

Table des matières

Remerciements	1
Introduction	3
1 État de l’art sur le placement de capteurs	5
1.1 Introduction	5
1.2 Quelques définitions	5
1.3 Analyse des différentes méthodes de placement de capteurs	7
1.3.1 Méthodes sans modèles	7
1.3.1.1 Approche neuronale - RN	8
1.3.1.2 Algorithmes génétiques - GA	8
1.3.1.3 Algorithme du recuis simulé - SA	8
1.3.1.4 Algorithme itératif d’insertion/suppression - I/D	8
1.3.2 Méthodes avec modèles	9
1.3.2.1 Placement de capteurs pour l’observabilité et l’estimation	9
1.3.2.2 Placement de capteurs et surveillance	10
1.3.2.3 Critères d’optimisation du placement de capteurs	11
1.3.2.4 Placement de capteurs sur graphe biparti orienté	12
1.3.3 Intérêt des modèles bond graphs	12
1.3.3.1 Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic	13
1.3.3.2 Diagnostic par bond graph quantitatif	15
1.4 Conclusion	18
2 Modélisation bond-graph	19
2.1 Introduction	19
2.2 Généralités sur les bond graphs	20
2.2.1 Définition	20
2.2.2 Eléments Bond Graph à un port	20

2.2.2.1	Représentation	20
2.2.2.2	Utilisation des variables dans la modélisation bond graph . .	21
2.2.2.3	Eléments passifs	23
2.2.2.4	Eléments actifs	24
2.2.2.5	Eléments de jonction	24
2.2.3	Eléments bond graphs à 2 ports	25
2.2.3.1	Transformateur TF	25
2.2.3.2	Gyrateur GY	25
2.2.3.3	Carrousel de Thoma	26
2.2.3.4	Liens d'information	26
2.2.4	Eléments bond graph multiports ou champs C, I et R	26
2.2.5	Eléments pseudo bond graph	26
2.2.6	Conservation de puissance et conservation d'énergie	28
2.3	Description des éléments multiports	28
2.3.1	Multiport C	28
2.3.2	Multiport I	29
2.3.3	Multiport mixte IC	30
2.3.4	Multiport R	30
2.3.5	Multiport RS	31
2.4	Analyse des bond graphs couplés	31
2.4.1	Introduction	31
2.4.2	Représentation des BG couplés	32
2.4.3	Variables de puissances intensives et extensives	33
2.4.4	Causalité	34
2.4.4.1	Règle d'affectation de la causalité	35
2.4.4.2	Chemin causal	36
2.4.5	Eléments pseudo bond graph	38
2.4.6	Conservation de puissance et conservation d'énergie	39
2.5	Modèles bond graphs non linéaires des éléments thermofluides	40
2.5.1	Sources thermofluides	40
2.5.2	Processus de transport d'énergie	41
2.5.2.1	Conduite à restriction fixe (figure 2.28(a))	41
2.5.2.2	Conduite à orifice variable (vanne réglable) (figure 2.29(a)) .	41
2.5.3	Processus d'accumulation d'énergie	42
2.5.3.1	Réservoir sous-saturé (figure 2.30(a))	43

2.5.4	Bond graph linéarisé des composants thermofluides	43
2.6	Conclusion	48
3	Identification des défaillances d'un système thermofluide	50
3.1	Introduction	50
3.2	Placement de capteurs à partir des bond graphs	51
3.2.1	Génération des <i>RRAs</i>	51
3.2.2	Algorithme de placement de capteurs	52
3.2.3	Contraintes pour la surveillance des composants	53
3.2.4	Exemple	55
3.2.5	Identification des défaillances:	60
3.2.6	Méthode de placement	60
3.3	Conclusion	62
4	Application à un processus réel	64
4.1	Description du processus de génération de vapeur	64
4.2	Modélisation Bond graph de l'installation [65] et [35]	66
4.2.1	Bond graph à mots	66
4.2.2	Problématique de la modélisation des générateurs de vapeur	66
4.2.3	Réservoir de stockage	68
4.2.4	Circuit d'alimentation en eau	70
4.2.4.1		70
4.2.5	Chaudière	72
4.2.6	Circuit de détente	76
4.2.7	Condenseur (figure 4.9)	79
4.2.7.1	Bond graph à mots	79
4.2.7.2	Modèle bond graph	80
4.2.7.3	Analyse du modèle bond graph	82
4.2.7.4	Simplification du modèle bond graph pour la génération de RRAs	82
4.2.8	Vannes de décharge	87
4.2.9	Génération des <i>RRAs</i> sensibles aux défaillances des actionneurs	88
4.2.10	Génération des <i>RRAs</i> sensibles aux défaillances des systèmes de com- mandes	88
4.3	Analyse de l'installation	89
4.3.1	Signature des pannes	89
4.3.2	Procédures de décision	91

