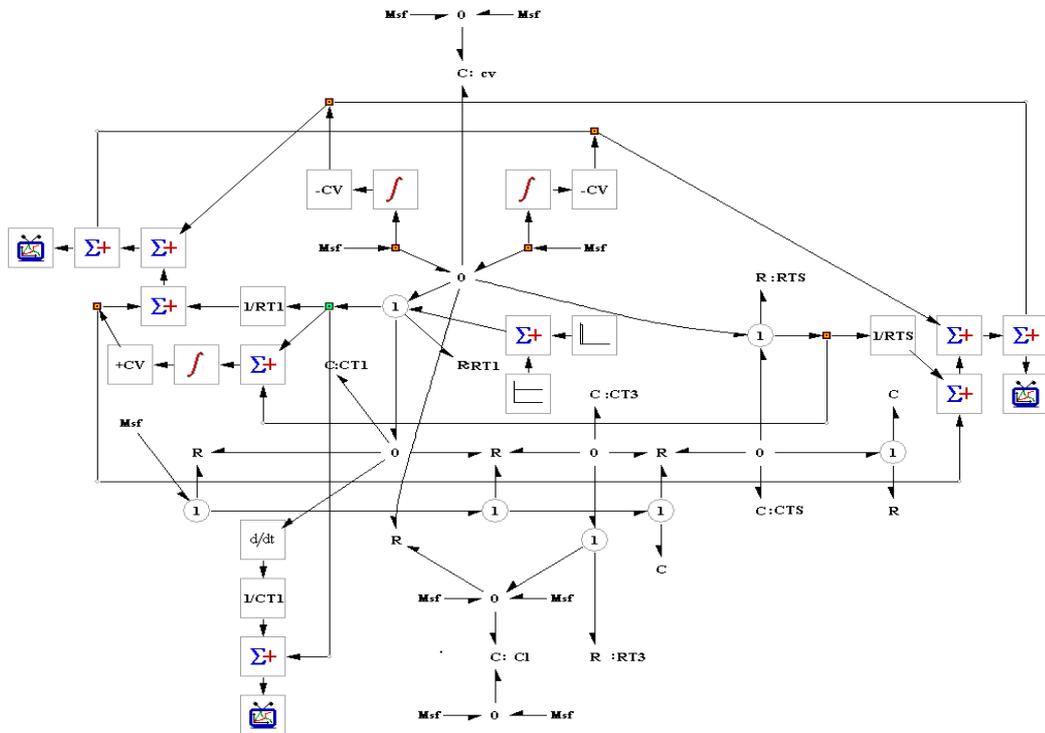


Figure IV.5 Schéma bloc de la première partie (RRA_1, RRA_2, RRA_3)

Les défaillances détectées par le détecteur Df_1 apparaissent dans les résidus RRA_1, RRA_2 et RRA_3 . Les résultats de simulation sont représentés par les figures (IV.6.a), (IV.6.b), (IV.6.c). $t_1 = 2s, t_2 = 2.01s$

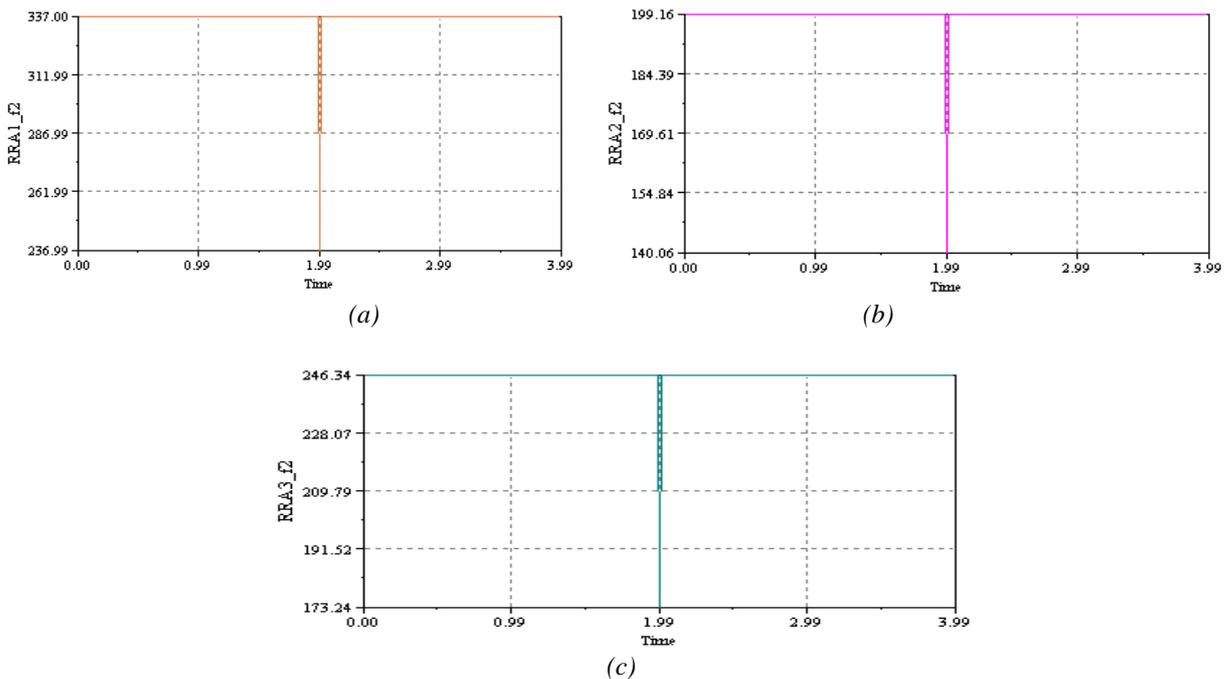


Figure IV.6 Défaut détecté par Df_1

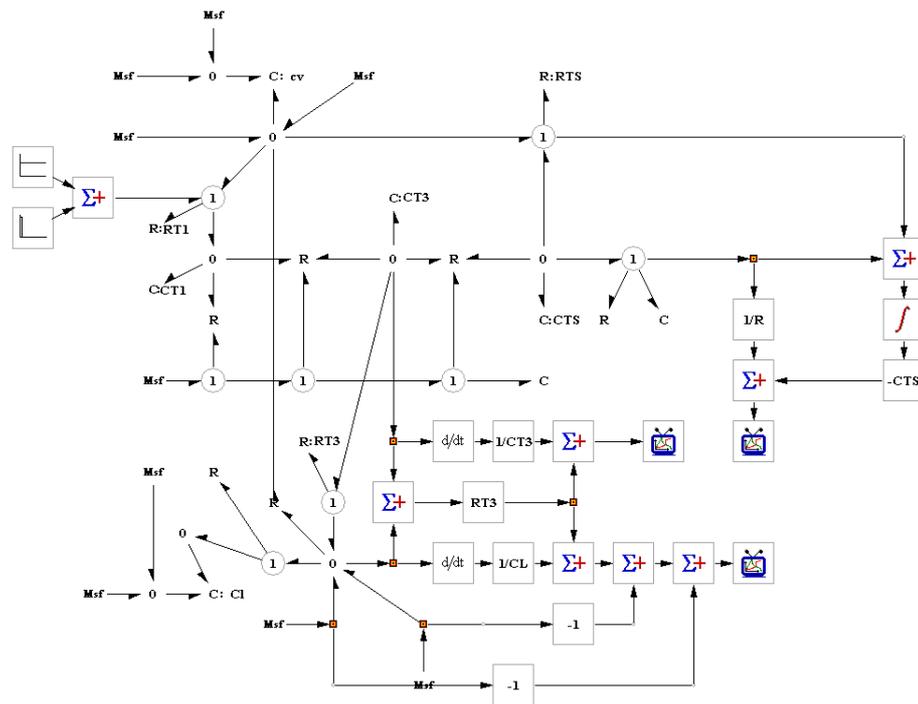


Figure IV.7 Schéma bloc de la deuxième partie (RRA_4 , RRA_5 , RRA_6)

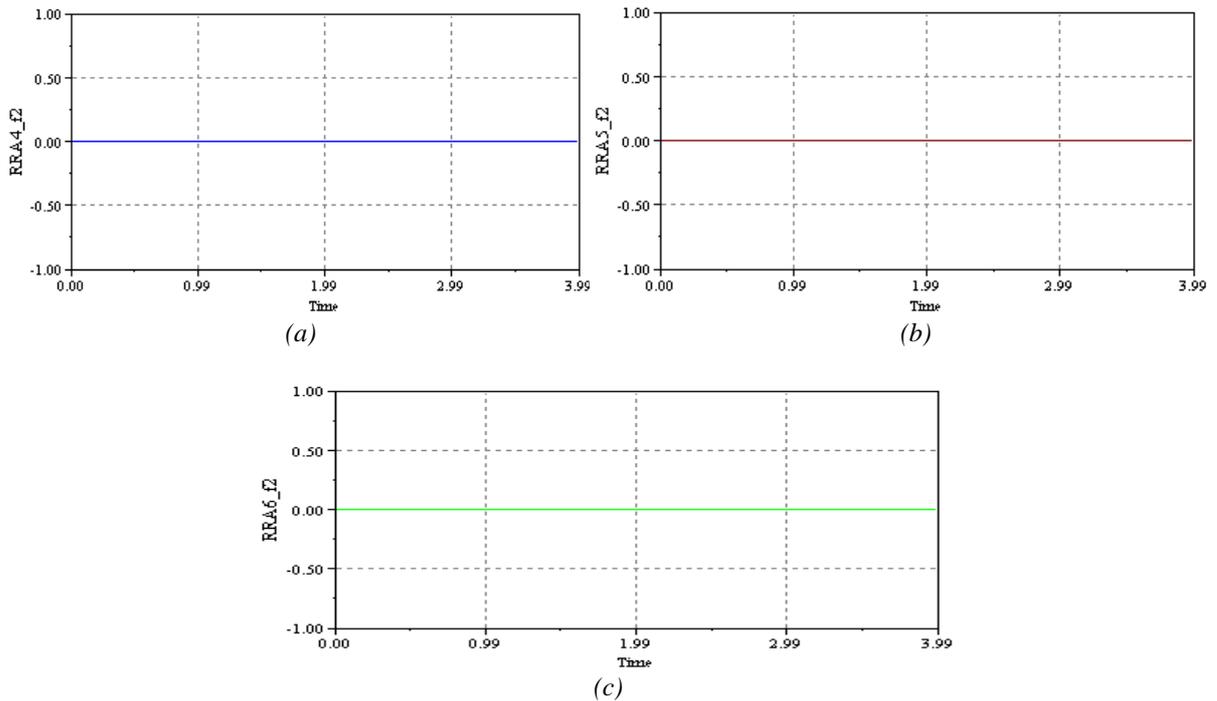


Figure IV.8 Df_1 insensible au défaut

On constate que les résidus RRA_1 , RRA_2 et RRA_3 sont sensibles au défaut injecté par simulation sur le composant RT_1 , cela est dû au fait que le détecteur Df_1 intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus RRA_4 , RRA_5 et RRA_6 sont nuls parce que le détecteur Df_1 n'apparaît pas dans leurs relations (le fonctionnement de ces résidus est normal).

IV.4.2. Sensibilité du détecteur De_3

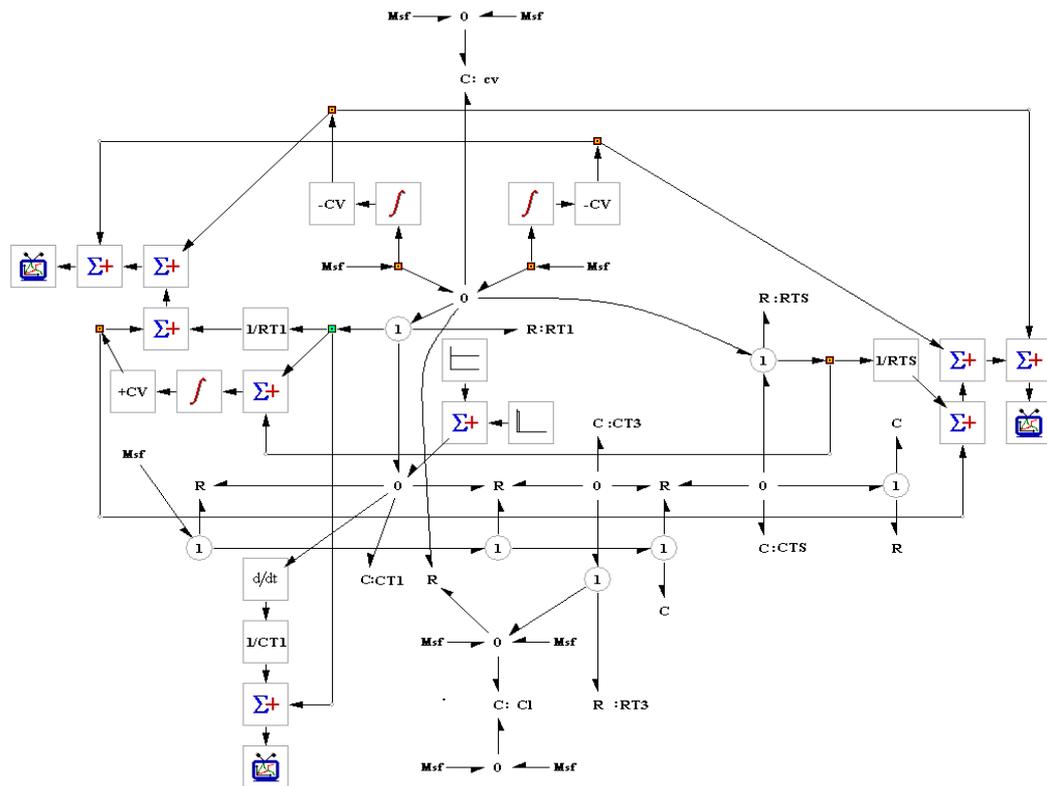


Figure IV.9 Schéma bloc de fonctionnement de la première partie

Le défaut injecté sur le composant CT_1 entre $t_1 = 3s$ et $t_2 = 3.01s$ est surveillé par le détecteur De_3 qui intervient dans les résidus RRA_1 et RRA_2 et ne l'est pas dans RRA_3 comme le montrent les figures (IV.10.a), (IV.10.b) et (IV.10.c).

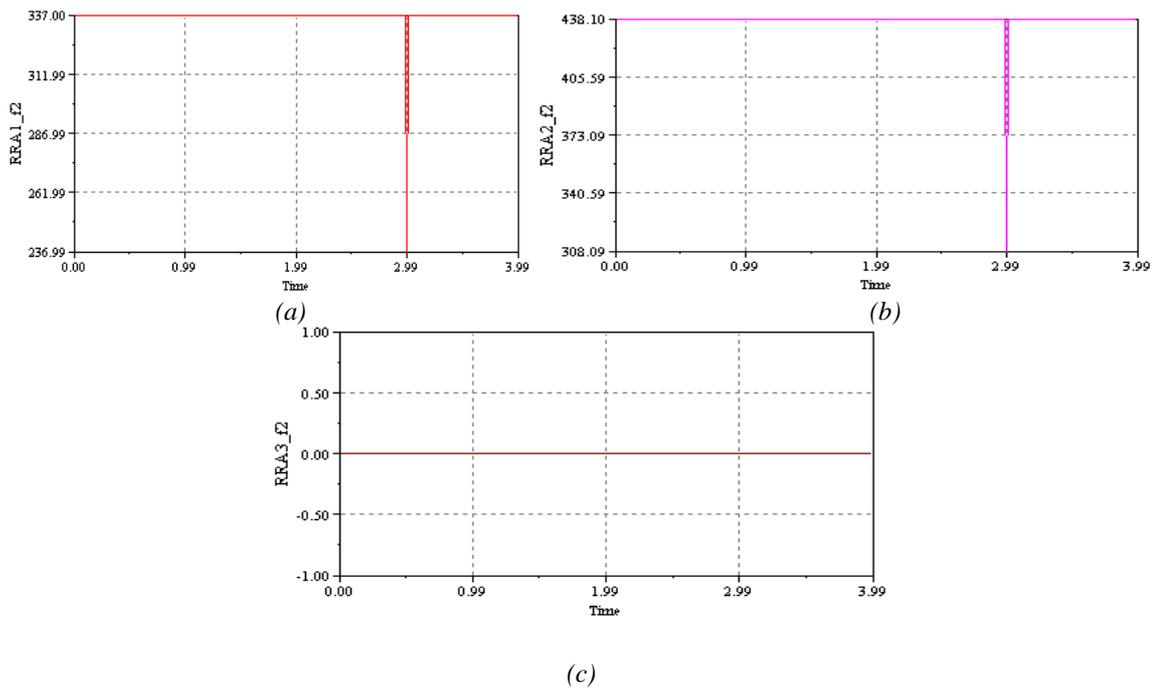


Figure IV.10 Défaut détecté par De_3

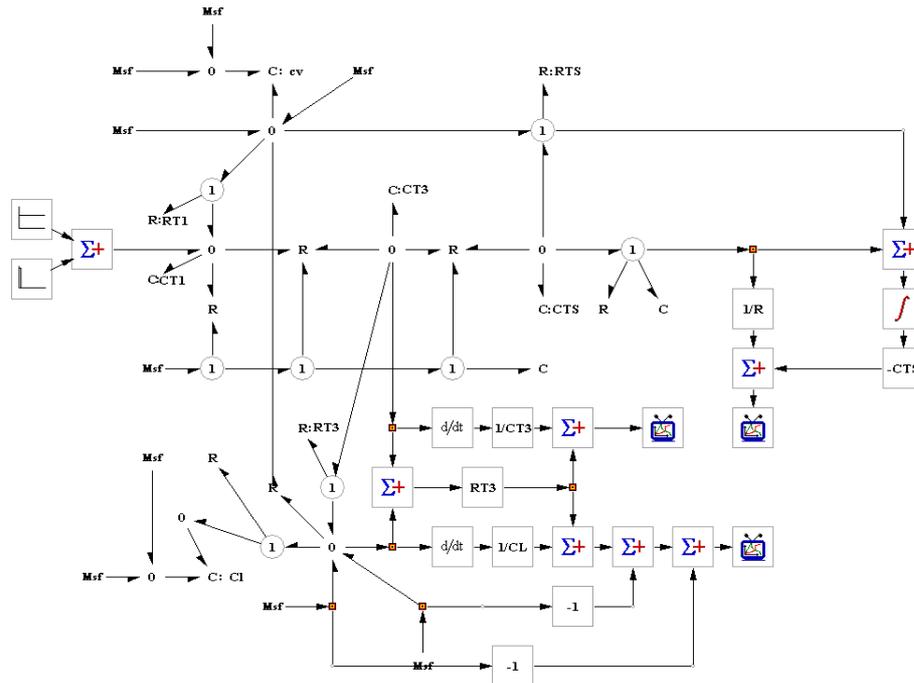


Figure IV.11 Schéma bloc de fonctionnement de la deuxième partie

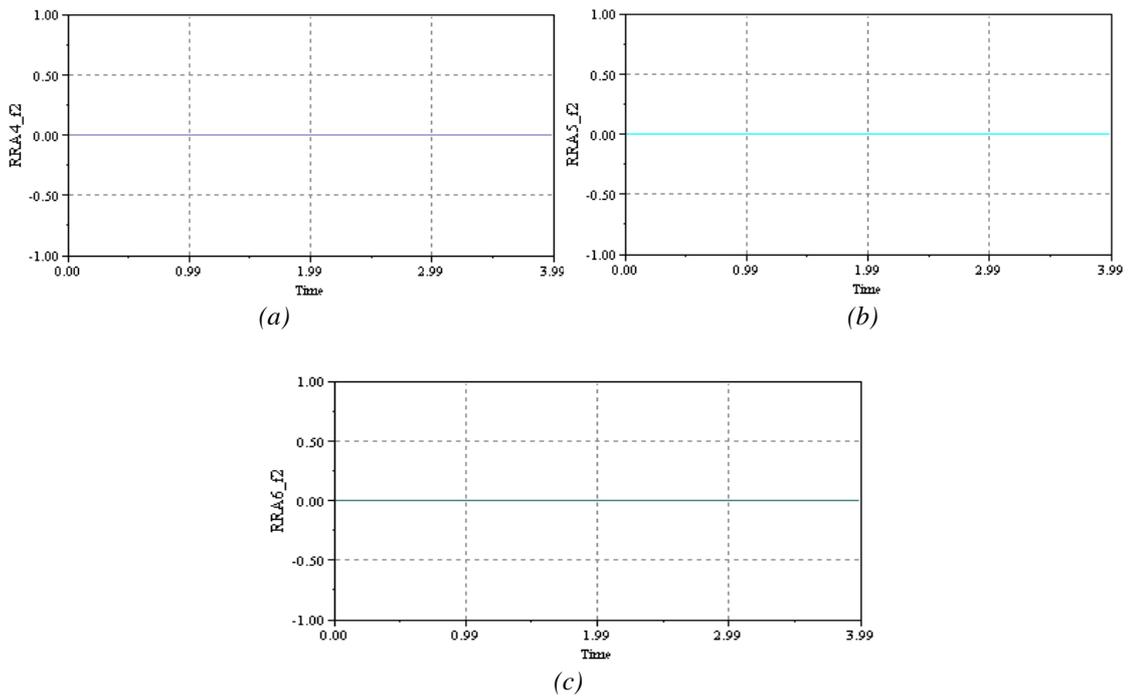


Figure IV.12 De_3 insensible au défaut de CT_1

On constate que les résidus RRA_1 et RRA_2 sont sensibles au défaut sur le composant CT_1 surveillé par le détecteur De_3 qui intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus RRA_3 , RRA_4 , RRA_5 et RRA_6 sont nuls parce que le détecteur De_3 n'apparaît pas dans leurs relations (le fonctionnement de ces résidus est normal).