4.4	Essais sur le processus et résultats	91
4.4.1	Fonctionnement normal des résidus	91
4.4.2	Défaillances sur les contrôleurs	92
4.4.3	Signature de pannes du système de surveillance de l'installation	93
4.4.3.1	Défaillances physiques sur le générateur de vapeur	93
4.5	Application de l'algorithme pour la surveillance d'une partie de l'installation	94
4.5.1	Présentation du sous-système étudié	94
4.5.2	Surveillabilité des composants	95
4.6	Conclusion	97
Conclusions générales et perspectives		99
1	Conclusions	99
2	Contributions et résultats de recherche	100
2.1	Publications internationales	100
2.2	Publications nationales	101
2.3	Communications internationales	101
2.4	Communications nationales	101
3	Perspectives	102
Annexes		104
1	Logiciel SYMBOLS 2000	104
1.1	BondPad	104
1.2	Exemple 1 : Modélisation et Simulation	105
1.2.1	Modèle sous BondPad	105
1.2.2	Possibilités de Symbols-2000 Bondpad	105
1.2.3	Aperçu du simulateur de SYMBOLS2000	107
1.2.4	Fenêtre du graphe en ligne	107
1.3	Exemple 2 : Diagnostic et Simulation	108
1.3.1	Modèle d'une vanne pneumatique sur Symbols2000	108
1.3.2	Modèle bond graph pour contrôler l'écoulement du fluide (figure 10) :	108
1.3.3	Modèle bond graph pour contrôler la position de la tige (figure 11) :	108
1.3.4	Simulation de la position de la tige (figure 14)	108
2	Fonctions thermodynamiques[78]	109
Bibliographie		119

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein d’une collaboration entre le Laboratoire d’Automatique et d’Informatique Industrielle de Lille (*LAIL*) et le Laboratoire d’Automatique de Sétif (*LAS*).

Je tiens tout d’abord à remercier M. Abdelhafidh Khellaf, Professeur à l’Université de Sétif et mon encadreur principal en Algérie, pour sa présence sans relâche à mes cotés depuis une décennie. 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 les Professeurs Marcel Staroswiecki et Mireille Bayart pour leur accueil au sein du laboratoire, ainsi que dans l’équipe de Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques qu’ils animent.

Je remercie M. Belkacem Ould Bouamama, Professeur à l’Université de Lille¹, pour ses contributions dans le domaine des bond graphs sont mondialement reconnues. Il m’a ouvert les portes du savoir et m’a montré la démarche qui m’a permis de mieux cerner les problèmes. J’ai beaucoup appris de son sens de la rigueur. Je le remercie infiniment.

Tous mes remerciements vont aux membres du jury de la soutenance de thèse.

M. Raïs El-Hadi Bekka, Professeur à l’Université de Sétif, me fait un grand honneur d’accepter de présider mon jury de soutenance.

M. Rachid Abdessemed, Professeur à l’Université de Batna, dont son expérience lui confère une place honorable dans ce jury.

M. Khaled Belarbi, Professeur à l’Université de Constantine, je le remercie infiniment d’avoir accepté de juger ma thèse après m’avoir encadré en Magister.

M. Mohammed Mostefaï, Maître de Conférence à l’Université de Sétif et Directeur de recherche des travaux du Laboratoire d’Automatique de Sétif (*LAS*). L’intérêt qu’il manifeste à mon travail me fait un grand plaisir; je le remercie vivement d’avoir à examiner ma thèse.

M. Djamel Chikouche, Professeur à l’Université de Sétif et Responsable de la recherche au niveau de notre faculté, me fait un grand plaisir d’accepter d’être notre invité d’honneur.

A un niveau plus personnel, je tiens à remercier Samia, mon épouse, d’avoir accepté de prendre en charge, en plus de son activité professionnelle, toute la gestion familiale, et

d'avoir été un soutien moral inébranlable, même dans les moments difficiles. Je remercie aussi mes enfants Hamza, Imène, Meriem, Ibrahim et Aya pour avoir accepté, surtout pendant les derniers mois où je cumulais rédaction de la thèse et activité professionnelle, un père si peu présent.

Que le personnel et les chercheurs du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille qui ont contribué à rendre mon séjour en France agréable trouvent ici une expression de ma reconnaissance envers leur amitié sincère et leur noble gentillesse.

Enfin, que tout 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.

Introduction

Ce travail de recherche a été réalisé au labo *LAIL* dans le cadre d'une thèse en co-tutelle entre l'*UFAS* et l'*USTL* suite à une bourse de coopération Algéro-Française (*BAF*).

Une installation pilote d'un générateur de vapeur existe au laboratoire d'automatique et d'informatique industrielle de Lille et présente l'inconvénient d'être munie d'un grand nombre de capteurs placés aléatoirement., ce qui a relevé le problème d'optimisation du nombre et de la position de ces capteurs. Pour assurer l'identification des défaillances dans l'installation, il fallait, tout d'abord, concevoir une architecture pour la détection par placement de capteurs puis profiter des propriétés structurelles et causales des bond graphs pour la localisation de ces défaillances.