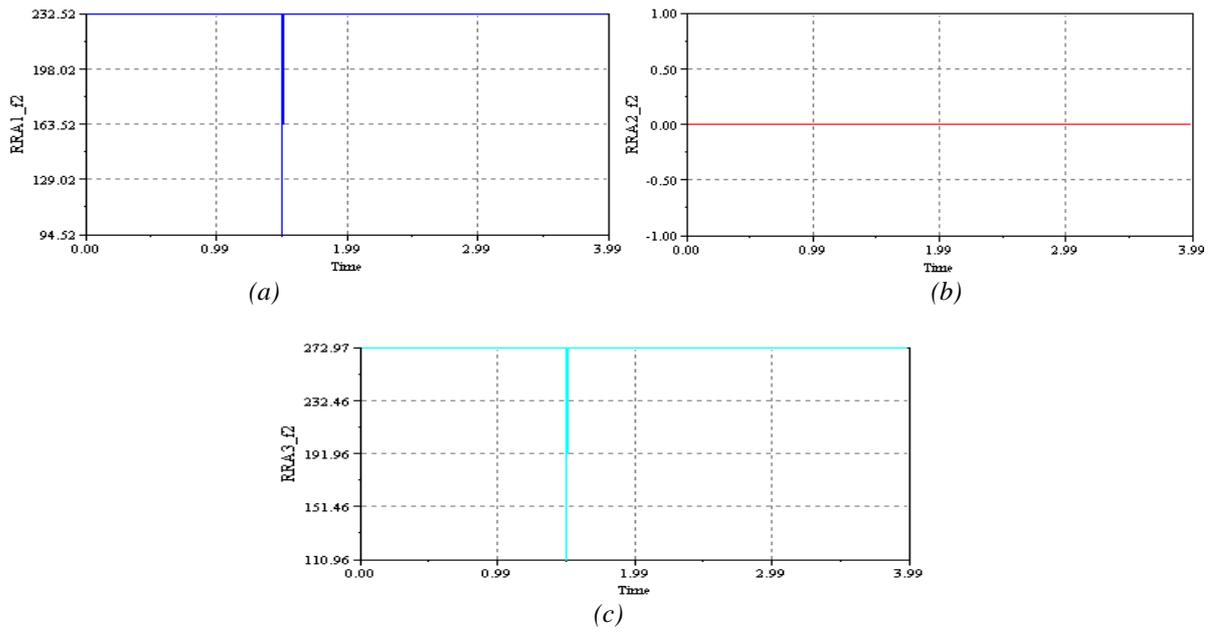


Figure IV.14 Défaut détecté par Df_3 sur RTS

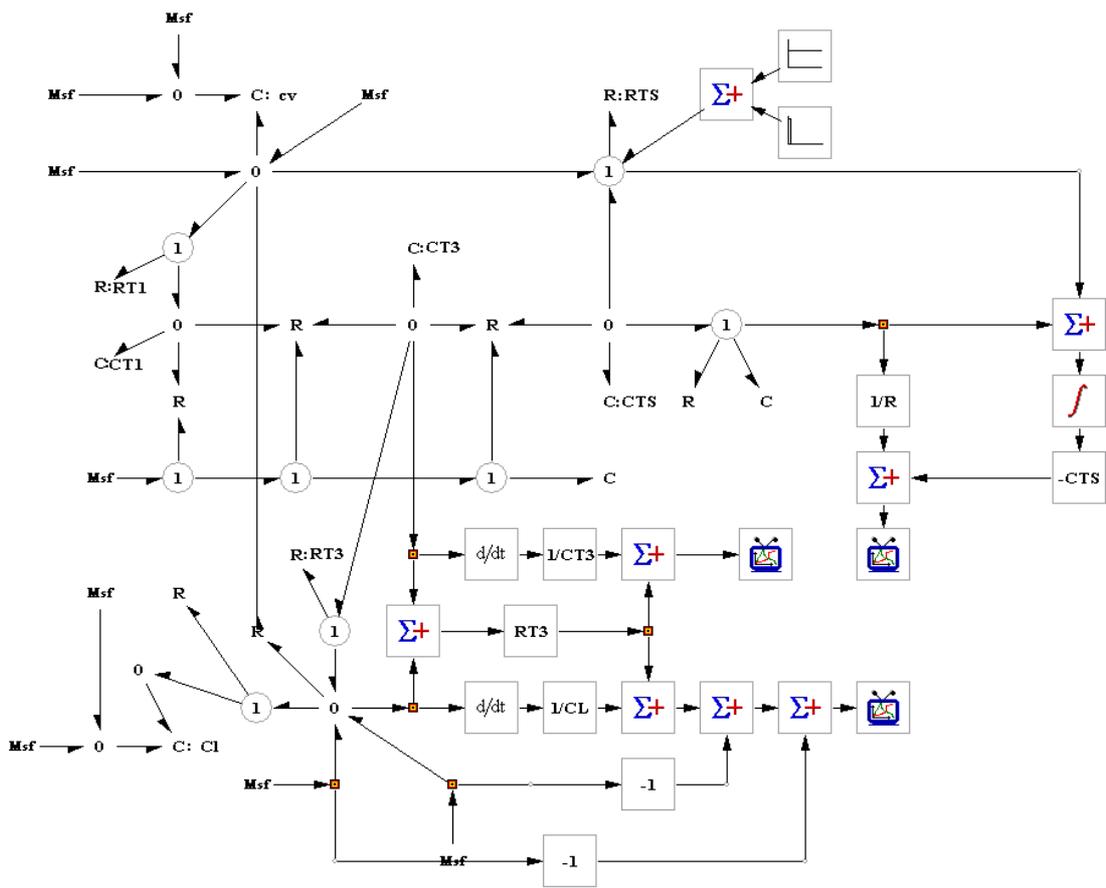


Figure IV.15 Schéma bloc de fonctionnement de la deuxième partie

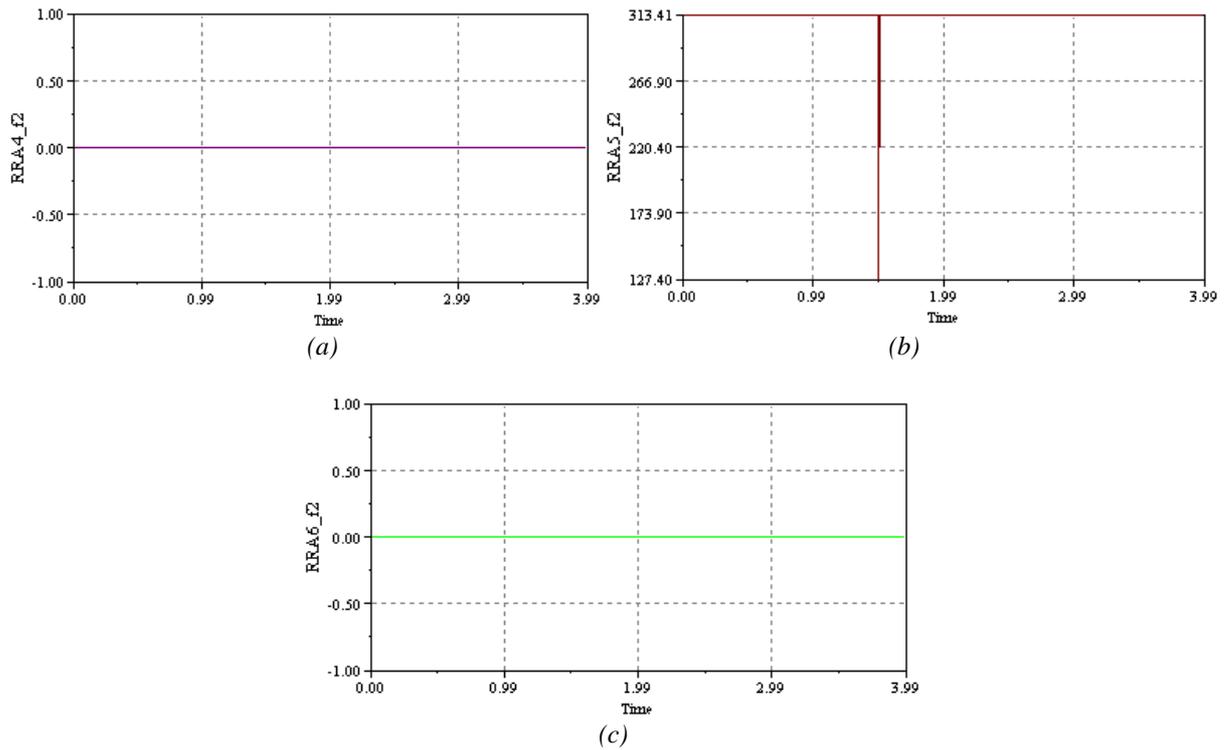


Figure IV.16 Défaut détecté par Df_3 sur RTS

IV.4.4. Sensibilité du détecteur De_4

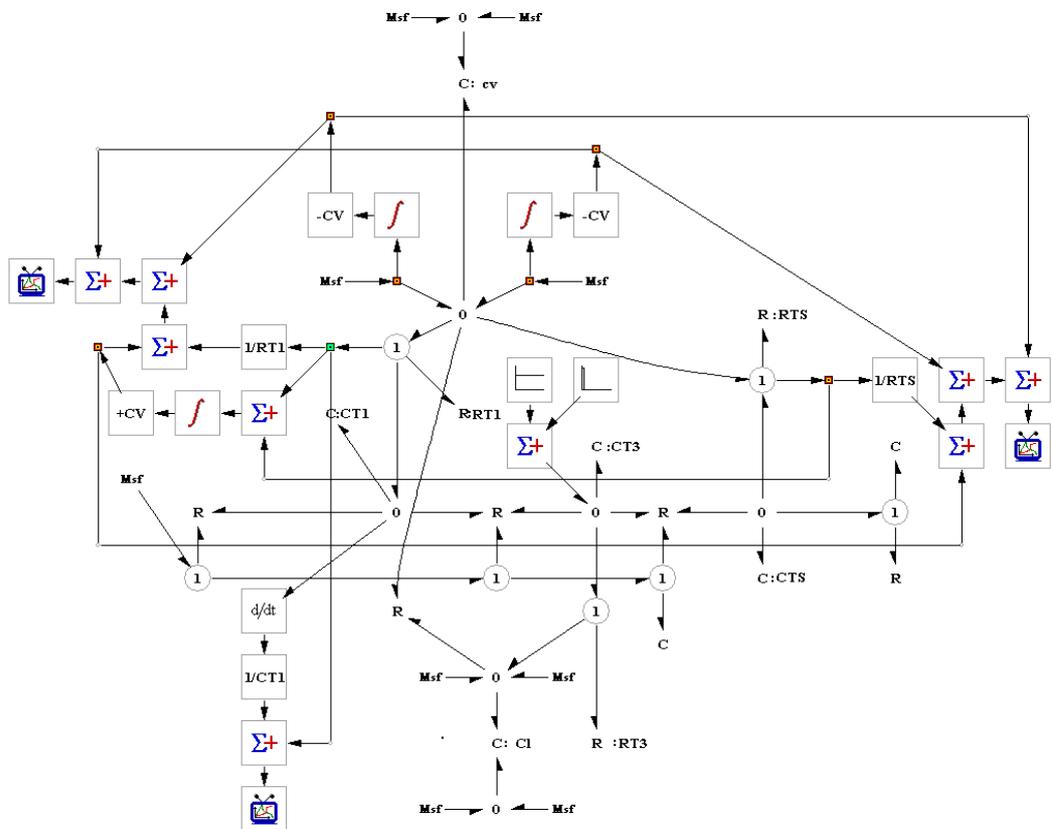


Figure IV.17 Schéma bloc de fonctionnement de la première partie

Le défaut injecté sur CT_3 entre $t_1=1.8s$ et $t_2=1.805s$ est surveillé par le détecteur De_4 qui n'intervient que dans les expressions des résidus RRA_4 et RRA_6 . Les résultats de simulation sont représentés par les figures (IV.18.a), (IV.18.b) et (IV.18.c)

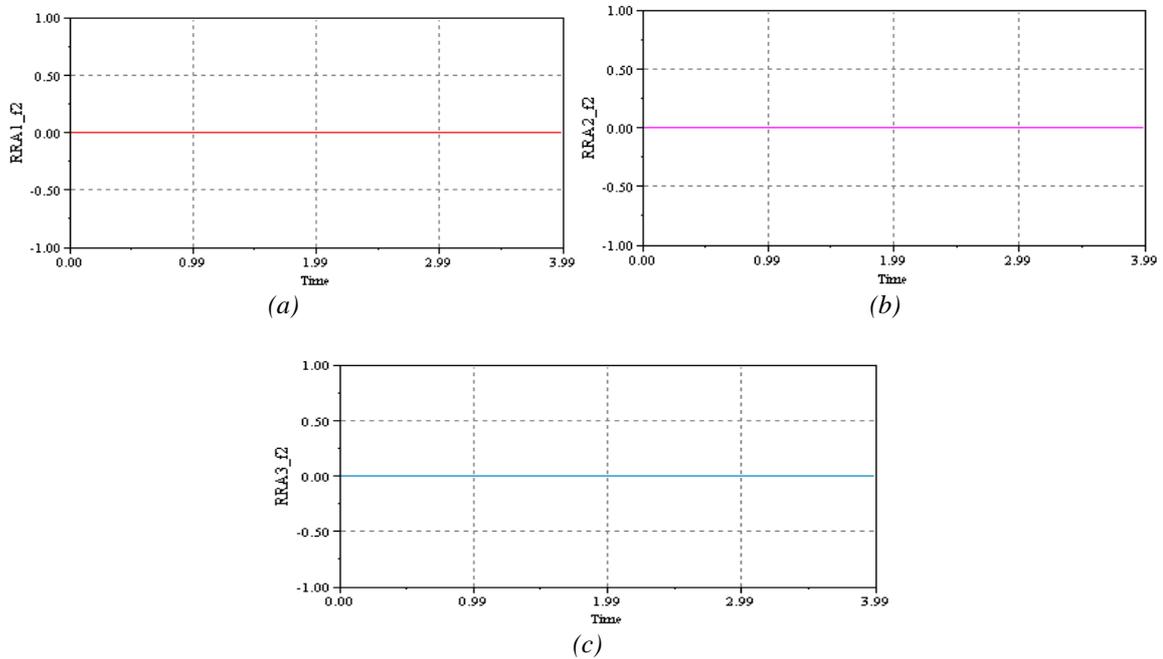


Figure IV.18 Insensibilité au défaut sur CT_3

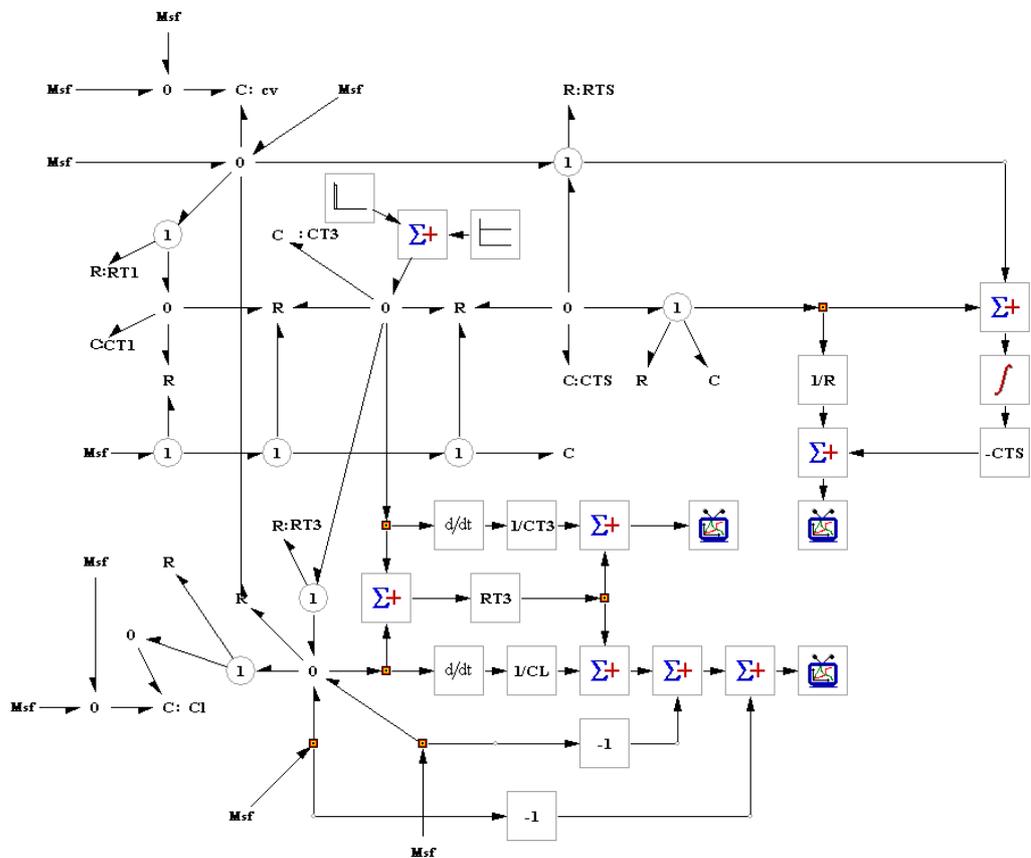


Figure IV.19 Schéma bloc de fonctionnement de la deuxième partie

Le détecteur Df_4 est sensible uniquement au défaut du composant R injecté entre les instants $t_1=1.3s$ et $t_2 =1.304s$ et qui est représenté par les résidus RRA_3 et RRA_5 . Les résultats de simulation sont représentés par les figures (IV.22.a), (IV.22.b) et (IV.22.c).