Les méthodes de placement de capteurs pour la surveillance sont principalement basées sur deux approches : les méthodes avec modèle et méthodes sans modèle. On a opté pour celles avec modèle choisi graphique qui est le modèle bond-graph car dans la pratique, l'ingénieur automaticien doit se contenter de descriptions graphiques, qui interconnectent un certain nombre de sous-systèmes représentant des équipements élémentaires (réservoir, pompe, vanne, ...) ou complexes (générateur de vapeur, colonne de distillation, colonne de déshydratation, four de recyclage, ...).

Sur la base de cette problématique, une méthode originale vient d'être élaborée sur le modèle bond graph correspondant à un réseau de réservoirs commandés par des vannes et alimentés par une pompe. Le placement de capteurs est assuré par des variables binaires justifiant le placement ou non des capteurs les résidus générés permettent de décider sur la détection et la localisation des défaillances. Un problème combinatoire surgit ce qui oblige l'élaboration d'un algorithme qui a permis la lecture directe des résidus et par conséquent l'élimination de cette difficulté combinatoire.

Une deuxième méthode consiste en la génération des relations de redondance analytique (*RRAs*) afin de visualiser des propriétés causales et comportementales, et par la déduction systématique des modèles mathématiques du modèle bond graph. Par son organisation causale, le bond graph permet aussi de mettre en évidence les causes et effets, ce qui permet de retrouver les origines des alarmes.

L'identification des défaillances, avec ses étapes préliminaires, détection et localisation,

mais aussi le choix et le placement des capteurs trouve un intérêt à l'existence d'un tel modèle. C'est dans ce contexte que l'utilisation d'une seule représentation (le bond graph), pour la modélisation et la surveillance a été développée.

La thèse est organisée comme suit :

Afin d'esquiver les travaux déjà réalisés un état de l'art sur le placement de capteurs en vue de l'identification des défaillances s'est avéré indispensable. Un premier aperçu des méthodes existantes nous a orienté vers le modèle bond graph.

La deuxième partie est consacrée à la mise en place d'une méthode permettant de détecter, d'isoler et d'identifier les défaillances survenant au sein d'un système thermofluide modélisé par un bond graph. Toutefois, il est montré comment on peut analyser la surveillabilité des composants sans avoir besoin de calculer les identificateurs de fautes.

La troisième partie présente une description des propriétés des modèles bond graph multi-énergies pour la modélisation des processus thermofluides.

Enfin, dans la quatrième partie, les outils développés sont appliqués à l'installation pilote de génération de vapeur reproduisant les phénomènes thermofluides rencontrés dans les centrales thermiques. La simulation sur le logiciel *Symbols2000* nous montre comment évolue l'architecture d'instrumentation finale qui permet la surveillance du système global.

Une conclusion générale et des perspectives sont données à la fin du document.

En annexe est présentée une description du logiciel utilisé *Symbols2000*.

Chapitre 1

État de l'art sur le placement de capteurs

1.1 Introduction

Il est toujours indispensable d'entamer un travail de recherche par un état de l'art sur les travaux réalisés précédemment. L'élaboration d'un thème de recherche doit tenir compte des travaux existants. Il doit être soit une continuité soit une amélioration soit totalement différent. Avant d'opter pour la méthode à base de modèle graphique (bond graph), un bref aperçu des méthodes sans modèles ainsi que celles avec modèles autres que le bond graph a été établi (voir références).

1.2 Quelques définitions

Donnons quelques définitions pour la suite de notre travail :

Définition 1 *Un **processus industriel** est un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de façon à former une entité unique accomplissant ou pouvant accomplir une activité clairement définie (i.e. colonne de distillation, générateur de vapeur, ...).*

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

Définition 2 *L'**architecture** du système est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau de composants industriels.*

Définition 3 *Le terme **faute (ou défaut)** est généralement défini comme une déviation d'une variable observée ou d'un paramètre calculé par rapport à sa valeur fixée dans les carac-*

téristiques attendues du processus lui-même, des capteurs, des actionneurs ou de tout autre équipement.

Il existe une progression dans la sévérité des défauts [8] : naissant, passager, permanent et catastrophique. Les défauts sont classés selon leur origine en :

- **Défauts capteur.** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure. On classe ces défauts en fonction de leur type en : biais, dérive, modification du gain de mesure, valeurs aberrantes, blocage du capteur à une valeur atteinte ou à une coupure électrique du capteur.
- **Défauts d'actionneurs.** Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et la sortie (la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique).
- **Défauts du processus physique.** Ces défaillances sont dues à des modifications de la structure (fuite, rupture d'un organe,...) ou des paramètres du modèle (encrassement d'un tube d'un four, bouchage partielle d'une conduite, ..).
- **Défauts du système de commande.** Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur et sa mesure.

Définition 4 La cause sous-jacente à cet état anormal est appelée **défaillance**. Une défaillance est une modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions fixées.