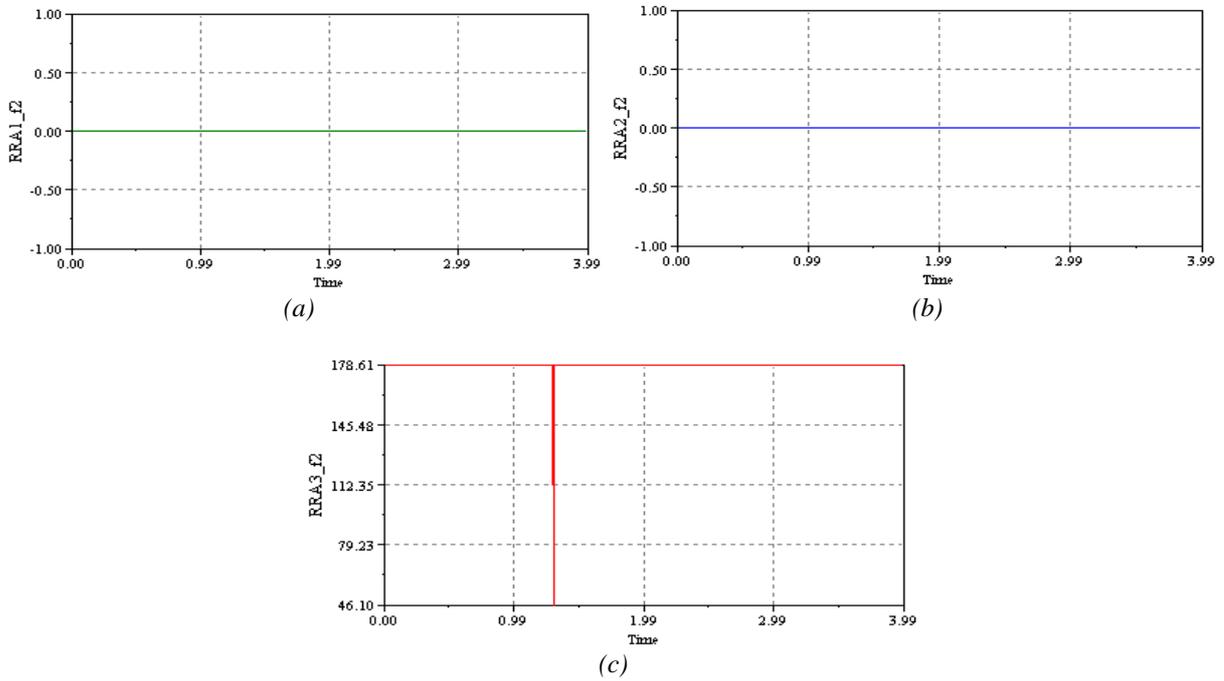


Figure IV.22 Défaut détecté par Df_4 sur R

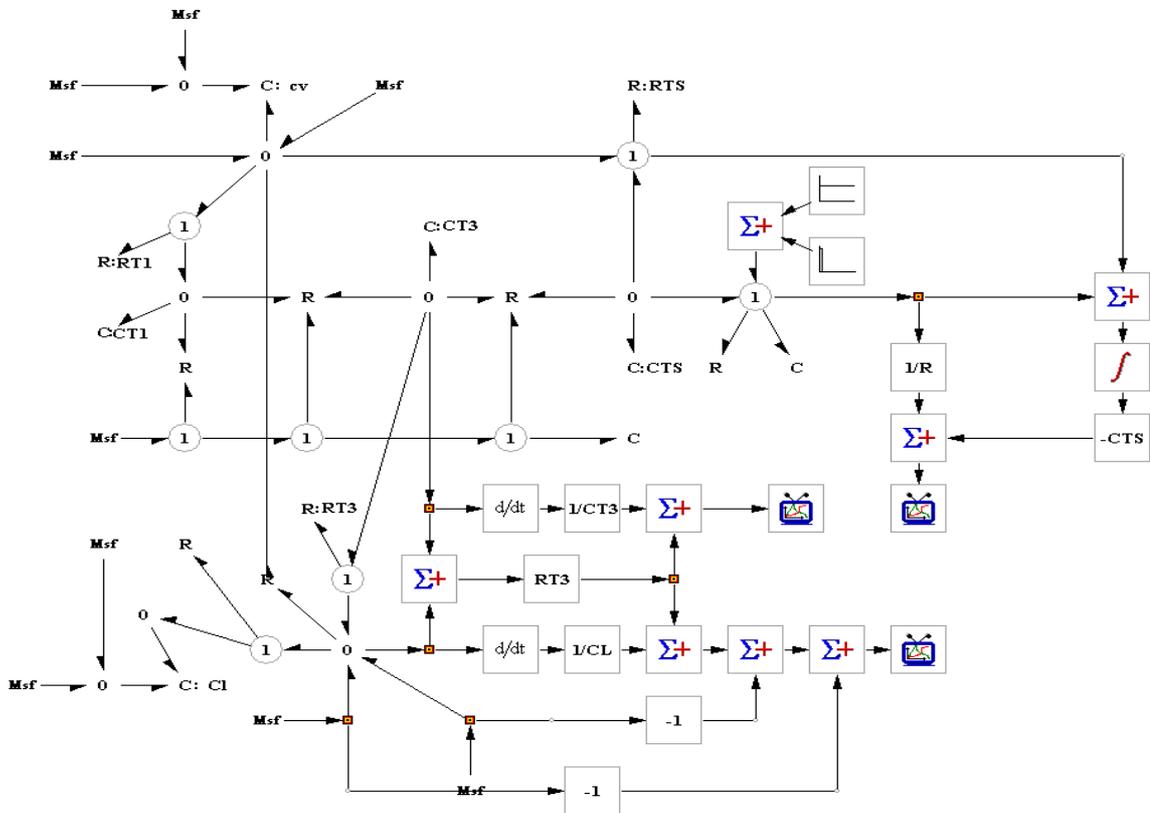


Figure IV.23 Schéma bloc de fonctionnement de la deuxième partie

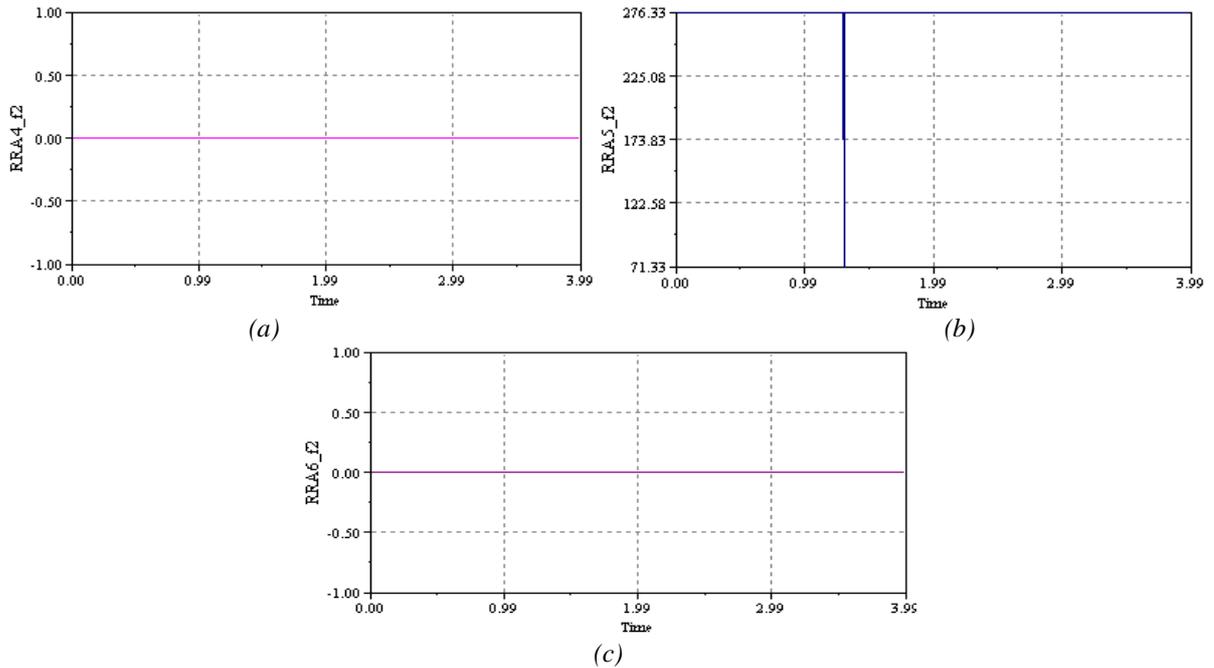


Figure IV.24 Défaut injecté sur R et détecté par Df_4

IV.4.6. Sensibilité du détecteur De_6

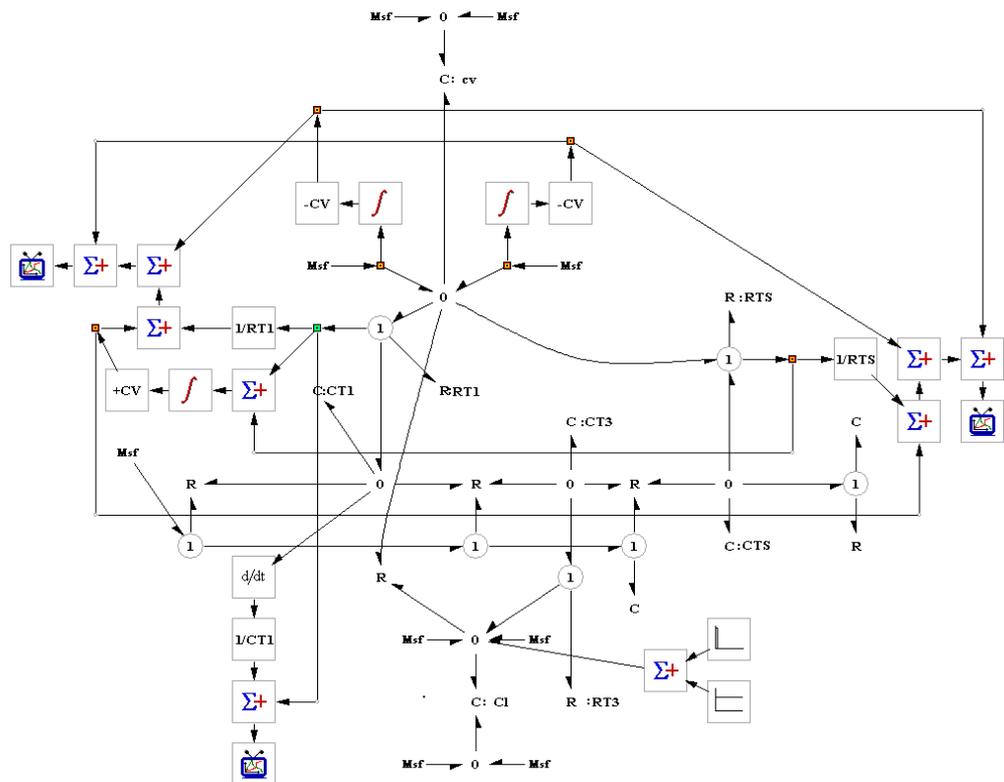


Figure IV.25 Schéma bloc de fonctionnement de la première partie

Le défaut injecté entre les instants $t_1 = 1s$ et $t_2 = 1.01s$ sur le composant CL , est surveillé par le détecteur De_6 . Celui-ci va intervenir uniquement dans les résidus RRA_4 et RRA_6 . Les résultats

de simulation confirment cette information et sont représentés par les figures (IV.26.a), (IV.26.b) et (IV.26.c).

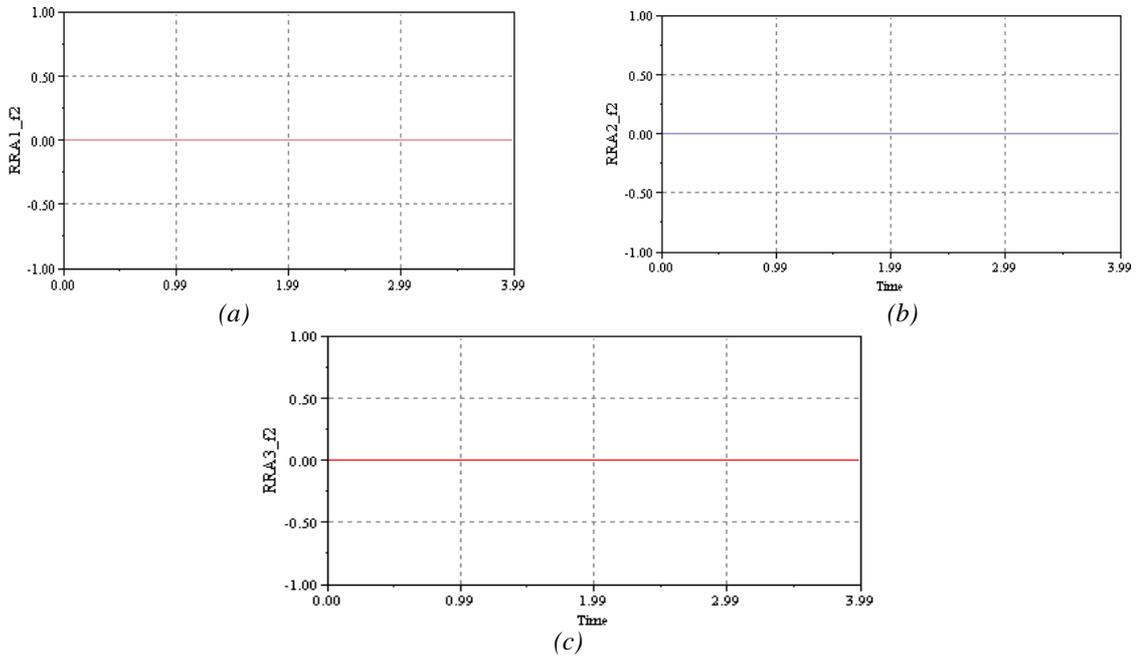


Figure IV.26 Insensibilité au défaut sur CL

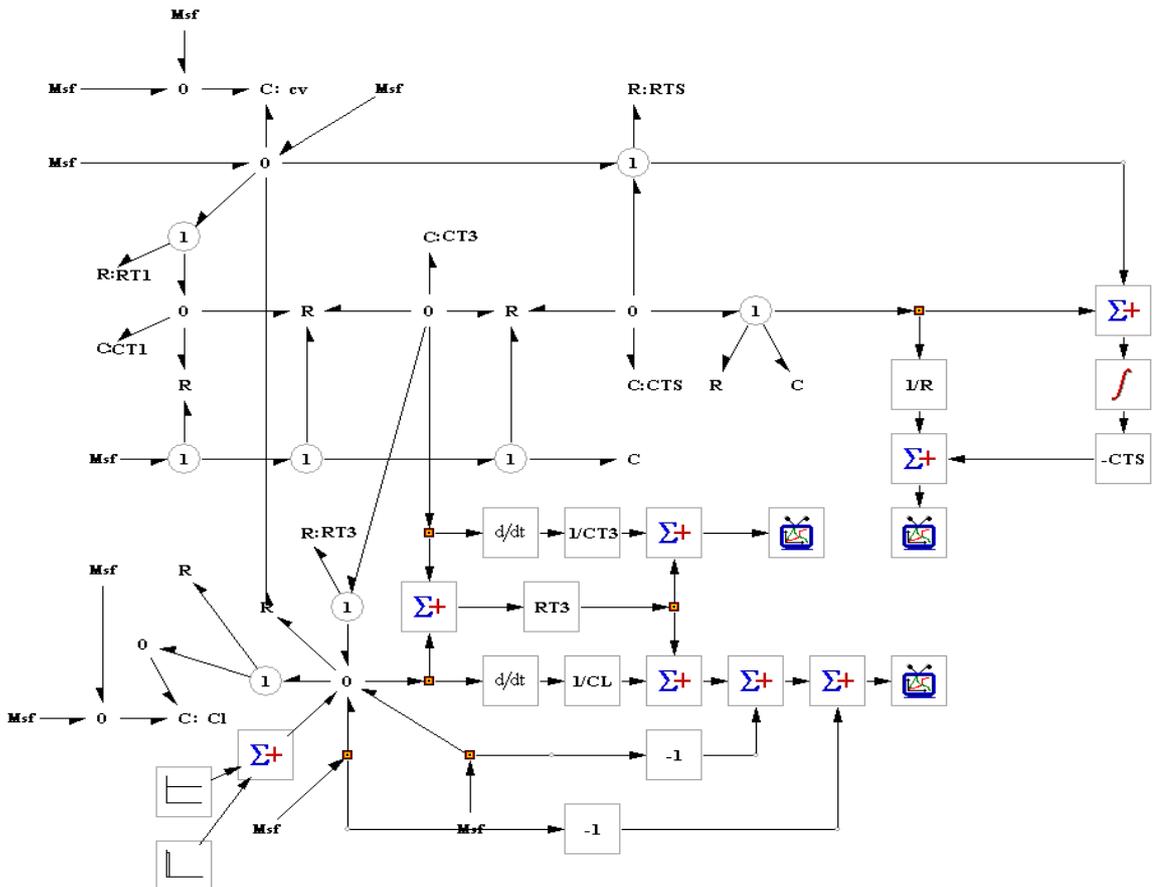


Figure IV.27 Schéma bloc de fonctionnement de la deuxième partie

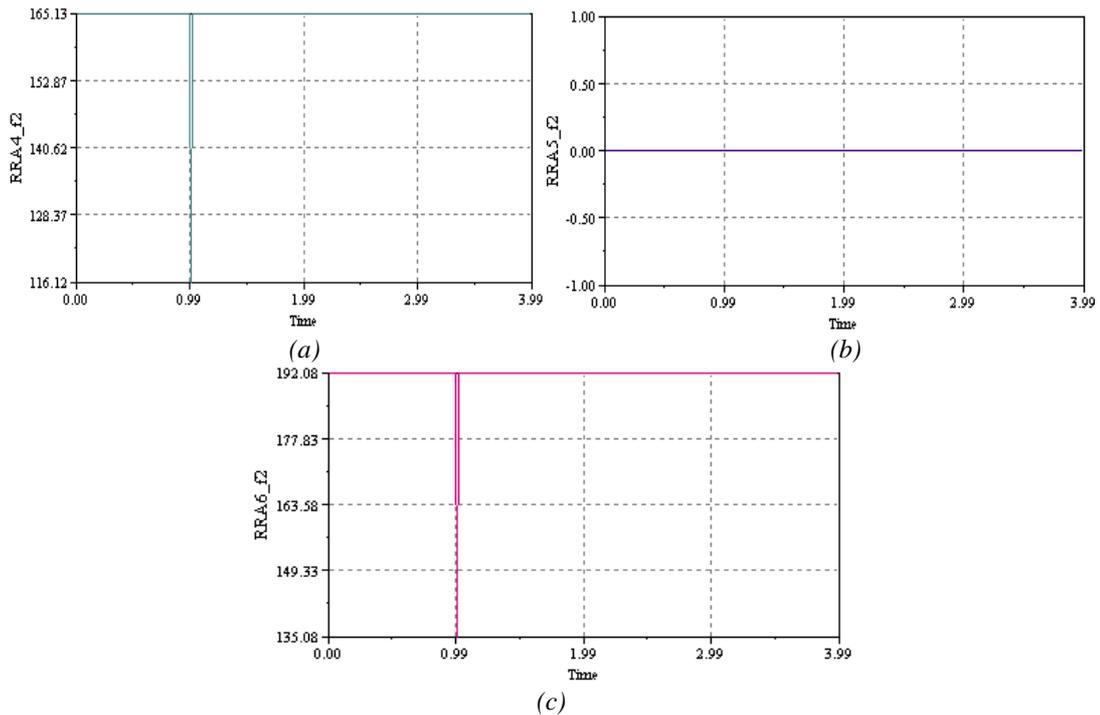


Figure IV.28 Défaut injecté sur CL et détecté par De_6

On constate que les résidus RRA_4 et RRA_6 sont sensibles au défaut de CL, cela est dû au fait que le détecteur De_6 , intervient fortement dans ces résidus, par contre les résidus RRA_1 , RRA_2 , RRA_3 et RRA_5 sont nuls parce que le détecteur n'apparaît pas dans les relations de ces résidus (le fonctionnement de ces résidus est normal).

IV.5. Conclusion

L'approche Bond Graph permet la conception des systèmes de surveillance à l'aide de sa structure graphique et causale et ceci par génération des relations de redondance analytique. A partir de ces propriétés on a pu générer et construire les résidus et suivre leur évolution dans le condenseur.

Le choix du placement de détecteurs est un problème très délicat pour la conception des systèmes de surveillance. Avec l'ajout de l'incertitude des paramètres aux valeurs des composants Bond Graph, les problèmes de la détection et la localisation des fautes ont été résolus.

Dans le chapitre suivant nous allons traiter la détection et la localisation de fautes au niveau de la virole qui contient les plateaux de la colonne de distillation.

Détection et localisation des défauts processus dans les plateaux

V.1 Introduction

Le plateau est l'élément actif de la colonne, il a pour fonction la mise en contact de la phase liquide et de la phase gazeuse de façon à amener celles-ci le plus près possible de l'état d'équilibre.

Les colonnes à plateaux ont été mises au point pour la distillation, opération dans laquelle la résistance au transfert de la matière est plus importante dans la phase vapeur que la résistance dans la phase liquide. Les plateaux sont donc conçus pour assurer une dispersion de la phase vapeur au sein du liquide. Les colonnes à plateaux sont utilisées avec un égal succès en distillation et en absorption [23], [26].

Dans les plateaux à courants croisés, la phase gazeuse ascendante traverse le liquide qui se déplace horizontalement sur le plateau. Un barrage de sortie maintient une couche de liquide sur le plateau. Le liquide s'écoule par gravité d'un plateau à l'autre par une conduite (trop-plein).

Par rapport à une description classique du processus, la localisation sur un modèle bond graph correspond à un placement physique sur les processus. Un composant est dit surveillable si et seulement si les défaillances affectant ce composant, peuvent être détectées et isolées. Deux modèles du plateau sont possibles et représentent le phénomène chimique et le phénomène hydraulique (liquide et vapeur) [32], [37].

V.2 Modèle chimique d'un plateau

Ce modèle est constitué de 5 composants : C_1 (Capacité du débit molaire du liquide), C_2 (Capacité du débit molaire de la vapeur), R_1 (Résistance du potentiel chimique du liquide), R_2 (Résistance du potentiel chimique du mélange liquide-vapeur) et R_3 (Résistance du potentiel chimique de la vapeur) [41], [42].

Ces composants sont portés respectivement sur 2 jonctions 0 : 0_{C1} et 0_{C2} et 3 jonctions 1 : 1_{R1} , 1_{R2} et 1_{R3} et alimentés par 4 sources flux - effort de deux plateaux consécutifs Sf_1, Sf_2, Se_1 et Se_2 .

La problématique est qu'on veut placer un minimum de détecteurs pour surveiller les 5 composants en supposant que les fautes ne sont pas multiples et que les actionneurs et les détecteurs ne sont pas affectés.

L'ensemble des variables connues : $C = \{Sf_1, Sf_2, Se_1, Se_2, De_1, De_2, Df_1, Df_2, Df_3\}$

L'ensemble des variables inconnues : $X = \{e_2, f_2, e_4, f_4, e_7, f_7, e_9, f_9, e_{12}, f_{12}\}$

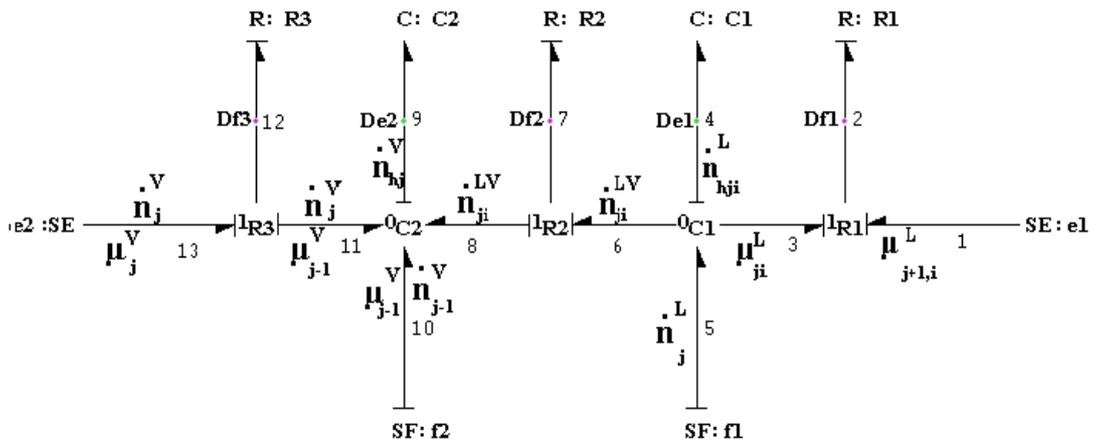


Figure V.1 Modèle bond graph du phénomène chimique avec des détecteurs virtuels

Pour ce cas, les équations aux jonctions sont données par :

Pour la jonction 0_{C1}

$$\begin{cases} f_4 = f_5 - f_6 - f_3 \text{ et } e_3 = e_4 = e_5 = e_6 \\ f_5 = Sf_1 \text{ et } f_{C1} = f_4 = \Phi_{C1} [s \{ (1-x_1)e_4 + x_1 De_1 \}] \\ e_4 = e_{C1} = \frac{1}{s} (1-x_1) \Phi_{C1}^{-1}(f_4) + x_1 De_1 \end{cases} \quad (V.1)$$

Pour la jonction 1_{R1}

$$\begin{cases} e_2 = e_3 + e_1 \text{ et } f_2 = f_3 = f_1 \\ e_1 = Se_1 \\ e_{R1} = e_2 = \Phi_{R1} [(1-y_1)f_2 + y_1 Df_1] \\ f_2 = f_{R1} = (1-y_1) \Phi_{R1}^{-1}(e_2) + y_1 Df_1 \end{cases} \quad (V.2)$$

Pour la jonction 0_{C2}

$$\begin{cases} f_9 = f_8 + f_{10} + f_{11} & \text{et } e_8 = e_9 = e_{10} = e_{11} \\ f_{10} = s f_2 \\ f_{C2} = f_9 = \Phi_{C2} [s \{(1-x_2)e_9 + x_2 D e_2\}] \\ e_9 = e_{C2} = \frac{1}{s} (1-x_2) \Phi_{C2}^{-1}(f_9) + x_2 D e_2 \end{cases} \quad (V.3)$$

Pour la jonction 1_{R2}

$$\begin{cases} e_7 = e_6 - e_8 & \text{et } f_7 = f_8 = f_6 \\ e_{R2} = e_7 = \Phi_{R2} [(1-y_2)f_7 + y_2 D f_2] \\ f_7 = f_{R2} = (1-y_2) \Phi_{R2}^{-1}(e_7) + y_2 D f_2 \end{cases} \quad (V.4)$$

Pour la jonction 1_{R3}

$$\begin{cases} e_{12} = e_{13} - e_{11} & \text{et } f_{12} = f_{13} = f_{11} \\ e_{13} = S e_2 \\ e_{R3} = e_{12} = \Phi_{R3} [(1-y_3)f_{12} + y_3 D f_3] \\ f_{12} = f_{R3} = (1-y_3) \Phi_{R3}^{-1}(e_{12}) + y_3 D f_3 \end{cases} \quad (V.5)$$

Dans ce qui suit, nous allons montrer la génération des relations de redondance à partir des équations aux jonctions suivantes :

$$\begin{aligned} S f_1 - \Phi_{C1} [s \{(1-x_1)e_4 + x_1 D e_1\}] - (1-y_1) \Phi_{R1}^{-1}(e_2) - y_1 D f_1 - (1-y_2) \Phi_{R2}^{-1}(e_7) - y_2 D f_2 &= 0 \\ (1-y_2) \Phi_{R2}^{-1}(e_7) + y_2 D f_2 - \Phi_{C2} [s \{(1-x_2)e_9 + x_2 D e_2\}] + S f_2 + (1-y_3) \Phi_{R3}^{-1}(e_{12}) + y_3 D f_3 &= 0 \\ \frac{1}{s} (1-x_1) \Phi_{C1}^{-1}(f_4) + x_1 D e_1 - \Phi_{R1} [(1-y_1)f_2 + y_1 D f_1] + S e_1 &= 0 \\ \frac{1}{s} (1-x_1) \Phi_{C1}^{-1}(f_4) + x_1 D e_1 - \Phi_{R2} [(1-y_1)f_7 + y_2 D f_2] - \frac{1}{s} (1-x_2) \Phi_{C2}^{-1}(f_9) - x_2 D e_2 &= 0 \\ S e_2 - \frac{1}{s} (1-x_2) \Phi_{C2}^{-1}(f_9) - x_2 D e_2 - \Phi_{R3} [(1-y_3)f_{12} + y_3 D f_3] &= 0 \end{aligned} \quad (V.6)$$

Le système d'équations ci-dessus permet selon les variables booléennes x_i et y_j de déterminer la structure finale du système surveillable. Les résultats du placement de trois et quatre détecteurs sont donnés par le tableau suivant :

Nombre de capteurs	Combinaisons	Surveillables	Non détectables
4	1 1 0 1 1	C_1, C_2, R_1, R_2, R_3	ϕ
4	1 1 1 0 1	C_1, C_2, R_1, R_2, R_3	ϕ
4	1 0 1 1 1	C_2, R_2, R_3	C_1, R_1
4	0 1 1 1 1	C_1, C_2, R_1, R_2, R_3	ϕ
4	1 1 1 1 0	C_1, R_1, R_2	C_2, R_3
3	0 1 0 1 1	C_1, C_2, R_1, R_2, R_3	ϕ
3	1 0 1 0 1	C_2, R_2, R_3	C_1, R_1
3	1 0 0 1 1	C_2, R_2, R_3	C_1, R_1
3	1 1 1 0 0	C_1, R_1, R_2	C_2, R_3
3	0 1 1 1 0	C_1, R_1, R_2	C_2, R_3

Tableau V.1 Résultats du placement de détecteurs

On remarque que la meilleure solution de surveiller les 5 composants avec un minimum de détecteurs est la combinaison avec 3 détecteurs et selon la combinaison

$[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ y_3]^T = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]^T$ les résidus sont donnés par :

$$\begin{cases} r_1 : \frac{1}{s} \Phi_{C_1}^{-1}(Sf_1 - Df_1 - Df_2) - \Phi_{R_1}[Df_1] + Se_1 = 0 \\ r_2 : \frac{1}{s} \Phi_{C_1}^{-1}(Sf_1 - Df_1 - Df_2) - \Phi_{R_2}[Df_2] - \frac{1}{s} \Phi_{C_2}^{-1}(Sf_2 + Df_2 + Df_3) = 0 \\ r_3 : Se_2 - \frac{1}{s} \Phi_{C_2}^{-1}(Sf_2 + Df_2 + Df_3) - \Phi_{R_3}[Df_3] = 0 \end{cases} \quad (V.7)$$

La table des structures des résidus est :

	C_1	C_2	R_1	R_2	R_3
r_1	1	0	1	0	0
r_2	1	1	0	1	0
r_3	0	1	0	0	1

Tableau V.2 Signature des défaillances

Les signatures de fautes sont différentes et non nulles, donc les composants C_1, C_2, R_1, R_2 et R_3 sont surveillables.

V.3 Simulation de la sensibilité du détecteur Df_I sur le phénomène chimique

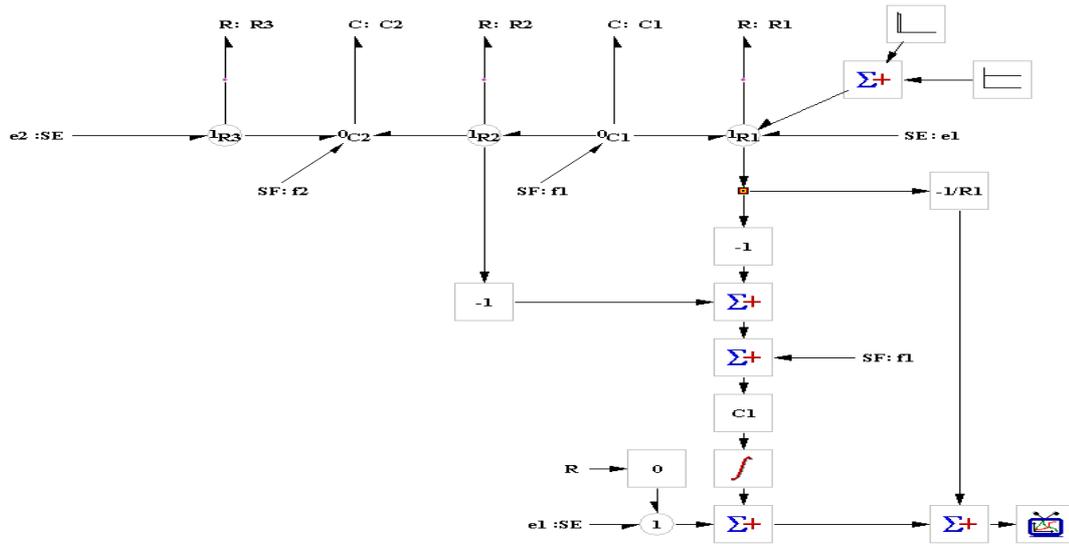


Figure V.2 Schéma bloc de fonctionnement du résidu RRA_1

Le détecteur Df_I est sensible à la défaillance du composant R_1 injecté par simulation entre les instants $t_1=2s$, $t_2=2.03s$ et qui apparaît clairement sur le résidu RRA_1 et confirmé par le résultat de simulation représenté par la figure V.3.

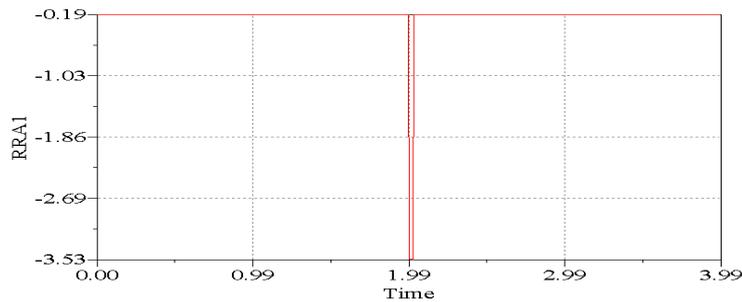


Figure V.3 Sensibilité du résidu RRA_1 à la défaillance du composant R_1

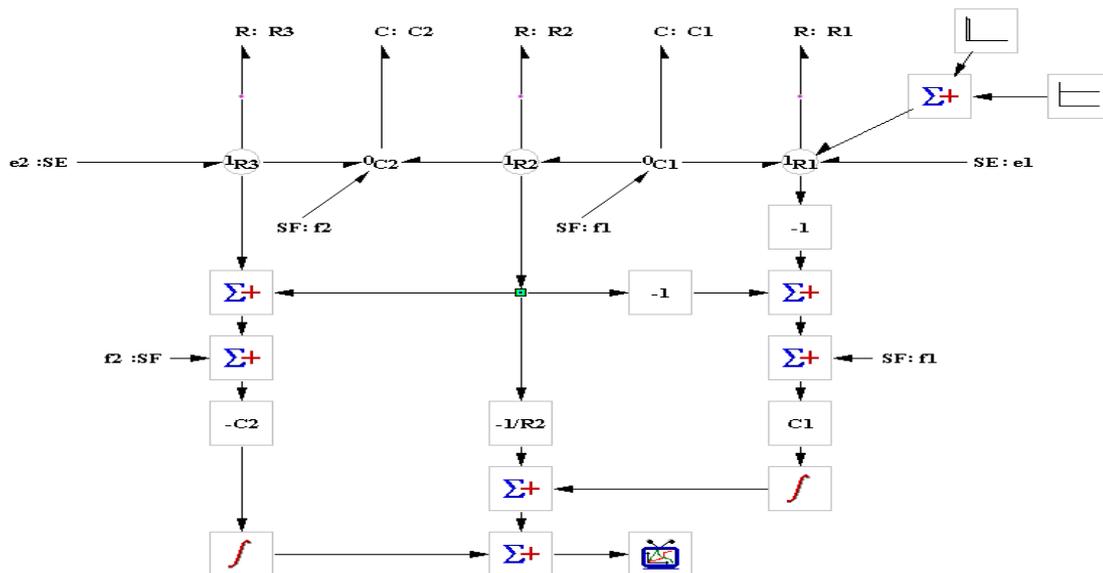


Figure V.4 Schéma bloc de fonctionnement du résidu RRA_2

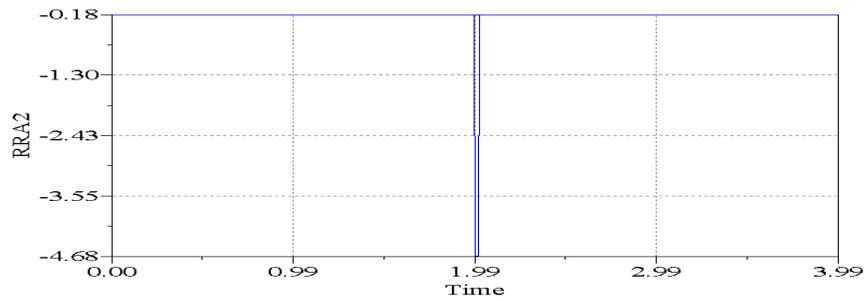


Figure V.5 Sensibilité du résidu RRA2

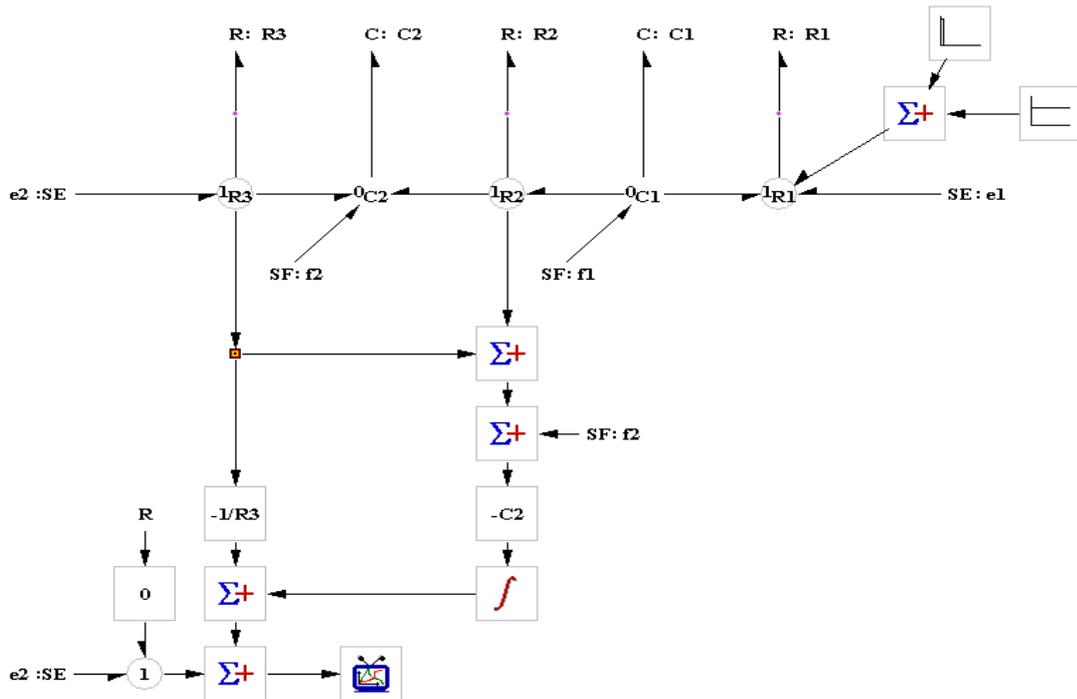


Figure V.6 Schéma bloc de fonctionnement du résidu RRA3

Le détecteur Df_1 est insensible à la défaillance de R_1 donné par le résidu RRA_3 , le résultat de simulation est représenté par la figure V.7.

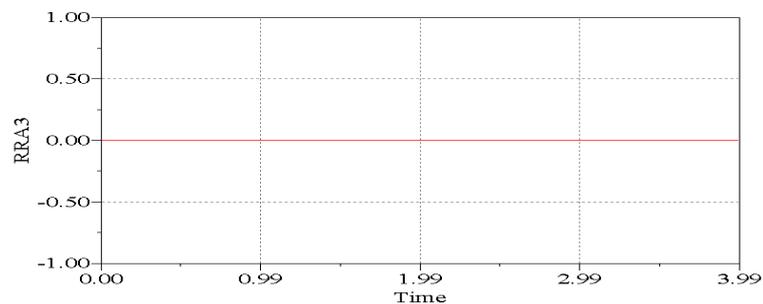


Figure V.7 Fonctionnement normal du résidu RRA3

V.4 Modèle hydraulique d'un plateau

Le modèle est composé de 6 composants : C (Capacité de la virole), I (Rotation des plateaux lors de la séparation), R_1 , R_2 , R_3 et R_4 (Résistances). Ces éléments (composants et phénomènes) sont portés sur 3 jonctions 0 : 0_C , 0_I , 0_{SF1} et 4 jonctions 1 : 1_{R1} et 1_{R2} et 1_{R3} et 1_{R4} . Les composants sont alimentés par 4 sources : Sf_1 , Sf_2 (Débits massiques), Se_1 et Se_2 (Pressions).

$$\text{Pour la jonction } 0_C \left\{ \begin{array}{l} f_{14} + f_{12} - f_{11} - f_{13} = 0 \text{ et } e_{11} = e_{12} = e_{13} = e_{14} \\ f_{12} = Sf_2 \\ f_C = f_{13} = \Phi_C [s\{(1-x_1)e_{13} + x_1De_2\}] \\ e_{13} = e_C = \frac{1}{s}(1-x_1)\Phi_C^{-1}(f_{13}) + x_1De_2 \end{array} \right. \quad (\text{V.13})$$

$$\text{Pour la jonction } 1_{R4} \left\{ \begin{array}{l} e_{16} - e_{15} - e_{14} = 0 \text{ et } f_{14} = f_{15} = f_{16} \\ Se_2 = e_{16} \\ e_{R4} = e_{15} = \Phi_{R4} [(1-y_4)f_{15} + y_4Df_4] \\ f_{15} = f_{R4} = (1-y_4)\Phi_{R4}^{-1}(e_{15}) + y_4Df_4 \end{array} \right. \quad (\text{V.14})$$

A partir des équations précédentes on déduit le système d'équations global suivant :

$$\begin{aligned} \Phi_I [s\{(1-Z_1)f_4 + Z_1De_1\}] + Se_1 - \Phi_{R1} [(1-y_1)f_2 + y_1Df_1] &= 0 \\ (1-y_2)\Phi_{R2}^{-1}(e_6) + y_2Df_2 - (1-y_1)\Phi_{R1}^{-1}(e_2) - y_1Df_1 - \frac{1}{s}(1-Z_1)\Phi_I^{-1}(e_4) - Z_1De_1 &= 0 \\ (1-y_3)\Phi_{R3}^{-1}(e_{10}) + y_3Df_3 + Sf_1 - (1-y_2)\Phi_{R2}^{-1}(e_6) - y_2Df_2 &= 0 \quad (\text{V.15}) \\ (1-y_4)\Phi_{R4}^{-1}(e_{15}) + y_4Df_4 + Sf_2 - (1-y_3)\Phi_{R3}^{-1}(e_{10}) - y_3Df_3 - \Phi_C [s\{(1-x_1)e_{13} + x_1De_2\}] &= 0 \\ Se_2 - \Phi_{R4} [(1-y_4)f_{15} + y_4Df_4] - \frac{1}{s}(1-x_1)\Phi_C^{-1}(f_{13}) - x_1De_2 &= 0 \\ \frac{1}{s}(1-x_1)\Phi_C^{-1}(f_{13}) + x_1De_2 - \Phi_{R3} [(1-y_3)f_{10} + y_3Df_3] - \Phi_{R2} [(1-y_2)f_6 + y_2Df_2] - \Phi_I [s\{(1-Z_1)f_4 + Z_1De_1\}] &= 0 \end{aligned}$$

Le système d'équations ci-dessus permet selon les variables booléennes x_i , y_j et z_k de déterminer la structure finale du système surveillable.