Définition 5 Une **panne** est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser sa fonction requise.

Définition 6 Une **erreur** est définie comme l'écart entre une valeur mesurée ou estimée d'une variable et une valeur spécifiée par un capteur étalon ou jugée (par un modèle) théoriquement correcte.

Définition 7 Les **symptômes** sont les traductions d'un changement d'un comportement d'une variable détectée par comparaison à des valeurs de référence.

Définition 8 Les **contraintes** sont les limitations imposées par la nature (lois physiques) ou l'opérateur.

Définition 9 Un **résidu** ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle.

Définition 10 Une variable est surveillable si et seulement s'il est possible de détecter et d'isoler les défaillances qui peuvent l'affecter.

Le présent chapitre est consacré à l'étude de l'art dans le domaine du placement de capteur en vue de surveiller les processus industriels. Sur la base de l'analyse de ces travaux, différentes méthodes de placement de capteurs seront analysées et seront classifiées en méthodes sans modèle et méthodes avec modèle. La problématique et le positionnement de notre travail seront exposés à la fin de cette partie.

1.3 Analyse des différentes méthodes de placement de capteurs

En fonction du type de connaissance utilisée pour l'étude du placement de capteurs en vue de la surveillance ou de la commande, on distingue globalement deux types de méthodes : les méthodes à base de modèles et les méthodes sans modèles. Dans le premier cas, on utilise un modèle analytique (statique ou dynamique) et dans le deuxième cas sont utilisées des connaissances à priori déduites à base d'apprentissage. Une méthodologie de base pour le placement de capteurs a été décrite dans [72].

1.3.1 Méthodes sans modèles

Dans cette approche, on analyse des données fournies par le système qui permettent de décider de son état. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou à l'intelligence artificielle. Contrairement aux techniques utilisées en automatique classique où l'on traite les problèmes numériquement en utilisant surtout les propriétés des équations différentielles, en intelligence artificielle, on travaille essentiellement en symbolique [21]. Les problèmes sont alors combinatoires et l'on utilise la logique; on cherche à représenter les connaissances de sens commun, à modéliser la façon dont un individu raisonne. L'intelligence artificielle apporte des solutions intéressantes aux problèmes de supervision, comme un outil de plus dans la panoplie des techniques utilisées. En effet, dans le contexte de la supervision, les données traitées sont très variées (qualitative, logique, analogique, ...) et imprécises (bruit de mesure), ce qui introduit des doutes dans la validité des modèles numériques utilisés dans les techniques à base de modèle.

L'approche par reconnaissance de formes des problèmes de surveillance des systèmes se base sur la connaissance d'un ensemble de mesures effectuées sur le processus et des états de fonctionnement associés. Ces techniques supposent la connaissance à priori de tous les états de fonctionnement (normal et en fautes), et ne prennent pas en compte l'évolution du système.

On va décrire une méthode de classification et de localisation basée sur une approche neuronale RN , puis on introduit des méthodes combinatoires afin de déterminer la distribution optimale des capteurs, ces méthodes sont : placement de capteurs par insertion/suppression

I/D , par les algorithmes génétiques GA et par l'algorithme du recuit simulé SA (simulated annealing). Ce qui attire l'attention récemment, c'est comment optimiser le nombre de capteurs avec les meilleurs placements possibles pour une application particulière.

1.3.1.1 Approche neuronale - RN

L'analogie entre la biologie et la physique fait que des chercheurs ont opté pour la méthode basée sur les réseaux de neurones RN artificiels qui se basent sur la morphologie du cerveau [88] et [87].

1.3.1.2 Algorithmes génétiques - GA

Les algorithmes génétiques GA sont des algorithmes d'optimisation ayant des solutions qui évoluent d'une manière analogue au principe de la sélection naturelle de Darwin [27]. Comme résultat, le statut de la solution de GA n'est pas plus sûr que la solution des RN [89]. En 1994, C.G.Frauchi [20], dans un test préliminaire de l'optimisation par GA , le problème de placement de capteurs a été résolu aussi par les GA et la fonction objectif est prise comme le produit de deux termes [87]. Enfin, avec les méthodes génétiques, il n'est pas toujours possible de dire quelle sera la fonction objectif d'un gène parfait [23].

1.3.1.3 Algorithme du recuis simulé - SA

L'algorithme du recuis simulé SA (Simulated Annealing) est basé sur une analogie avec le processus physique du recuit utilisé pour les problèmes d'optimisation ([44] et [14]).