Les résultats du placement de 3, 4 et 5 détecteurs sont donnés par le tableau suivant :

Nombre de capteurs	combinaisons	surveillables	Non détectables
5	110111	R ₁ , R ₄ , C et I	R ₂ , R ₃
5	111101	R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ , C et I	ϕ
5	011111	R ₁ , R ₄ , C et I	R ₂ , R ₃
4	010111	R ₁ , R ₄ , C et I	R ₂ , R ₃
4	110101	R ₁ , R ₂ , R ₄ et I	R ₃ , C

3	110100	R ₁ , R ₂ , R ₃ et I	R ₄ , C
3	010011	R ₁ , R ₃ , R ₄ et C	R ₂ , I

Tableau V.3 Résultats du placement de détecteurs

On remarque que la meilleure solution de surveiller les 6 composants est d'utiliser 5 détecteurs.

V.5 Simulation de la sensibilité du détecteur Df_I sur le phénomène hydraulique

V.5.1 : Schéma bloc de fonctionnement des résidus RRA_1 , RRA_2 et RRA_3

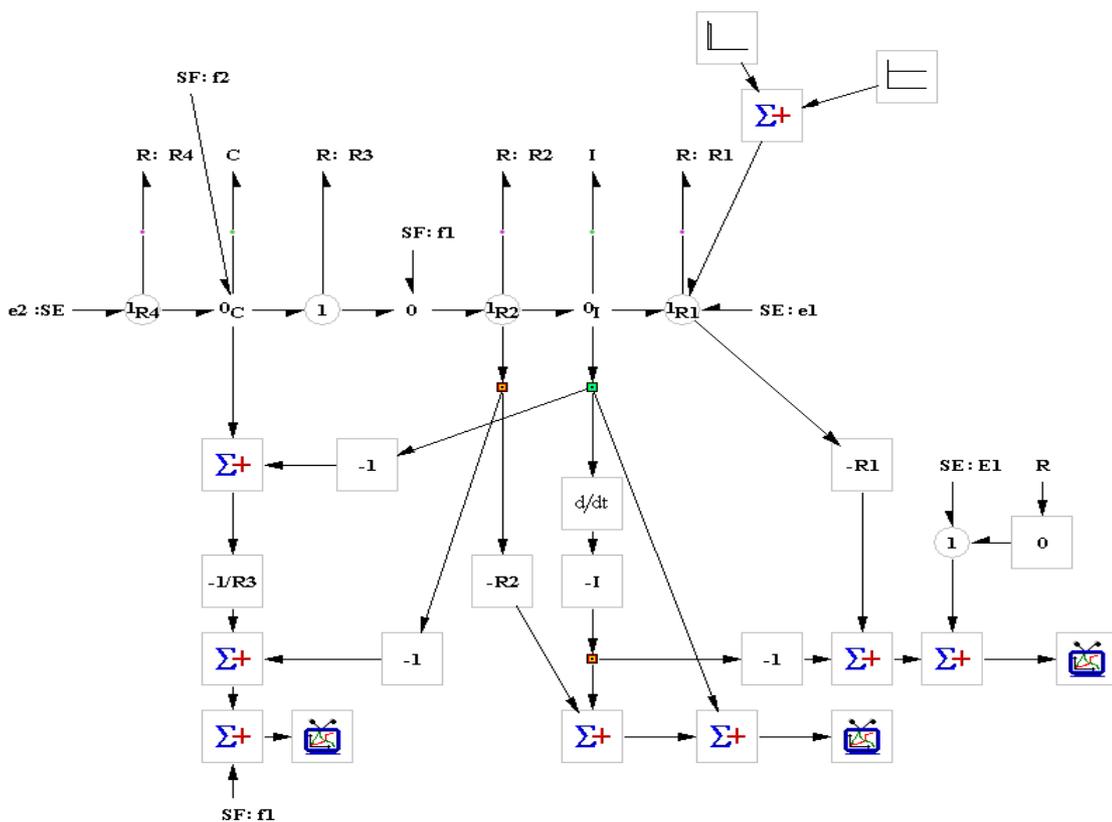


Figure V.9 Schéma bloc de fonctionnement des résidus RRA_1 , RRA_2 et RRA_3

La sensibilité du détecteur Df_I au défaut injecté entre $t_1=1s$ et $t_2=1.01s$ apparaît clairement sur les résidus RRA_1 , RRA_2 et RRA_3 comme le montrent les résultats de simulation suivants :

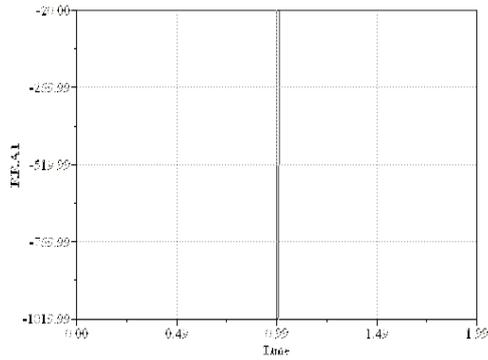


Figure V.10 Sensibilité du résidu RRA_1

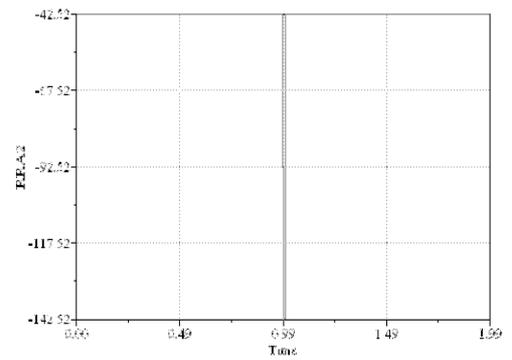


Figure V.11 Sensibilité du résidu RRA_2

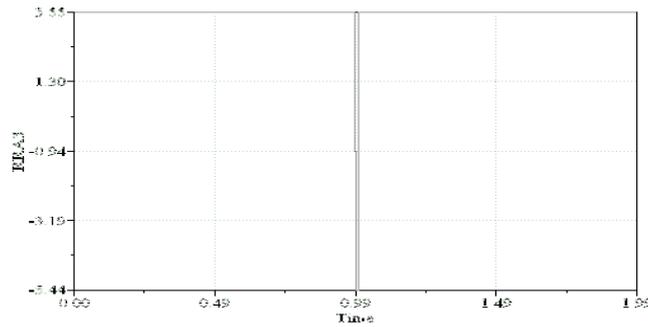


Figure V.12 Sensibilité du résidu RRA_3

V.5.2 Schéma bloc de fonctionnement des résidus RRA_4 et RRA_5

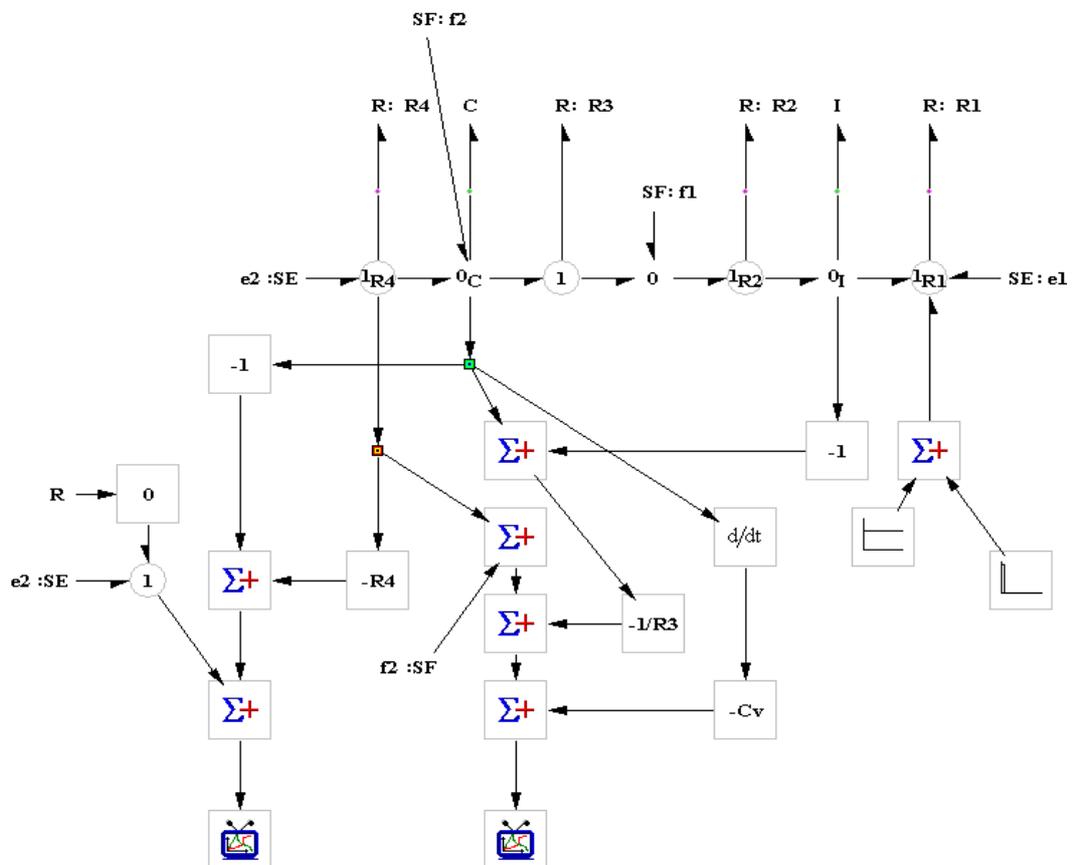


Figure V.13 Schéma bloc de fonctionnement des résidus RRA_4 et RRA_5

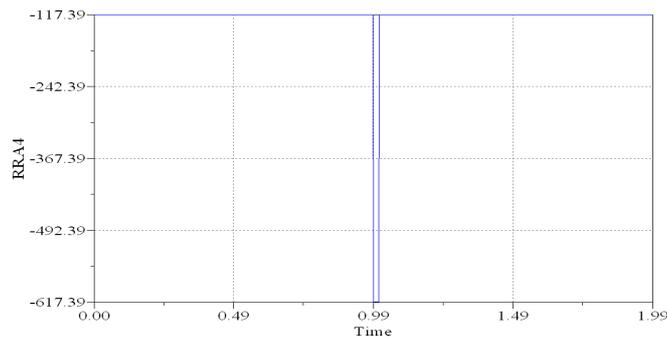


Figure V.14 Sensibilité du résidu RRA_4

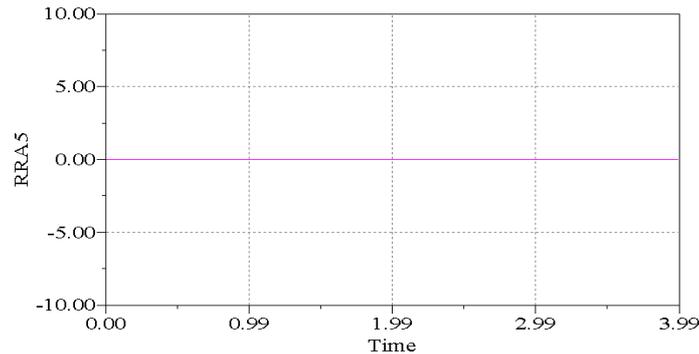


Figure V.15 Fonctionnement normal du résidu RRA_5

V.6 Conclusion

Pour la tâche de placement des détecteurs en vue de la surveillance des composants, l'algorithme utilisé s'est avéré efficace. C'est une technique qui, d'une part évite l'exploitation systématique de toutes les combinaisons, et d'autre part, évite de générer effectivement les relations de redondance analytique à chaque positionnement en ne gardant que la structure de ces dernières.

Le but principal de cette application est de montrer l'applicabilité de la méthodologie des relations de redondance analytique à partir d'un modèle Bond-Graph.

La mise en œuvre sur le logiciel SYMBOLS du système de surveillance permet de détecter les principales pannes définies. Les essais ont montré la précision du modèle et l'efficacité de la surveillance des phénomènes chimique et hydraulique dans les plateaux de la colonne de distillation.

Détection et localisation de défauts dans l'actionneur ultrasonore

VI.1 Introduction

Au cours des dernières années, l'industrie a montré un intérêt croissant pour les actionneurs piézoélectriques et les dispositifs ultrasonores. Les actionneurs piézoélectriques permettent de réaliser les systèmes qui sont présentés avec un design simple et trouvent une application plus large dans les systèmes de positionnement.

La description de l'actionneur piézo-électrique implique des effets mécaniques et électriques combinés. Souvent, les conditions opératoires sont choisies de manière à obtenir un comportement presque linéaire [48]. La détection et la localisation de défauts dans les systèmes dynamiques complexes nécessitent l'utilisation de la modélisation de la dynamique du système de capture et les transitoires qui surviennent en cas de panne. Dans ce chapitre nous avons élaboré le modèle bond graph de l'actionneur ultrasonore sur la base de ses propriétés physiques. Puis, le modèle bond graph avec le placement des capteurs est dérivé. Enfin, les résultats sont validés par un logiciel de simulation.

VI.2 Modélisation graphique utilisant l'approche bond graph

Les modèles bond graph sont parfaitement adaptés pour la modélisation d'un système non linéaire et ne suppose pas de contraintes de linéarité. La contrainte sur l'équation constitutive est que l'énergie doit être préservée dans la loi physique. Deux relations différentes entre les variables sont représentées graphiquement sur la figure (VI.1-a) et (VI.1-b). Le modèle bond graph de cette relation est représenté par des éléments 1-port dans la figure (VI.1-c).

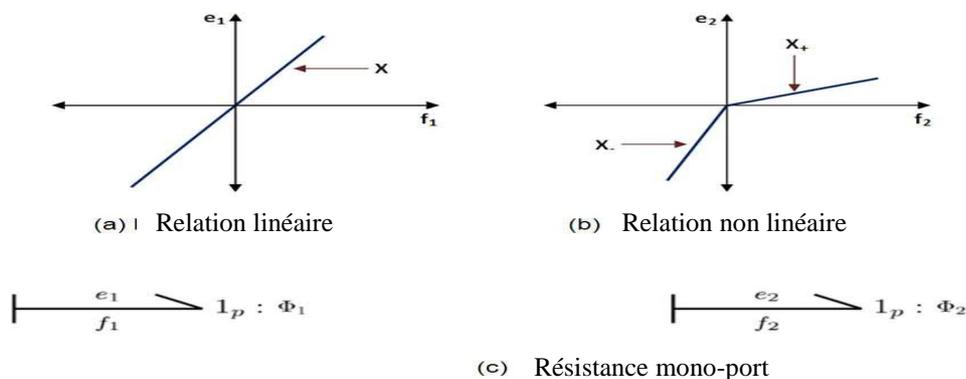


Figure VI.1 Relation entre le débit et l'effort pour les éléments de résistance mono-port

Les relations constitutives des éléments résistants sont données par les équations (VI.1) et (VI.2). On peut voir que les modèles de comportement linéaire et non linéaire se ressemblent car la relation constitutive cache la différence. Le rôle du logiciel est de permettre de simuler les modèles différemment.

$$e_1 = \phi_1(f_1) \quad (\text{VI.1})$$

$$e_2 = \phi_2(f_2) \quad (\text{VI.2})$$

$$\text{avec, } \begin{cases} \phi_1 = X & \text{toujours} \\ \phi_2 = X_- & \text{si } f_2 < 0 \\ \phi_2 = X_+ & \text{si } f_2 > 0 \end{cases} \quad (\text{VI.3})$$

VI.3. Description d'un actionneur piézo-électrique ultrasonore

En général, les moteurs piézoélectriques à ultrasons peuvent être conçus pour utiliser soit des ondes progressives ou des ondes stationnaires pour générer le mouvement. Les moteurs à ondes stationnaires piézo-électriques utilisent une combinaison de flexion de torsion et des vibrations longitudinales d'un actionneur piézo-électrique. Une vibration produit une force normale tandis que l'autre génère un mouvement perpendiculaire à la force normale. Cette combinaison crée une force d'entraînement par friction entre le stator et le rotor. Une onde mécanique est un trouble qui est créé par un objet vibrant, se déplace à travers un milieu d'un endroit à l'autre transportant de l'énergie [49]. Le principe de fonctionnement de l'actionneur (figure VI.2) se produit selon les trois parties principales suivantes:

- Le stator est une plaque annulaire en cuivre-béryllium. Sur sa circonférence, les dents sont usinées pour amplifier le mouvement de vibration et d'éliminer les particules d'usure. A sa surface inférieure, les céramiques piézoélectriques sont collées pour exciter la partie métallique. Le stator est fixé au châssis à son centre. Afin de garantir la vibration libre de la bague du stator, un ressort est usiné entre le centre et la circonférence.
- Le rotor est séparé en 3 zones: l'axe, le ressort de précontrainte et la couche polymère de friction en contact avec le stator. Le ressort de précontrainte donne l'élasticité nécessaire pour appliquer le rotor au stator.
- L'interface stator / rotor est la partie la plus complexe du modèle du moteur ultrasonore. On suppose que le stator est rigide et son profil de vibration ne

change pas après que le contact avec le rotor ne se produit, celui-ci comporte une couche conforme de contact [50], [51].

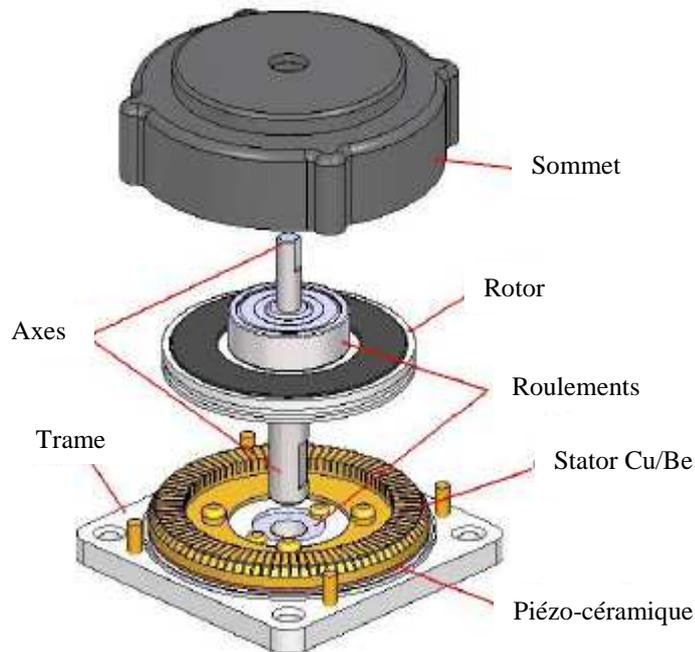


Figure VI.2 Vue d'un moteur piézo-électrique à ultrasons [52]

Le modèle de la figure VI.3, suppose que le stator est rigide et le rotor comporte une couche de contact spécifiée comme un ressort linéaire avec une rigidité équivalente dans la direction axiale et tangentielle.

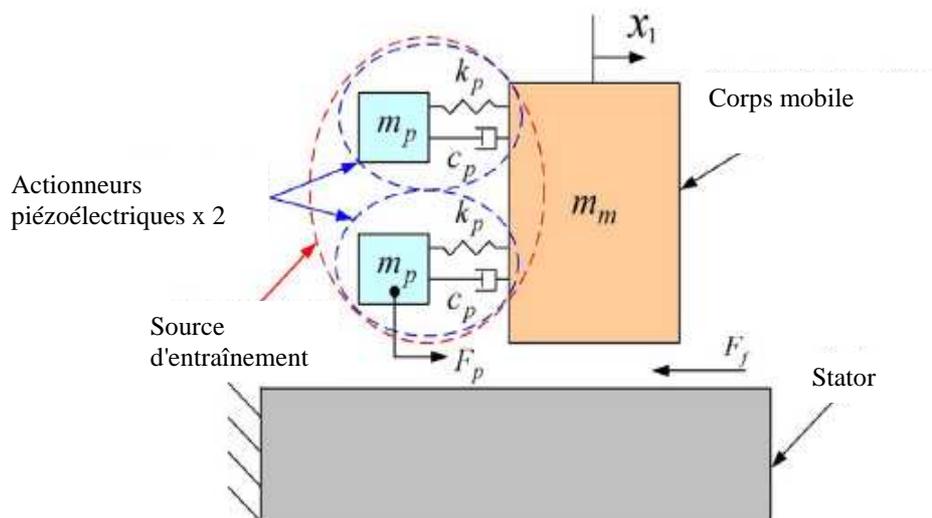


Figure VI.3 Modèle mécanique de l'actionneur piézoélectrique [53]

- c_p : le coefficient d'amortissement qui abaisse le facteur de puissance,
- m_p : la masse de l'actionneur piézoélectrique,
- m_m : la masse du corps mobile,

- k_p : la raideur de l'actionneur piézoélectrique,
- F_p : la force appliquée sur le corps mobile,
- F_f : la force de frottement entre le stator et le rotor.

VI.4. Circuit électrique équivalent

Sur le tableau VI.1, nous résumons les paramètres du moteur comme suit:

Désignations	Symboles et valeurs
Résistance d'entrée	$R_p=5\Omega$;
Capacité céramique	$C_p=7.8nF$;
Capacités du stator	$C_m=0.42nF$;
Masse effective	$m_{eff} = 40.5 \text{ g}$
Masse du rotor	$m = (m_{eff}+22.8+3) \text{ g}$
Fréquences de résonance	$\omega_{res2} = \omega_{res1}$ $\omega_{res1} = (2*\pi*46.65) \text{ kHz}$
Longueur d'onde	$\lambda = (2*\pi*R*f/n) \text{ m}$
Tension d'excitation du stator	$U_{cp} = 570 \text{ volts}$

Tableau VI.1 Paramètres du moteur [54]

Le couplage va modéliser la vibration qui aura lieu lors de l'actionnement du moteur. Il prendra également en compte les pertes dans le moteur ultrasonore [33]. Il n'a pas d'effet sur l'efficacité du moteur s'il n'y avait pas de résistance d'entrée connectée entre l'alimentation et le moteur.

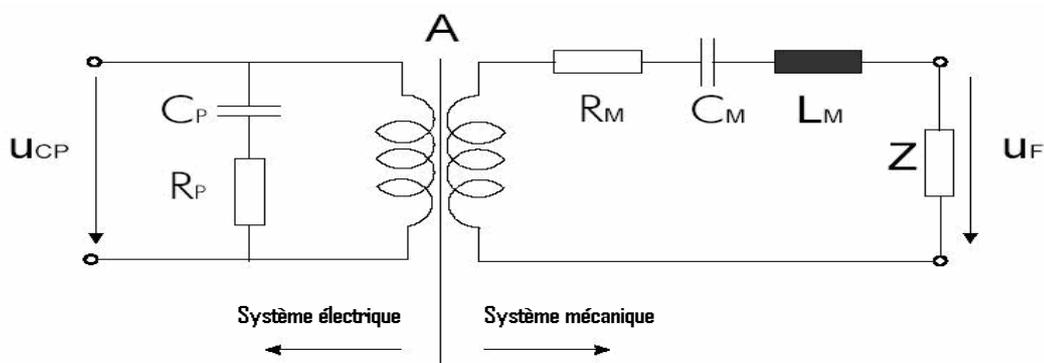


Figure VI.4 Circuit électrique équivalent [55]

- U_{cp} est la tension d'excitation électrique du stator,
- C_p est la capacité céramique
- R_p est la résistance d'entrée
- $L_m = m_{eff}$ est la masse effective du matériau,
- $1/C_s$ est le coefficient de rigidité du contact
- $R_m = d_s$ est le coefficient d'amortissement
- U_2 est le rapport de transformation.

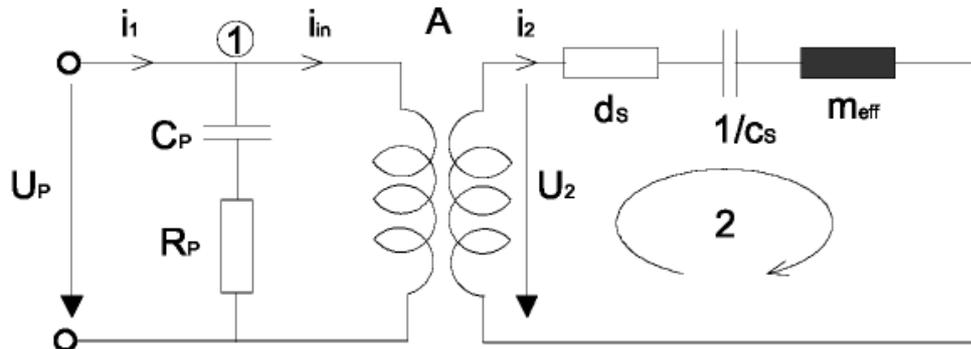


Figure VI.5 Circuit équivalent à partir du modèle mécanique complet [56]

VI.5. Compilation et validation du modèle bond graph

Compte tenu des valeurs des paramètres du moteur utilisé pour la simulation (tableau VI.1), le modèle bond graph développé (figure VI.6) a été simulé à l'état stationnaire et l'état transitoire du moteur. Les paramètres optimaux de la fréquence des tensions d'excitation ont été évalués à 46.65 kHz en fréquence, 570 volts comme amplitude de la tension d'excitation et $\pi/2$ rad comme le décalage entre les deux excitations. Les performances du moteur ont été estimées en appliquant différentes charges à l'état d'équilibre après 2ms de fonctionnement.

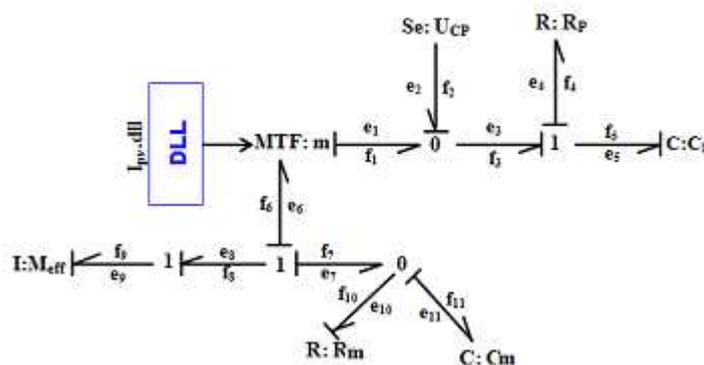


Figure VI.6 Modèle Bond graph non linéaire du moteur

L'influence de l'application des charges, et par conséquent l'évolution du couple et de la vitesse du rotor sont représentées par les figures suivantes. A partir de 2ms, le moteur a été chargé par 2Nm, 4Nm, 5Nm. On remarquera que la vitesse diminue, lorsque la charge appliquée augmente figure VI.7.

La figure VI.8 montre les caractéristiques de couple du moteur pour diverses charges, qui illustrent ce qui se passe si un couple de charge est appliqué au rotor après 2 secondes de fonctionnement, le couple d'entraînement fourni par le stator doit augmenter afin d'équilibrer le couple de charge.

Par conséquent, la zone de conduite élargit les points antidérapants qui se déplacent loin des crêtes des ondes et sans contact avec les zones de freinage. La vitesse du rotor est égale à la vitesse horizontale du stator aux points de glissement. Par conséquent, le déplacement sans glissement vers le bas du profil de vitesse pousse le rotor à ralentir.

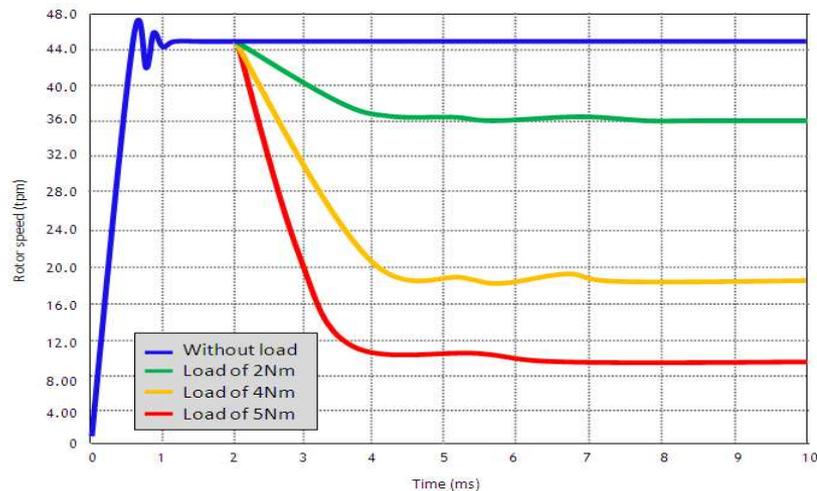


Figure VI.7 Vitesses du moteur sans charge et avec charges 2Nm, 4Nm et 5Nm

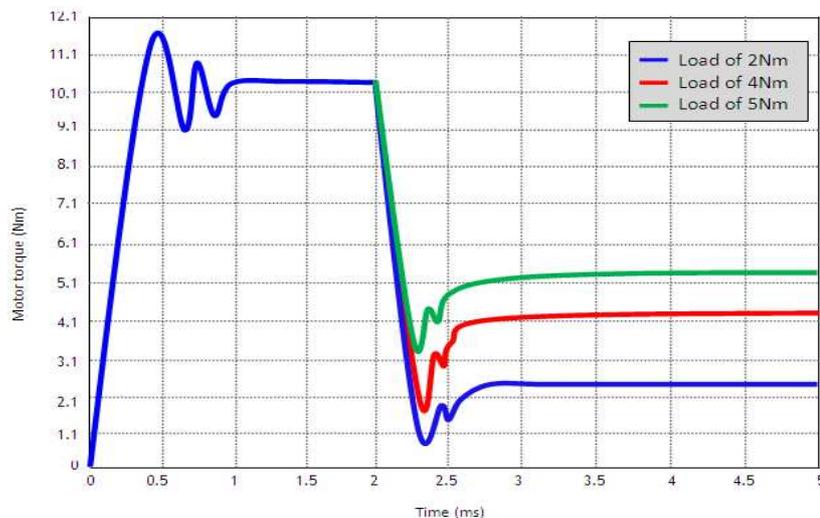


Figure VI.8 Couple moteur pour une charge 2Nm, 4Nm et 5Nm

VI.6 Détection et localisation des défauts dans l'actionneur ultrasonore

6.1 Linéarisation du modèle bond graph de l'actionneur

Un certain nombre de procédés ont été mis au point pour la détection et la localisation des défauts. Toutes ces méthodes conçoivent des fonctions résiduelles (indicateurs de défauts). Le résidu représente la différence entre une valeur estimée et une mesure, il doit être égal à zéro pendant un fonctionnement normal, mais différent de zéro en présence de défauts [13]. Dans la pratique, il existe une distinction entre la détection d'action rapide, et les défauts qui ne sont pas critiques pour la sécurité et sont plus lent à se développer, par exemple l'usure. Les premiers sont les plus susceptibles d'être détectés par l'état-estimation et la comparaison instantanée de prédiction avec mesure, tandis que les seconds sont détectés en utilisant des techniques d'estimation des paramètres qui nécessitent un certain temps et l'excitation du système.

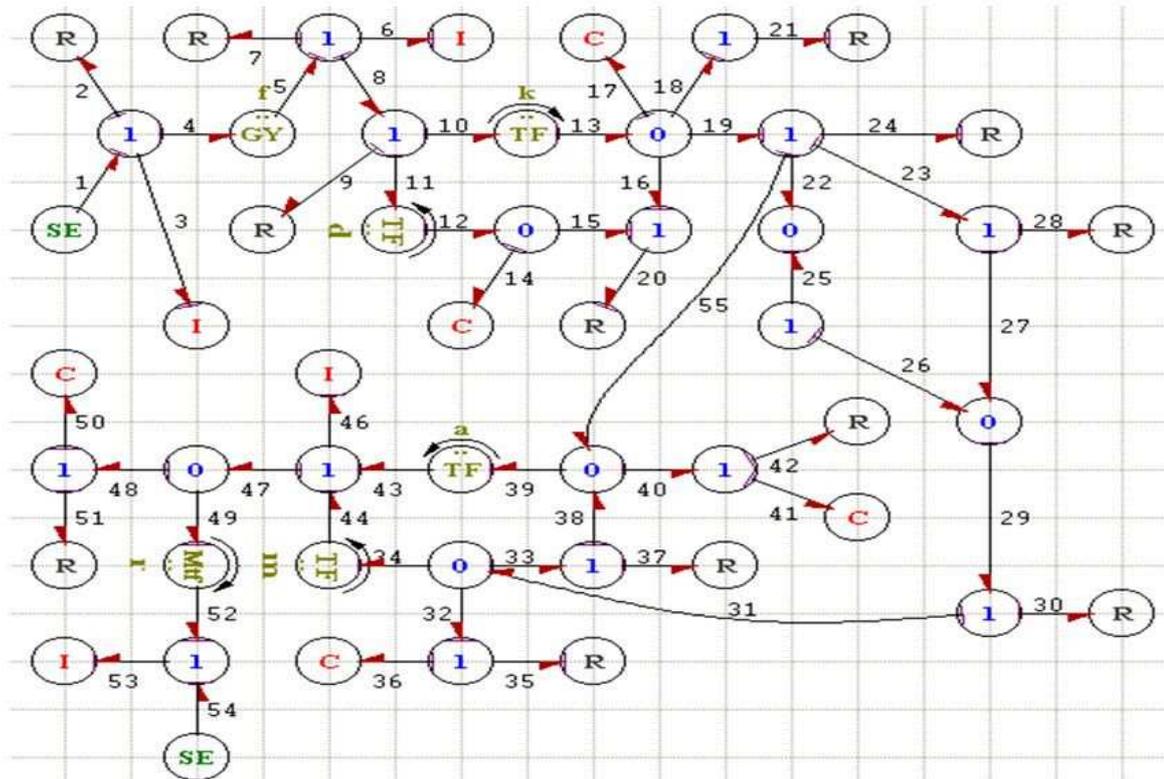


Figure VI.9 Modèle bond graph linéarisé du processus [57]

6.2 Génération des relations de redondance analytique (RRA)

Les RRA sont des équations symboliques représentant des contraintes entre les variables connues du processus (paramètres, mesures et sources). Elles sont obtenues à partir du modèle de comportement du système par différentes techniques d'élimination des variables inconnues.

L'évaluation numérique de chaque RRA est appelé un résidu, qui est utilisé dans le modèle à base de l'algorithme de détection et d'isolation des fautes (FDI). En conséquence, il serait nécessaire en pratique d'optimiser le nombre et l'emplacement des capteurs pour un problème donné.

L'objectif est de fournir une méthode de placement optimale des capteurs sur le modèle bond graph afin de rendre tous les composants surveillables [13].

$$\begin{cases} f_{C_i} = \phi_{C_i} \left[S \left\{ (1-x_i)(e_{C_i}) + x_i D e_i \right\} \right] \\ e_{C_i} = \frac{1}{S} (1-x_i) \phi_{C_i}^{-1}(f_{C_i}) + x_i D e_i \end{cases} \quad \text{avec } i = 1.N$$
(VI.4)

$$\begin{cases} e_{R_j} = \phi_{R_j} \left[(1-y_j)(f_{R_j}) + y_j D f_j \right] \\ f_{R_j} = (1-y_j) \phi_{R_j}^{-1}(e_{R_j}) + y_j D f_j \end{cases} \quad \text{avec } j = 1.N_1$$
(VI.5)

$$\begin{cases} e_{L_k} = \phi_{L_k} \left[(1-z_k)(f_{L_k}) + z_k D f_k \right] \\ f_{L_k} = (1-z_k) \phi_{L_k}^{-1}(e_{L_k}) + z_k D f_k \end{cases} \quad \text{avec } k = 1.N_1$$
(VI.6)

Les résidus sont conçus pour être sensibles à un défaut qui provient d'un capteur spécifique, et aussi insensible que possible à tous les autres défauts des capteurs. Ce résidu nous permettra de traiter non seulement avec des défauts simples mais aussi avec des défauts multiples et simultanés.

Des équations aux jonctions nous pouvons générer les conditions suivantes sont:

$$\begin{aligned} S e_1 - D e_1 - \phi_{I_1} \left[(1-y_1) f_3 + y_1 D f_1 \right] - D e_2^* &= 0 \\ (1-y_1) \Phi_{I_1}(e_3)_1 + \Phi_{I_1} \left[(1-y_2) f_6 + y_2 D f_2 \right] - D e_3^* - D e_4^* + y_1 D f_1 &= 0 \\ \frac{1}{S} (1-x_1) \Phi_{C_1}^{-1}(f_{14}) + \frac{1}{S} (1-x_2) \Phi_{C_2}^{-1}(f_{17}) + x_2 D e_2 - \Phi_{R_4} \left[(1-y_3) f_{20} + y_3 D f_3 \right] + x_1 D e_1 &= 0 \\ -\Phi_{R_5} \left[(1-y_4) f_{21} + y_4 D f_4 \right] + \frac{1}{S} (1-x_2) \Phi_{C_2}^{-1}(f_{17}) + x_2 D e_2 &= 0 \\ x_2 D e_2 - \Phi_{R_6} \left[(1-y_5) f_{24} + y_5 D f_5 \right] - D e_5^* + \frac{1}{S} (1-x_2) \Phi_{C_2}^{-1}(f_{17}) &= 0 \\ -\Phi_{I_2} \left[(1-y_6) f_{35} + y_6 D f_6 \right] - D e_8^* &= 0 \\ \frac{1}{m} D e_7^* + S e_{45} - \Phi_{I_3} \left[(1-y_7) f_{46} + y_7 D f_7 \right] - D e_{10}^* + D e_9 &= 0 \\ -\Phi_{I_4} \left[(1-y_8) f_{53} + y_8 D f_8 \right] + S e_{54} &= 0 \\ -y_3 D f_3 - \Phi_{C_1} \left[S \left\{ (1-x_1) e_{14} + x_1 D e_1 \right\} \right] - (1-y_3) \Phi_{R_4}(e_{20}) &= 0 \\ D f_1^* - \Phi_{C_2} \left[\left\{ S(1-x_2) e_{17} + x_2 D e_2 \right\} \right] - y_3 D f_3 - (1-y_4) \Phi_{R_5}(e_{21}) - y_4 D f_4 - (1-y_3) \Phi_{R_4}(e_{20}) &= 0 \end{aligned}$$
(VI.7)

6.3 Tableau de signatures des fautes

A partir des variables binaires x_i et y_j , nous pouvons déterminer la structure finale du système à surveiller. Deux combinaisons du placement de 10 capteurs garantissent la surveillabilité de tous les composants.

Tableau VI.2. Tableau de signature pour $[y_1y_2y_3y_4y_5y_6y_7y_8x_1x_2] = [0111111111]$

	I1	I2	R4	R5	R6	r2	I3	I4	C1	C2
RRA1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
RRA2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
RRA3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
RRA4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
RRA5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
RRA6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
RRA7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
RRA8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
RRA9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Les signatures de défauts ne sont pas différentes les unes des autres (pour I1 et I2) et non égaux à zéro, donc les défauts des composants I1 et I2 ne sont pas isolables, mais R4, R5, R6, R2, I3, I4, C1 et C2 sont surveillables.