1.3.1.4 Algorithme itératif d'insertion/suppression - I/D

Pour le placement de capteurs par la séquence I/D (Insertion/Deletion), le principe est que si on suppose qu'on a par exemple 20 capteurs à positionner et peuvent seulement être placés aux endroits initialement définis, la première approche de ce problème, est basée sur la mesure de la fonction objectif. L'état initial est supposé dans lequel toutes les positions des capteurs sont occupées, si l'un des capteurs est enlevé, il y aura 20 possibilités pour 19 modèles de capteurs, les données de chacune de ces distributions sont utilisées pour le train du réseaux du diagnostic capable de localiser et de classifier les fautes et est rangé selon l'objectif, le plus convenable est considéré comme la meilleure distribution des 19 capteurs et le capteur omis est de manière permanente supprimé. Ceci quitte la distribution des 19 capteurs et la procédure se répète pour trouver la meilleure distribution des 18 capteurs...etc. C'est un processus long et un procédé a été employé pour permettre l'ajustage avec une précision automatique de beaucoup de réseaux [86].

1.3.2 Méthodes avec modèles

Le placement de capteurs dans le domaine de la surveillance consiste à imposer un cahier de charges de surveillance et à étudier le positionnement de capteurs permettant de le respecter. Cette démarche est l'objet du mémoire de [10] qui s'appuie sur le fait que la conception d'un système de surveillance dépend non seulement du nombre de capteurs mais aussi du choix des mesures. Plusieurs travaux couvrant des domaines d'application variés ont déjà été menés dans ce sens et notamment ceux relatant un lien entre le positionnement de capteurs et la surveillance des vibrations mécaniques [4] et de la production pétrolière [82].

Dans ce cas, on utilise les redondances d'information et la connaissance fournie par le modèle pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système, puis décider s'il est normal ou pas. De nombreux travaux ont été consacrés à la surveillance utilisant un modèle ([29], [19] et [49]). La plupart comprennent trois étapes : dans la première, on calcule des résidus en utilisant la connaissance et les données réelles disponibles. Les résidus sont des variables indicatrices de défauts, dans le sens où leur valeur est nulle lorsque le système se comporte exactement comme son modèle idéal en fonctionnement normal (pas de bruit, pas d'erreur de modélisation, pas d'entrée inconnue, pas d'erreur paramétrique, ...). Ce cas idéal ne se produisant jamais, les résidus diffèrent en général de zéro. Dans ce sens, la deuxième étape de la procédure consiste à séparer les cas dans lesquels la non nullité résulte (des bruits, erreurs de modélisation, entrées inconnues, ...) de ceux dans lesquels elle résulte des défaillances du système. Une troisième étape tente alors de localiser et de diagnostiquer les défaillances supputées. Les méthodes de base sont données en annexe. Notre contribution concerne les méthodes à base de modèle pour la surveillance des processus thermofluides en utilisant un outil unique : les bond graphs. Décrivons maintenant des méthodes basées sur un modèle autre que le bond-graph.

1.3.2.1 Placement de capteurs pour l'observabilité et l'estimation

De nombreux travaux relatifs à l'étude de l'observabilité et à la décomposition des systèmes en parties observables, redondantes et non observables en utilisant les matrices d'incidences [45]. Pour quantifier la redondance d'une variable, deux notions peuvent être utilisées : le degré de redondance [41] et le degré de calculabilité [28].

Placement de capteurs et observabilité La majorité des travaux traitant le problème du positionnement de capteurs en vue de la surveillance, font référence à la notion d'observabilité ou de redondance des variables du système. Ainsi, l'observabilité ou le degré de redondance apparaissent comme une contrainte ou un critère de placement de capteurs. Ces travaux visent à déterminer la liste des variables du système qu'il faut mesurer pour respecter un cahier des charges indiquant la liste des variables devant être observables. L'approche matricielle a été

l'un des outils pour résoudre ce problème [46] et [68], sur la rupture des cycles élémentaires du graphe [51] ou sur l'analyse du graphe orienté pour optimiser le placement de débitmètres dans les systèmes à transport de matière [52] et [53].

Placement de capteurs et estimation L'estimation est une notion importante en surveillance qui peut intervenir à plusieurs niveaux. En effet, le principe de base des systèmes de surveillance repose sur une comparaison entre différentes estimations de la grandeur. Des travaux relatifs au placement de capteurs se sont intéressés à ces différentes estimations. Ils ont permis de montrer l'influence de la précision des capteurs sur l'estimation des valeurs d'un système [69]. L'erreur d'estimation a constitué un critère de placement de capteurs. On peut aussi citer une méthodologie de placement de capteurs sous contrainte de variance de l'estimation [47].

1.3.2.2 Placement de capteurs et surveillance

Les études menées dans le domaine de positionnement de capteurs pour la détection et la localisation des défaillances concernent essentiellement les méthodes de surveillance utilisant une modélisation analytique du système : l'estimation de l'état par observateur et la redondance analytique.

Estimation de l'état par observateur Une méthode de placement de capteurs a été proposée pour détecter, localiser et diagnostiquer les défaillances des systèmes non linéaires en utilisant un observateur linéaire pour estimer l'état du système. Le principe repose sur l'examen des grandeurs estimées et/ou de plusieurs résidus de l'observateur sans utiliser de tests statistiques. Le positionnement de capteurs est obtenu en minimisant le coût d'observation associé à chaque liste de capteurs utilisés pour détecter les défaillances par une recherche exhaustive [85].

La détection Dans le domaine du placement de capteurs pour la surveillance, la détection des changements dans le comportement d'un système dynamique. Ces changements peuvent être dus à la présence d'une défaillance et permettent donc de la détecter voire de la localiser. L'idée de base s'appuie sur la recherche de la meilleure matrice de sélection de capteurs permettant de maximiser les performances du test de détection et de localisation lorsqu'on utilise une approche statistique ou probabiliste. Le critère utilisé est le taux de fausses alarmes que l'on cherche à minimiser[4].

Détectabilité et localisabilité Les notions de détectabilité et de localisabilité ont été exprimées en terme de degré de redondance ou de degré de calculabilité des variables. Ceci a permis de réutiliser les méthodologies de placement de capteurs sous contraintes de degré de

redondance[42] ou de calculabilité [28] et de les formuler en terme de capacité de détection et de localisation des défaillances des capteurs. Pour cela, la variable associée à un capteur doit être redondante de degré 1 pour la détectabilité, et de degré 2 pour la localisabilité.

Analyse structurelle La méthodologie développée dans [10] s'appuie sur l'analyse structurelle et sur la représentation de sa structure sous forme de graphe biparti orienté et l'établissement du schéma d'instrumentation d'une installation permettant de détecter et de localiser les défaillances des composants définis dans le cahier des charges de surveillance.

Une méthodologie de placement des capteurs a été élaborée dans le but de rendre détectable et localisable l'ensemble des défaillances. Le principe de la méthodologie est la représentation des systèmes sous forme de graphes bipartis afin de matérialiser les relations existantes entre les différentes variables du système. Puis comment générer l'ensemble des résidus de ce système en construisant des arbres de résolution en *ET/OU* à partir des variables connues. Et en troisième lieu, vient le problème de structuration des résidus en fonction des relations, cette structuration est justifiée par l'introduction d'une définition généralisée de la notion de défaillance sous le nom de signature de pannes dont l'objectif est de définir les critères de détection et de localisation de défaillances qui servent à l'élaboration d'un algorithme exhaustif et d'un algorithme amélioré qui focalisent la génération des résidus sur les composants à surveiller. Ces algorithmes permettent d'obtenir toutes les solutions de placement de capteurs tout en respectant le cahier des charges de surveillance.

1.3.2.3 Critères d'optimisation du placement de capteurs

Les conditions de surveillance n'imposent pas suffisamment de contraintes pour aboutir à une solution unique au problème de placement de capteurs, le rajout de critères supplémentaires permet d'effectuer un choix parmi les solutions données à partir des algorithmes proposés pour toutes les configurations de placements de capteurs, ces critères sont :

Le coût Le coût est le critère de placement de capteurs complémentaire qui vient à l'esprit. En effet, la surveillance d'un système impose généralement que l'on ajoute des capteurs par rapport à l'instrumentation nécessaire à la commande, ce qui engendre un surcoût dû à l'acquisition des capteurs, à leur maintenance ou à leur exploitation. Le problème de placement de capteurs consiste à définir alors le nombre et la position des capteurs, de façon à assurer un degré de redondance donné aux variables nécessaires à la conduite et à la sécurité [48].

La fiabilité et la disponibilité Une façon d'aborder le problème de l'optimisation du placement de capteurs, en utilisant la contrainte de fiabilité de l'instrumentation d'un système linéaire, est d'exprimer la fiabilité en fonction du degré de redondance des variables en partant

du principe que plus les variables nécessaires à la conduite ou à la sécurité ont un degré de redondance élevé, plus la fiabilité de l'instrumentation est importante [43].

La sensibilité du système de surveillance Les notions de sensibilité et de robustesse ont dans un premier temps été définies par rapport aux résidus. En effet, en l'absence de défaillances $d(t) = 0$, un résidu est nul $r(t) = 0$ on dit alors que ceci exprime la robustesse du résidu et dans le cas contraire on aura un résidu sensible aux défaillances. Il est à noter que cette étude peut être faite même si un modèle comportemental précis de chaque composant n'est pas disponible ce qui permet de tenir compte de l'intégration de la surveillance d'un système dès sa phase de conception. Ces notions de sensibilité et de robustesse peuvent être appliquées au système de surveillance d'une façon plus générale car celui-ci utilise des résidus. La sensibilité peut dépendre de l'amplitude de la défaillance, l'amplitude de l'écart de fermeture des modèles partiels dans lesquels elle intervient, la facilité de détection de cet écart par les procédures de décision. Si on considère un ensemble des événements que l'on souhaite détecter et localiser par la procédure de surveillance, on peut dire que cette dernière est structurellement sensible à tout événement détectable [74].