Tableau VI.3. Tableau de signature pour $[y_1y_2y_3y_4y_5y_6y_7y_8x_1x_2] = [1111111110]$

	I1	I2	R4	R5	R6	r2	I3	I4	C1	C2
RRA1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RRA2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
RRA3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
RRA4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
RRA5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

RRA6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
RRA7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
RRA8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
RRA9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Les signatures de défauts sont différentes les unes des autres et non égales à zéro, alors les composants I1, I2, R4, R5, R6, R2, I3, I4, C1 et C2 sont surveillables. Pour la détection des défauts du moteur linéaire à ultrasons, nous utilisons les relations de redondance analytique. Nous créons les défauts sur les composants à l'aide du logiciel SYMBOLS.

6.4 Sensibilité du détecteur Df_1 à partir des défauts de l'inertie I1 et de la résistance R1

Nous créons un défaut entre l'instant $t = 2$ et $t = 2,5$ s. Le schéma bloc du procédé est illustré par la figure VI.10 et la sensibilité des résidus aux défauts est donnée par la figure VI.11.

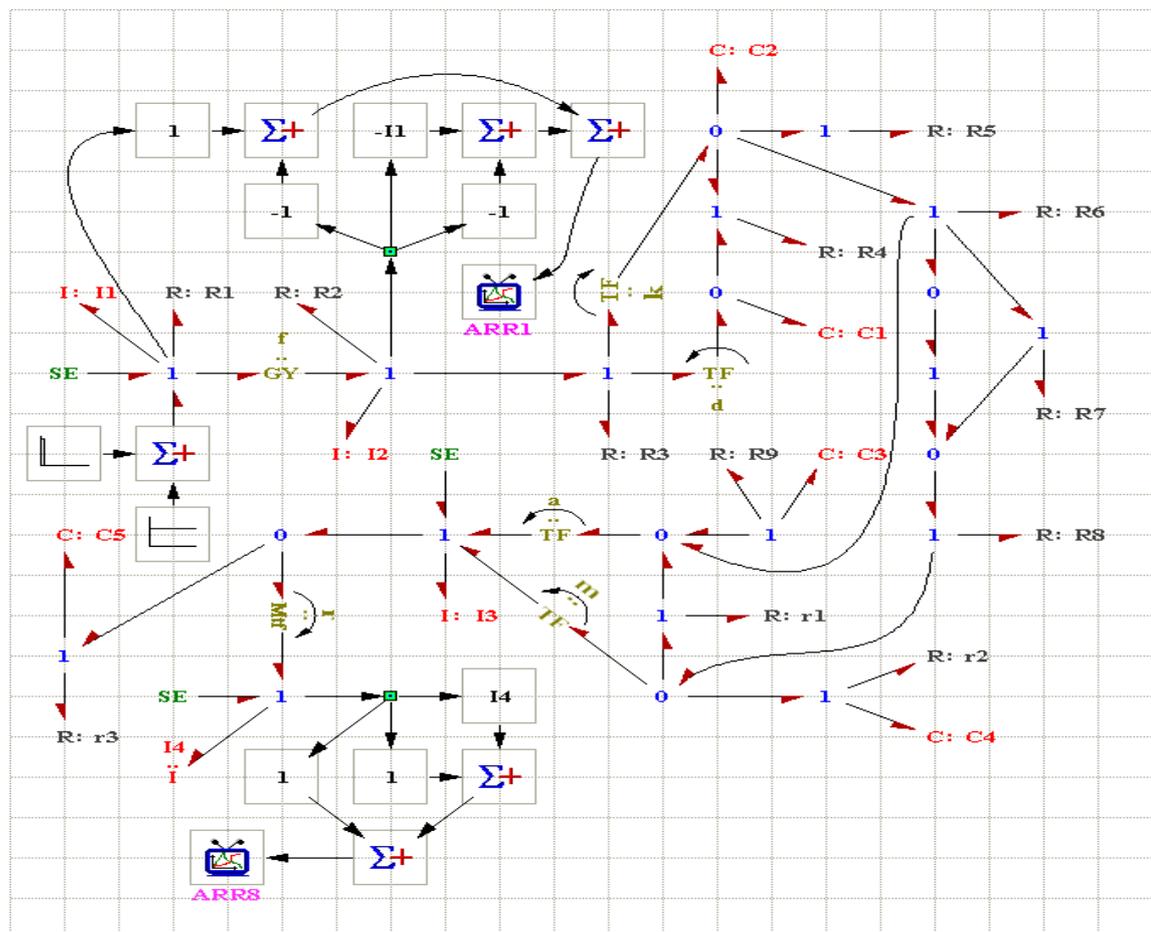


Figure VI.10 Diagramme bloc de la défaillance de I1 et R1 [57]

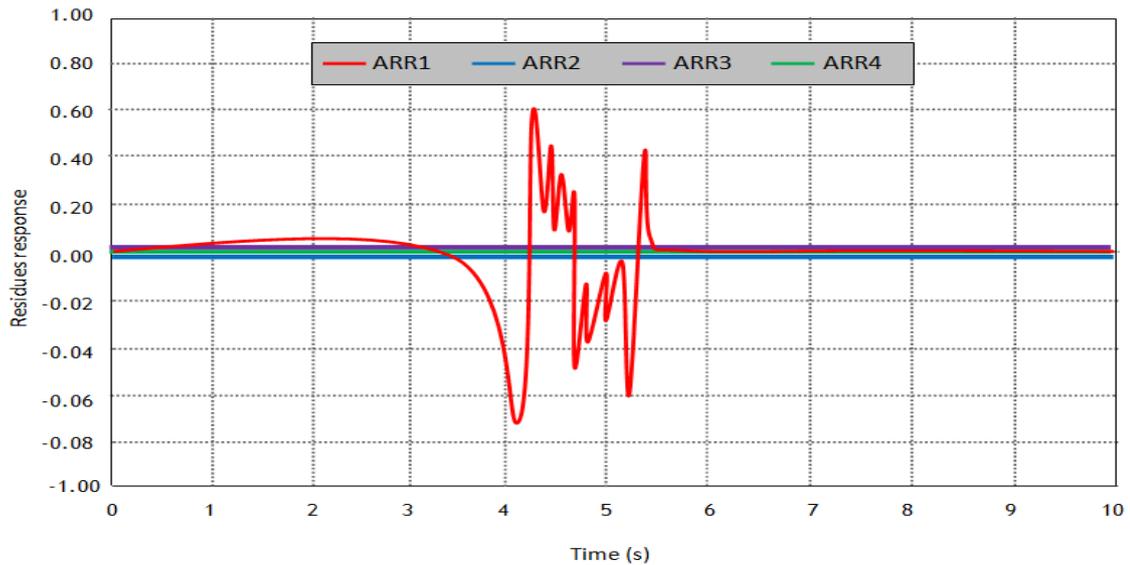


Figure VI.11 Sensibilité du résidu Df1

Les défauts sur I1 et R1 sont caractérisés par la présence du détecteur Df1 dans la relation de redondance analytique RRA1. Nous notons que le résidu RRA1 est sensible aux défauts qui affectent I1 et R1, mais les résidus RRA2, RRA3, RRA4, RRA5, RRA6, RRA7, RRA8 et RRA9 sont égaux à zéro.

VI.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté le moteur piézoélectrique, on l'a modélisé et surveillé par l'outil bond graph. Les moteurs piézoélectriques ont des spécificités qui sont très intéressants si elles correspondent aux besoins de l'application : couple élevé, faible vitesse, couple de maintien, fonctionnement silencieux, réactivité, niveau d'intégration élevé. En raison de la complexité du moteur ultrasonore, une analyse précise utilisant l'approche bond graph a été utilisée. Néanmoins, cette méthode de modélisation a été présentée afin de montrer qu'il est possible de modéliser les moteurs ultrasoniques graphiquement. La génération des relations de redondance analytique par l'approche Bond Graph présente quelques caractéristiques intéressantes: Ils sont simples à inclure / comprendre, car ils correspondent à des relations et des variables qui sont affichées par le modèle bond graph du processus physique, ces relations sont déduites directement à partir de la présentation graphique.

Résumé – Cette thèse traite les techniques de surveillance d'un système en génie des procédés. L'outil de modélisation utilisé est le bond graph et le logiciel de simulation est SYMBOLS. Différentes techniques ont été appliquées sur des exemples multidisciplinaires pour confirmer la puissance de l'outil utilisé. Cet outil possède des propriétés structurelles et causales permettant d'assurer les deux principales tâches de la surveillance à savoir la détection et la localisation des défauts ainsi qu'il a une forme unifiée à tous les domaines. Ces techniques ont été appliquées aux différents composants de la colonne de distillation et le moteur ultrasonore. La surveillance du rebouilleur et de la virole s'est avérée facile par contre le plus grand problème est apparu au niveau du condenseur qui possède un modèle plus compliqué et nécessite l'ajout de détecteurs dualisés remédiant aux conflits des différentes énergies.

Mots clé - Surveillance, Détection, Localisation, Colonne de distillation, Moteur ultrasonore, Outil bond graph, Logiciel SYMBOLS.

Abstract - This thesis deals the monitoring techniques of a process engineering system. The use of bond graph tool is about modeling. The simulation is realized by SYMBOLS software. Several monitoring techniques are used through different multidisciplinary examples to confirm the performance of the tool used. This tool has structural and causal properties to ensure the two tasks of monitoring faults detection and isolation. This tool has the unified form for all areas. These techniques have been applied to various components of the distillation column and to the ultrasonic motor. Monitoring of the boiler and the plate has proved easy but by against the biggest problem appeared at the condenser which has a more complicated model and requires the addition of dialyzed sensors overcoming conflict of different energies.

Keywords - Monitoring, Detection, Isolation, Distillation column, Ultrasonic motor, Bond graph tool, SYMBOLS software.

ملخص : يتناول هذا البحث نظام الرصد الفني في مجال الهندسة العملية. الأداة المستخدمة هي نماذج الرسم البياني السندات وبرامج المحاكاة هو SYMBOLS. وقد تم تطبيق تقنيات مختلفة لأمثلة متعددة التخصصات لتأكيد قوة الأداة هذه الأداة لها خصائص سببية وهيكلية لضمان المهمتين الرئيسيتين للرصد أي كشف موقع وأخطاء كمنصة موحدة لجميع المجالات. وقد تم تطبيق هذه التقنيات لمختلف مكونات عمود التقطير والمحرك ما فوق الصوتي. يبدو أن رصد النجد والمرجل سهلا ولكن أكبر مشكلة في المكثف هي أنه أكثر تعقيدا ويتطلب معالجة إضافية بأجهزة استشعار الصراع النابع من الطاقات المختلفة.

الكلمات الرئيسية : الرصد، الكشف، العزل، عمود التقطير، المحرك ما فوق الصوتي، أداة الرسم البياني، برامج

المحاكاة

Conclusion générale et Perspectives

Les modèles des processus en génie des procédés sont fortement non linéaires et multi-énergétiques, leur surveillance passe d'abord par la conception des algorithmes de détection et de localisation des défaillances utilisant la redondance analytique. L'outil bond graph a fourni à l'utilisateur des informations originales. Les techniques de détection et d'isolation de fautes que nous avons développées dans cette thèse sont basées sur la génération des résidus et confirment que l'outil bond graph est très riche et facilement maniable car son logiciel nous a permis de le corriger à chaque étape.

Les travaux présentés dans cette thèse constituent une étude sur la surveillance des éléments essentiels de la colonne de distillation à savoir le rebouilleur, le condenseur et les plateaux et une application sur le moteur ultrasonore en plaçant des détecteurs sur le modèle bond graph et à partir de l'analyse structurelle.

La conception de l'architecture de surveillance nécessite la génération des relations de redondance analytique qui représentent les résidus et qui jouent le rôle d'indicateurs de fautes. Ces relations nous aident à obtenir les tables de signatures de fautes qui permettent de conclure si le fonctionnement est normal ou défaillant.

Le but était de généraliser l'application du bond graph à la surveillance des systèmes thermodynamique sous forme de modèles hydraulique, chimique et thermique qui proviennent de la structure de la colonne de distillation.

Les exemples multidisciplinaires cités dans la première partie et clarifiant les techniques de surveillance nous ont énormément aidés à concrétiser les résultats de la thèse.

La tâche la plus délicate était la séparation entre la phase liquide et la phase vapeur en présence de l'échange thermique dû au thermoplongeur qui est en contact direct avec la virole et les réactions chimiques qui s'y produisent ce qui a rendu le modèle de surveillance très complexe.

Les résultats de simulation du rebouilleur, des plateaux et du condenseur sont avérés intéressants car ils nous ont permis de valider la partie modélisation qui nécessite la compréhension physique de l'architecture et des phénomènes qui sont indispensables dans ce système malgré qu'ils soient un peu éloignés de notre spécialité.

Enfin, les résultats de cette thèse ont été validés par sept (07) articles et trente-huit (38) conférences internationales et nationales.

En perspectives, nous envisagerons de réaliser les modèles optimisés par ces techniques en temps réel sous forme d'une structure de commande de la colonne de distillation.

Références bibliographiques

1. Miller P. L., Causal Models in Medical Artificial Intelligence, 0195-4210/0000/0017\$01.00 © 1987 SCAMC, Inc., pp.17-22
2. Shortliffe E. H., Explanation capabilities for medical consultation systems. In Proceedings of American Association of Medical Systems and Informatics 1984, Third Spring Joint National Conference, San Francisco, CA, pages 193-197, AAMSI, 1984.
3. Frydman S., Systèmes experts pour la supervision des hauts fourneaux Ph.D. Thesis (2001)
4. Tagina M., Cassar J.P., Dauphin-Tanguy G. and Staroswiecki, “Bond graph models for direct generation of formal fault detection systems”, Systems Analysis Modeling Simulation Journal, 23: 1-17, 1996.
5. Thoma J., Ould Bouamama B., “Modeling and simulation in thermal and chemical engineering. Bond graph approach”, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2000.
6. Heny C., Simanca D. and Delgado M., “Pseudo bond graph model and simulation of a continuous tank reactor”, Journal the Franklin Institute, 337: 21-42, 2000.
7. Jaume D., Verge M., “Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graph”, Edition Technip, 2004.
8. Borutzky W., “Bond Graphs a Methodology for Modeling Multidisciplinary Dynamic Systems”, Volume FS-14 of Frontiers in Simulation, SCS Publishing House, Erlangen, San Diego, 2004.
9. Borutzky W., “Simulation Modelling Practice and Theory”, Volume 17, Issue 1, January 2009, Pages 3–21.
10. Couenne F., Jallut C., Lefèvre L., Le Gorrec Y., Maschke B., “Basis for bond-graph modeling in chemical engineering“, In: Proceedings of the 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, ESCAPE 17, V. Plesu and (Editors), Elsevier, pages 69-74, may 28 – 30 2008, Bucarest, Roumania
11. Ould Bouamama B., Staroswiecki M., Dauphin-Tanguy G., “Actuator fault detection using bond graph approach”, Proceedings of European Control Conference, Porto, Portugal, pp 2735-2740, 2001
12. Ghiaus C., “Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph”, Journal of Energy and Buildings, 30: 221-232, 1999.
13. Khemliche M., Ould Bouamama B., Haffaf H., “Sensors placement for diagnosability on Bond Graph model”, Sensors and Actuators Journal, 2006, 4, p. 92-98
14. Latreche S., Khemliche M., Mostefai M., “Optimization technique for fault detection and isolation in the condenser of a distillation column by bond graph approach”, Archives Des Sciences Journal, ISSN 1661-464X, Vol 66, No. 2; Feb 2013 p. 237 -247.
15. Mitsiouk A., “Contribution à l'Optimisation des Systèmes Dynamiques Application au Génie des Procédés”, Thèse de doctorat ; Soutenue le 12 Juillet 2007, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Références bibliographiques

16. Fukunaga H., Kakehashi H., Ogasawara H., Ohta Y., “Effect of Dimension on Characteristics of Rosen-Type Piezoelectric Transformer”, IEEE International Ultrasonics Symposium, 1998.
17. Loureiro R., "Bond graph model based on structural diagnosability and recoverability analysis : application to intelligent autonomous vehicles", Thèse de doctorat en Automatique et Informatique Industrielle, Soutenue le 06-12-2012
18. Benmoussa S., “Approche Bond Graph pour la détectabilité et l'isolabilité algébriques des défauts composants”, Thèse de Doctorat, 23 Janvier 2013, Université Lille 1.
19. El Osta W., “Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés”, Thèse de Doctorat de l'Université, 2005.
20. Samantaray A. K., Medjaher K., Ould Bouamama B., Staroswiecki M., Dauphin-Tanguy G., “Diagnostic bond graphs for online fault detection and isolation”, Simulation Modeling Practice and Theory Journal, 2005, p. 237-262.
21. Mukherjee A., Karmakar R., “Modelling, Simulation and Diagnostic of Engineering Systems through Bondgraphs”, Alpha Science International, 2000.
22. Kozak D., Ivandic Z. and Kontajic P., “Determination of the critical pressure for a hot-water pipe with a corrosion defect”, Materiali in tehnologije / Materials and technology 44 (2010) 6, 385–390, UDK 621.791:620.193:62-462 ISSN 1580-2949.
23. Cicile J.C., “Distillation. Absorption, Généralités sur les colonnes de fractionnement”, Technique de l'ingénieur, traité de génie des procédés, J 2 621, 1999.
24. Thoma J., Ould Bouamama B., “Modelling and simulation in thermal and chemical engineering, bond graph approach”, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2000.
25. Targui B., Farza M., Hammouri H., Jallut C., “A simple non linear observer for feed and tray compositions for binary distillation columns”, European Symposium on Computer Aided Process Engineering, ESCAPE 11, Denmark, 2001, Supplementary volume, 121-126
26. Targui B., Farza M., Hammouri H., Jallut C., “Sur la modélisation dynamique et la synthèse d'observateurs pour les colonnes à distiller”, 8^e Congrès Français de Génie des Procédés, Nancy, 17-19 octobre 2001.
27. Breedveld P., Couenne F., Jallut C., Maschke B., Tayakout M. – Fayolle, “Using bond graph formalism to build dynamic models in chemical engineering, an introductory example”, ECCE4, Grenade, 21-25 September 2003.
28. Latreche S., Khemliche M., Mostefai M., “Modeling and Simulation of the Distillation Column Boiler”, Asian Journal of Information Technology 5(8): 823-828, 2006.
29. Ould Bouamama B., Thoma J. and Cassar J. P., “Bond graph modelling of steam condenser”, In: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetic, pp. 490-494, Orlando (USA), 1997.

Références bibliographiques

30. Medjaher K. and Samantary A. K., Ould Bouamama B. “Bond graph model of a vertical U-tube steam condenser coupled with a heat exchanger”, International journal of simulation modelling practice and theory, page 228-239, 17, 1 (2009).
31. Merabtine A., “Modélisation Bond Graphs en vue de l’Efficacité Énergétique du Bâtiment“ ; Université de Lorraine, Faculté des sciences et Technologies ; Université de Nancy, 19 Novembre 2012.
32. Samantaray A. K., Ould Bouamama B., “Model-Based Process Supervision: A Bond Graph Approach”, Springer Amazon France, 2008.
33. Khemliche M., Badoud A. and Latrèche S., “Bond Graph Modeling for Fault Detection and Isolation of an Ultrasonic Linear Motor”, Leonardo Journal of Sciences, ISSN 1583-0233, Issue 16, January-June 2010, p. 125-144.
34. Raudensky M., Hnizdil M., Hwang J. Y., Lee S. H., Kim S. Y., “Influence of the water temperature on the cooling intensity of mist nozzles in continuous casting”, Materiali in tehnologije / Materials and technology 46 (2012) 3, 311–315, UDK 621.74.047:536.2 ISSN 1580-2949
35. Badoud A., Khemliche M. and Latreche S., “Modeling, simulation and monitoring of nuclear reactor using directed graph and bond graph”, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, January 2009, volume 37, ISSN 2070-3740©2009 WASET.org
36. Mukherjee A., Samantaray A. K., “Bond Graph in Modeling, Simulation and Fault Identification”, I. K. International Pvt Ltd, 2006.
37. Busson F., "Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés", Thèse de Doctorat de l’Université, USTL Lille, 20 décembre 2002.
38. El Harabi R., “Supervision des processus chimiques à base de modèles Bond Graphs”, Thèse de Doctorat Co-tutelle entre les Universités Lille1 - Gabes, 02 Juillet 2011.
39. Medjaher K., “Contribution de l’outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision des processus industriels”, Thèse de Doctorat de l’Université, 2005.
40. Mrani Alaoui R., “Conception d’un module de diagnostic à base de suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques : application en ligne à un générateur de vapeur”, Thèse de Doctorat de l’Université, 2004.
41. Bahroun S., Couenne F., Hoang N.H., Jallut C., Le Gorrec Y., “Thermodynamic methods for automatic control of chemical reactors”, SFGP 2011.
42. Franco A.A., Schott P., Jallut C., Maschke B., “Multi-scale Bond Graph model of the Electrochemical Dynamics in a PEFC”, orally presented and in Proceedings of the 5th MATHMOD Conference, Vienna, February 8-10, 2006 (ISBN 3-901608-25-7).