1.3.2.4 Placement de capteurs sur graphe biparti orienté

La méthode de placement de capteurs pour la surveillance est de concevoir un système de surveillance qui permet de localiser les défaillances des relations de signatures de défaillances définies grâce au cahier des charges : [10], [16] et [34]

1.3.3 Intérêt des modèles bond graphs

Il suit de ce qui est développé précédemment que la modélisation est une étape importante dans la conception des algorithmes de surveillance.

Le modèle bond graph, obtenu à partir d'une analyse énergétique du système physique, est un outil d'aide pour l'analyse des propriétés du système. La surveillance, avec ses aspects détection et localisation des défaillances, mais aussi le choix et le placement des capteurs trouve un intérêt à l'existence d'un tel modèle.

Le modèle bond graph est avant tout un modèle de connaissance pour la simulation. La démarche de l'équipe bond graph du *LAIL* consiste à considérer le modèle bond graph comme un modèle à part entière, constituant un outil d'aide à la modélisation, à la conception, à l'analyse, à la commande et à la surveillance grâce à sa structure causale est originale.

Les premiers travaux sur l'utilisation des propriétés causales des bond graphs pour des problèmes de commande concernaient initialement l'extension de la règle de Mason [7]. Plus tard, le bond graph est utilisé comme outil de calcul formel et d'analyse structurelle pour la résolution de problèmes de commande : commandabilité en sortie, inversibilité, découplage

entrée-sortie, observabilité, placement de pôles etc... Ces méthodes se basent sur le parcours des chemins causaux entrée-sorties de modèles bond graph pour l'analyse des systèmes de commandes linéaires modélisant une seule énergie ([70], [75], [71]).

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 ([50], [40]), étude de l'observabilité pour décider sur le nombre, la position des capteurs et des actionneurs défaillants [18]).

On distingue deux approches d'utilisation du bond graph pour la surveillance des processus industriels : quantitative et qualitative.

- L'approche quantitative est basée sur les lois physiques et nécessite une connaissance profonde de la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Les modèles (sous forme de fonctions de transfert, d'équations d'état, ...) peuvent être obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) ([25], [63]) ou sur la base d'une identification statistique des paramètres ([37], [19]). Ces dernières années, on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance.
- L'approche qualitative ne nécessite pas un modèle numérique précis: elle se base sur l'évaluation en termes d'opérateur (+, -...) de la déviation du comportement normal par rapport au comportement nominal.

1.3.3.1 Approche qualitative du bond graph pour le diagnostic

Les bond graphs qualitatifs décrivent explicitement la localisation des composants du système et leurs interconnexions. Bien sûr, les représentations de connaissances conventionnelles permettent aussi de décrire la structure du système ainsi que son état par le biais de divers outils (schéma-bloc, équations différentielles,...). Pourtant, la surveillance basée sur la modélisation par bond graph qualitatif est relativement plus simple en comparaison des méthodes utilisées en mathématique conventionnelle.

Le modèle bond graph qualitatif peut être construit sans aucune considération des paramètres du système. Ainsi, les impacts dus aux erreurs paramétriques, un problème fondamental pour les méthodes de surveillance basées sur des modélisations qualitatives, peuvent être éliminés.

Un mécanisme d'inférence construit avec une stratégie de raisonnement qualitatif a été utilisé pour analyser les relations entre la structure du système et son comportement (donné par son modèle bond graph) pour localiser les pannes du système. Les premiers travaux sur les bond graphs qualitatifs pour le diagnostic sont proposés par Linkens ([38], [39], [84]). Les causes des fautes apparaissant dans le système sont déduites en résolvant un système

d'équations qualitatives. Dans [66] est utilisée une méthode de diagnostic basée sur les graphes causaux temporels déduits du bond graph causal permettant d'isoler les pannes en tenant compte de la dynamique et de son ordre d'occurrence de la faute. D'autres auteurs se basent sur une analyse qualitative des équations d'état linéaires [33] pour déterminer les causes possibles d'une défaillance en vérifiant la cohérence fonctionnelle du système avec le modèle.

L'avantage principal des méthodes qualitatives est la possibilité de n'utiliser que le modèle bond graph qualitatif : aucun besoin de grandeurs numériques des paramètres ni de connaissances profondes sur la structure du système. Toutefois, il faut souligner que la méthode est limitée uniquement au bond graph linéaire ce qui est rarement le cas des processus réels. Les défaillances des capteurs ne sont pas détectées. Il n'est pas aisé de déterminer les valeurs de la déviation limite inférieure et supérieure. D'autre part, un problème combinatoire peut apparaître lors des procédures d'inférences pour les systèmes complexes. A titre d'illustration, les alarmes déduites d'un raisonnement qualitatif complexe pour la surveillance d'un simple réservoir utilisé comme exemple dans [22] peuvent être plus simplement déduites en utilisant la redondance analytique basée sur le modèle bond graph.