Références bibliographiques

43. Latreche S., Mostefai M., Badoud A. E. & Khemliche M. International Journal of Computer and Information Technology (ISSN: 2279-0764), Volume 03 – Issue 06, November 2014. Modelling and Monitoring of a Distillation Column.
44. Latreche S., Mostefai M. & Khemliche M. Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583-0233, Issue 25, July-December 2014 p. 97-110. Optimal sensors placement for monitoring a steam condenser of the distillation column using bond graph approach.
45. Raudensky M., Hnizdil M., Hwang J. Y., Lee S. H., Kim S. Y., Influence of the water temperature on the cooling intensity of mist nozzles in continuous casting, Journal of materiali in tehnologije / Materials and Technology, 2012, 3, p. 311-315.
46. Nan T., Jinjia W., Jiabin F., Experimental and numerical study on the thermal performance of a water/steam cavity receiver, Energies Journal, 2013, 6(3), p. 1198-1216.
47. Kozak D., Ivandic Z., Kontajic, P, *Determination of the critical pressure for a hot-water pipe with a corrosion defect*, Materiali in tehnologije / Materials and Technology, 2010, 6, p. 385-390.
- [48] Elka, E., Elata, D. and Abramovich, H., “The electromechanical response of multilayered piezoelectric structures,” Journal of Micro Electromechanical Systems, vol. 13, no. 2, pp. 332–341, 2004.
- [49] Bullo M., Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive, Thèse de Doctorat de l’EPF de Lausanne, 2005.
- [50] Shuichi, K., Hiroshi, Y., Daisuke, K., Kentaro, N.; Traveling wave type ultrasonic linear motor using twin bending bars, Physics Procedia Volume 3, Issue 1, 1 January 2010, Pages 1053–1058.
- [51] Helin, P., Sadaune V., Druon C., and Tritch J. B., A Mechanical Model for Energy Transfer in Linear Ultrasonic Micromotors Using Lamb and Rayleigh Waves, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1998, 3(1), p. 3-8.
- [52] Szlabowicz W., Contribution au dimensionnement et à la réalisation d’actionneur piézoélectrique à rotation de mode fort couplé pour des applications aéronautiques, Thèse de Doctorat de l’INPT de Toulouse, 2006.
- [53] Chen W.M., Liu T.S., Modeling and experimental validation of new two degree-of-freedom piezoelectric actuators, Mechatronics 23 (2013) 1163–1170, journal homepage: www.elsevier.com/locate/mechatronics.
- [54] Boumous Z., Belkhiat S., Kebbab F.Z., Effect of shearing deformation on the transient response of a traveling wave ultrasonic motor. Sensors and Actuators A Physical 150 (2009) 243-250.
- [55] Fernandez Lopez J., Modeling and optimization of ultrasonic linear motors, Thèse de Doctorat de l’EPF de Lausanne, 2006.

Références bibliographiques

[56] Kandare G., Wallaschek J., Derivation and validation of mathematical model for traveling wave ultrasonic motors, *Smart Materials and Structures*, 2002, 11, p. 565-574.

[57] Latreche S., Mostefai M., Meddad M., Eddiai A., Sahraoui B., Khemliche M. & Badoud A.E, Modelling and Diagnostic of an Ultrasonic Piezoelectric Actuator, *Molecular Crystals and Liquid Crystals Journal*, Taylor&Francis Edition. Thomson Reuters IF = 0.49 <http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2015.1137121>. ISSN online: 1563-5287, ISSN print: 1542-1406, Volume 628, Issue N°1, pages 23-40, 2016.



Curriculum Vitae –LATRECHE Samia

I. Publications Internationales :

1. Molecular Crystals and Liquid Crystals Journal, Taylor&Francis Edition. Thomson Reuters IF = 0.49 <http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2015.1137121>. ISSN (online): 1563-5287, ISSN (print): 1542-1406, Volume 627, Issue N°1, pages 1-19, 2016. “Modelling and Diagnostic of an Ultrasonic Piezoelectric Actuator”. **Samia LATRECHE**, Mohammed MOSTEFAI, Mounir MEDDAD, Adil EDDIAI, Bochta SAHRAOUI, Mabrouk KHEMLICHE & AbdEssalam BADOUD
2. International Journal of Computer and Information Technology (ISSN: 2279-0764), Volume 03 – Issue 06, November 2014. Modelling and Monitoring of a Distillation Column. **Samia LATRECHE**, Mohammed MOSTEFAI, AbdEssalam BADOUD & Mabrouk KHEMLICHE.
3. Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583-0233, Issue 25, July-December 2014 p. 97-110 Optimal sensors placement for monitoring a steam condenser of the distillation column using bond graph approach, **Samia LATRECHE**, Mohammed MOSTEFAI, Mabrouk KHEMLICHE.
4. Leonardo Journal of Sciences ISSN 1583-0233 Issue 16, January-June 2010 p. 125-144. Bond Graph Modelling for Fault Detection and Isolation of an Ultrasonic Linear Motor. Mabrouk KHEMLICHE*, AbdEssalam BADOUD & **Samia LATRECHE**.
5. JJMIE Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Volume 4, Number 2, March 2010, pages : 234-245, ISSN 1995-6665 “Elaboration of Supervision Process Applied to The Pressurized Nuclear Reactor Using Graphical Approach”. AbdEssalam BADOUD, Mabrouk KHEMLICHE and **Samia LATRECHE**.
6. International Journal of Signal System Control and Engineering Application 1 (4): 211-222, 2008 ISSN: 1997-5422 © Medwell Journals, 2008 pp.211-222. Modeling, Simulation and Monitoring of Nuclear Reactor Using Directed Graph and Bond Graph. AbdEssalam BADOUD, Mabrouk KHEMLICHE & **Samia LATRECHE**.
7. Asian Journal of Information Technology 5(8) : 823-828, 2006 © Medwell Journals, Modeling and Simulation of the Distillation Column Boiler. **Samia LATRECHE**, Mabrouk KHEMLICHE & Mohammed MOSTEFAI

II. Communications Internationales :

1. AbdEssalamBadoud and **SamiaLatreche**. Performance evaluation of solar tracking photovoltaic systems operating in highlands regions of Algeria, International Electrical and Computer Engineering Conference IECEC'2015, May 23-25, 2015, Setif, ALGERIA.
2. AbdEssalamBadoud, MabroukKhemliche and **SamiaLatreche**. Renewable Energies and the Sustainable Development in Algeria: Now...Tomorrow, First International conference on solar energy INCOSOLE'2015, May 04-05, 2015, BordjBouArreridj, ALGERIA.
3. AbdEssalamBadoud, **SamiaLatreche**. Modeling, simulation and development of new maximum power point for solar car application, First International conference on solar energy INCOSOLE'2015, May 04-05, 2015, BordjBouArreridj, ALGERIA.
4. MabroukKhemliche and **SamiaLatreche**. Modeling and monitoring of an electromechanical system using bond graph approach. The 1st International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics ICAID 2015 March 29-30, 2015, Djelfa, ALGERIA
5. **SamiaLatreche**, Mohammed Mostefai, MabroukKhemliche and AbdEssalamBadoud. Modeling, Simulation and Diagnosis of an Ultrasonic Piezoelectric Actuator, 13th International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials ICFPAM 2015, March 30 – April 2, 2015, Marrakech, MOROCCO.
6. **SamiaLatreche**, MabroukKhemliche, Mostefai Mohammed and AbdEssalamBadoud. Evolution of thermal and hydraulic energy in a boiler with natural circulation, CEFSD'2015, March 16-18, 2015, Hammamet, TUNISIA.
7. MabroukKhemliche, Amar Khenfer and **SamiaLatreche**. Sensors placement for faults detection in the photovoltaic system, IREC'2015, March 24-26, 2015, Sousse – TUNISIA.
8. **SamiaLatreche**, Mohammed Mostefai, MabroukKhemliche and AbdEssalamBadoud. Implementation of an MPPT algorithm and supervision of the shading on the photovoltaic panel, IREC'2015, March 24-26, 2015, Sousse – TUNISIA.
9. **SamiaLatreche**, M. Khemliche. Design of the MPPT in PV system based on PIC18F4550 microcontroller, 2ème ConférenceInternationale des Energies Renouvelables, CIER'14, 19 – 21 Décembre 2014, Monastir – TUNISIE.
10. **SamiaLatreche**, M. Khemliche. Réalisation de la commande d'un suiveursolaire, 2ème ConférenceInternationale des Energies Renouvelables, CIER'14, 19 – 21 Décembre 2014, Monastir – TUNISIE.
11. AbdEssalamBadoud, **SamiaLatreche**, M. Khemliche. Bond graph algorithm for MPPT control of photovoltaic arrays, 2ème ConférenceInternationale des Energies Renouvelables, CIER'14, 19 – 21 Décembre 2014, Monastir – TUNISIE.

12. RahmaAyat,**SamiaLatreche**, M. Khemliche.Amélioration des performances du système photovoltaïque par l'approche combinée FLC-PSO, 2ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables, CIER'14, 19 – 21 Décembre 2014, Monastir – TUNISIE.
13. Mabrouk Khemliche, **Samia Latreche** and Fayçal Chermat, Modélisation et Simulation d'un générateur photovoltaïque associé à un onduleur, 11ème Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'11, 16-17 Janvier 2013, Université de Bechar-ALGERIE.
14. **Samia Latreche**, M. Khemliche and H.E. Amara. Détection et localisation des défauts dans le chauffage thermique, 11ème Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'11, 16-17 Janvier 2013, Université de Bechar-ALGERIE.
15. Houssemeddine Amara, **SamiaLatreche**, Mabrouk Khemliche. Single screw extruder automation, International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control ICEEAC'2013, November 24-26, 2013, Setif – ALGERIA.
16. Fayçal Chermat, Mabrouk Khemliche, AbdEssalam Badoud & **SamiaLatreche**, "Disturbances observation of solar tracker feeding a boiler". VI ème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement CERE 19-21 Mars 2012, Hammamet- TUNISIE.
17. Mabrouk Khemliche, AbdEssalam Badoud & **SamiaLatreche**, "Fault Detection and Isolation of an Ultrasonic Linear Motor". 2nd International Conference on Information Processing and Electrical Engineering ICIPEE'12. 14-16 April 2012, Tebessa - ALGERIA.
18. A. Badoud, M. Khemliche & **SamiaLatreche**, "Bond graph modeling and control strategy of wind turbine generator for three-phase grid-connected applications". 2nd International Conference on Information Processing and Electrical Engineering ICIPEE'12. 14-16 April 2012, Tebessa -ALGERIA.
19. AbdEssalam Badoud, Mabrouk Khemliche and **SamiaLatreche**. Design of the instrumentation architecture for the modeling of an electrohydrostatic actuator of flight control, International Conference on Industrial Engineering & Manufacturing ICIEM'10, 09-10 May 2010, Batna - ALGERIA.
20. AbdEssalam Badoud, Mabrouk Khemliche et **SamiaLatreche**, Les Bond graphs pour la modélisation, la simulation et la commande des performances d'un système photovoltaïque. Colloque International Francophone Ingénierie et Environnement CIFIE2010, 18-19 Octobre 2010, Annaba - ALGERIE.
21. Mabrouk Khemliche, AbdEssalam Badoud and **SamiaLatreche**. Bond Graph modeling, control and simulation of the photovoltaic system performances. EFEEA'2010, International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications. Ghardaïa, Algeria, 02-04 November 2010.
22. AbdEssalam Badoud, Mabrouk Khemliche et **SamiaLatreche**, Modélisation et diagnostic des défauts dans une voiture solaire par l'approche Bond graph. 1ère Conférence Maghrébine C2MSI'09. Souk Ahras 28-29 Avril 2009.
23. AbdEssalam Badoud, Mabrouk Khemliche et **SamiaLatreche**. Modeling, simulation and monitoring of ultrasonic linear motor by Bond Graph approach. 2ème

Conférence Internationales sur les sciences de la Mécanique CISM'08. Oum El Bouaghi, Algérie, les 16, 17 et 18 Novembre 2008.

24. Mabrouk Khemliche, **Samia Latreche** & Abdessalam Badoud. Modelling of a continuous stirred tank reactor for online fault detection and isolation. The 4th international symposium on hydrocarbons & chemistry ish04. Boumerdes, march 24-26, 2008.
25. Mokeddem Diab, **Samia Latreche**, Khemliche Mabrouk et Badoud Abdessalam. Stratégie de modélisation et de contrôle neuronal du PH. LAMOS 2007 Béjaia, 18-20 Novembre 2007.
26. Mabrouk Khemliche, Lakhdar Aggoune, **Samia Latreche**. Modélisation et Simulation d'une station d'épuration. CIP'2007- Sétif November, 03-04, 2007.
27. Mabrouk Khemliche, **Samia Latreche**. Monitoring and Simulation of the optimal Sensors Placement. MS'07 Algiers July 2-4, 2007.
28. Mabrouk Khemliche and **Samia Latreche**. Modeling and Simulation of the distillation column boiler. IMESE'06 November 4-6, 2006, Djelfa - ALGERIA.
29. Mabrouk Khemliche, **Samia Latreche** and Belkacem Ould Bouamama. Sensors placement on three tanks system by bond graph approach. ICCMD'06, 22-24 Mai 2006, Annaba-ALGERIA.
30. Mabrouk Khemliche, Ismail Dif and **Samia Latreche**. Modeling and analysis of an active suspension $\frac{1}{4}$ of vehicle with bond graph. ICEEA'06, 22 - 23 Mai 2006 - Sidi Bel Abbès.
31. Modélisation et Simulation d'un Chauffage Thermique par bond-graph. 3^{ème} Conférence Internationale sur la productique CIP'2005, 03 - 04 Décembre 2005 Tlemcen - Algérie. Mabrouk Khemliche et **Samia Latrèche**.
32. Modelling and Simulation of the Reboiler of a discontinuous distillation column by the Bond-Graph Approach. 3^{ème} Conférence Internationale sur la productique CIP'2005, 03 - 04 Décembre 2005 Tlemcen - Algérie. **Samia Latrèche**, Mohammed Mostefai and Mabrouk Khemliche

III. Communications nationales :

1. Conception d'une architecture d'instrumentation en vue de la supervision d'un système de remplissage à gaz, application sur l'unité d'EL EULMA. 7^{èmes} Journées de la Mécanique, EMP07. Bordj El Bahri, 12-13 Avril 2010. Badoud AbdEssalam, Khemliche Mabrouk et **Latrèche Samia**.
2. Placement de capteurs pour le diagnostic des défauts dans un carrousel de remplissage à gaz. Embedded Systems Conférence ESC09. Bordj El Bahri, 05-06 Mai 2009. Badoud AbdEssalam, Khemliche Mabrouk et **Latrèche Samia**.
3. Modélisation, simulation et commande d'un processus en génie des procédés par l'approche énergétique. 4^{ème} Congrès Algérien de Génie des Procédés. Alger 4-6 Mai 2009. Badoud AbdEssalam, Khemliche Mabrouk et **Latrèche Samia**.

4. Identification et diagnostic d'une machine asynchrone par réseaux de neurones. 6èmes journées de Mécanique JM 06 EMP. Bordj El-Bahri, 15-16 Avril 2008. A. Badoud, M. Khemliche et **S. Latrèche**.
5. Diagnostic de défauts dans un système cardiovasculaire. Première Ecole de Physique Appliquée aux Sciences de la Vie EPASV 2008. Es-Senia Oran, Algérie du 05 au 09 Avril 2008. BadoudAbdEssalam, Khemliche Mabrouk et **Latrèche Samia**.
6. Modélisation et Simulation d'un procédé de traitement biologique des eaux. COME-07 Skikda 01-02 Décembre 2007. Aggoune Lakhdar, Mabrouk Khemliche et **Samia Latrèche**.

IV. Projets de Recherche

A. Projet PNR

Optimisation économique et diagnostic d'un système de production d'énergie photovoltaïque associé à un système de stockage d'énergie. MabroukKhemliche, KamelEddineHemsas, **SamiaLatrèche**, AbdEssalamBadoud, BachirBourouba et AlaeddineBounab.

B. Projets CNEPRU

1. Surveillance des Systèmes Multi-Energies par le Modèle Bond-Graph. Mohammed Mostefai, MabroukKhemliche, **SamiaLatrèche**, AthmaneLamamra, KhierBenmahammed et Laid Abed, CNEPRU N° J1901/16/05 (agréé à partir du 01/01/2005).
2. Surveillance de l'alimentation en eau d'un immeuble multi-niveaux par placement de capteurs sur le modèle bond graph. MabroukKhemliche, AthmaneLamamra et **SamiaLatrèche**. CNEPRU N° J0201220060075 (agréé pour 3 ans à partir du 01/01/2007).
3. Modélisation et Surveillance d'un Chargeur de Séchoir Roulant d'une Briqueterie (Type SPMC - CERIC) par l'approche bond graph. MabroukKhemliche, **SamiaLatrèche**, AbdEssalamBadoud. CNEPRU N° J0201220080026 (agréé pour 3 ans à partir du 01/01/2009).
4. Modélisation et diagnostic d'un générateur solaire photovoltaïque par les techniques analytiques et graphiques. MabroukKhemliche, AthmaneLamamra, **SamiaLatrèche**, AbdEssalamBadoud. CNEPRU N° J0201220100012 (agréé pour 01/01/2011).
5. Dimensionnement, Optimisation et Gestion d'une Installation Hybride Eolienne-Photovoltaïque par les Techniques Intelligentes, MabroukKhemliche, **SamiaLatrèche**, AbdEssalamBadoud, FayçalChermat, HoussemeddineAmara. CNEPRU N° J0201220140017 (agréé pour 01/01/2015).

V. Encadrement de mémoires de fin d'étude

A. Masters

1. Nouioua Said, soutenu le 18 Juin 2015, Conception et diagnostic d'une micro-pompe à actionnement piézoélectrique.
2. Benbekai Adel, soutenu le 17 Juin 2015, Modélisation et simulation des effets de l'accumulation de glace sur les pales éoliennes.
3. Ziani Radhia, soutenu le 17 Juin 2015, Commande et Optimisation de la puissance dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne.
4. Kebaili Yacine (juin 2014), Réalisation et utilisation de la commande adaptative pour le réglage de la position d'un panneau solaire.
5. Mechmeche Djalila (juin 2014), Modélisation et surveillance d'une chaudière murale par les techniques analytique et graphique.
6. Benaziz Daoud (juin 2013), Poursuite du MPP dans une installation photovoltaïque à base de microcontrôleur PIC18F4550 : conception et réalisation
7. Ghamra Abdel Bassat, Surveillance par bond graph des accumulateurs photovoltaïques. Soutenu le 30/06/2012.
8. Souadek Lazhar. Soutenu le 28/06/2012, Modélisation graphique et analytique d'une extrudeuse automatisée mono vis.
9. Bouafassa Amar, Surveillance par Bond graph d'un robot manipulateur, Soutenu le 03/07/2011.
10. Amara Houssemeddine, Automatisation d'une extrudeuse mono vis, Soutenu le 02/07/2011.
11. Laïb Ilhem, Automatisation de l'unité ENPEC, Soutenu le 03/07/2011.

B. Ingénieurs d'état

1. Surveillance des plateaux d'une colonne de distillation par placement de capteurs. 2005.
2. Modélisation et Simulation d'une chaudière à circulation naturelle. 2005
3. Modélisation et Simulation du rebouilleur de la colonne de distillation 2006
4. Surveillance du condenseur de la colonne de distillation. 2006
5. Détection et localisation des défaillances dans le rebouilleur de la colonne de distillation par l'outil bond-graph. 2006

6. Modélisation et surveillance d'un moteur à courant continu par l'approche bond-graph 2007
7. Diagnostic d'une chaudière par l'approche bond-graph 2007
8. Modélisation graphique de l'onduleur par l'approche bond-graph 2008
9. Conception, montage et modélisation d'une station d'enrobage. 2008
10. Détection et localisation de défauts sur un système électromagnétique. 2009
11. Modélisation d'un échangeur de chaleur par les approches Bond-graph/Matlab-Simulink. 2009
12. Etude comparative Matlab/Symbols en vue de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. 2010
13. Contrôle d'une turbine à gaz Turbo Expander par le processus DCS. 2010
14. Modélisation et simulation d'un système de remplissage à gaz. 2010
15. Modélisation analytique et graphique de l'unité de production d'huile CeVital 2011