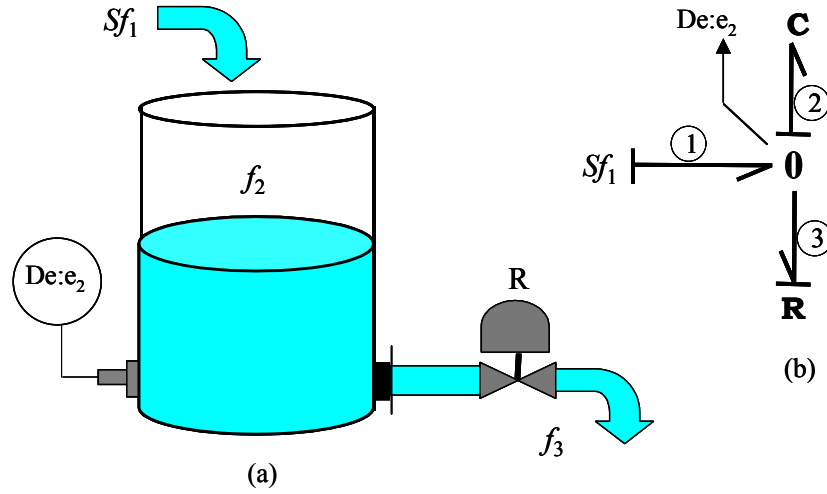


FIG. 1.1 – Exemple pédagogique du diagnostic à base de bond graph qualitatif

L'exemple de la figure 1.1(a) représente un réservoir alimenté par une source de fluide Sf et contrôlé par un détecteur De suivi d'une vanne de distribution R , le modèle bond graph qualitatif correspondant est donné par la figure 1.1(b). En vue de surveiller ce système, on génère la relation de redondance analytique r_1 (résidu). Le résidu sera déduit de la relation de conservation d'énergie de la jonction "0" en remplaçant les variables inconnues (le flux d'entrée, et la variable d'état (la pression)) par leurs mesures respectives (l'indication du capteur d'effort De_2 et la source de flux Sf_1):

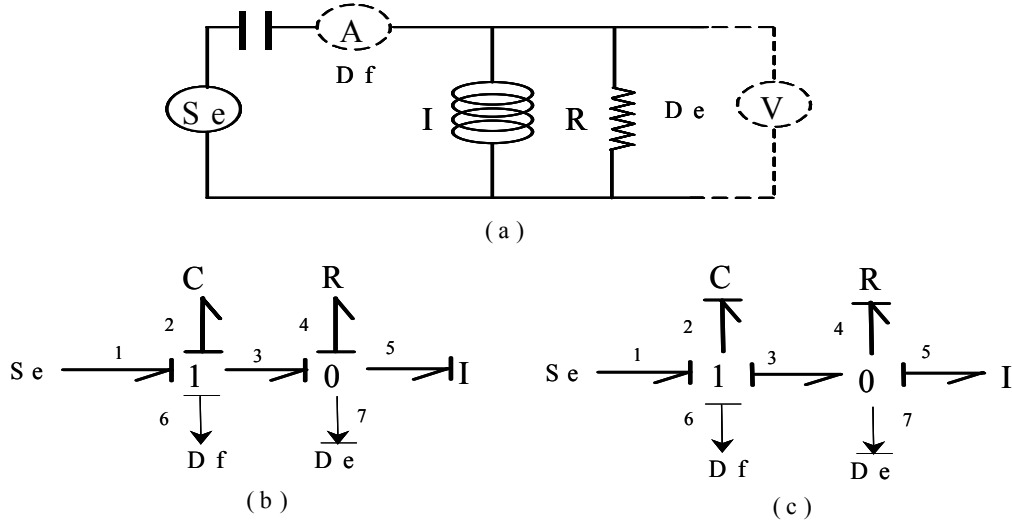


FIG. 1.2 – Modèle bond graph d'un système électrique en causalité intégrale (b) et dérivée (c)

$$r_1 = Sf_1 - R.De_2 - C\dot{D}e_2 \quad (1.1)$$

le vecteur de signature de fautes, $V = \begin{bmatrix} Sf_1 & De_2 & R & C \end{bmatrix}^T$, montre bien ([22]) qu'il est sensible à une faute sur la vanne R , la source de flux Sf_1 , mais en plus, il est sensible aux fautes des capteurs et de la capacité C .

1.3.3.2 Diagnostic par bond graph quantitatif

L'approche quantitative est basée sur les lois physiques et nécessite une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Les modèles (sous forme de fonction de transfert, d'équations d'état, ...) peuvent être obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) ([25], [63]) ou sur la base d'une identification statistique des paramètres ([37], [19]). Ces dernières années, on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance. Les premiers travaux ont été initiés au laboratoire LAIL dans le cadre de la thèse de *M. Tagina* [76]. La figure 1.2(a) montre un circuit électrique modélisé quantitativement selon la causalité intégrale (figure 1.2(b)) et la causalité dérivée (figure 1.2(c)).

Nous décrivons maintenant avec plus de détails quelques méthodes basées sur le modèle bond graph:

Placement de capteurs pour la détection des défaillances Les premiers travaux sur l'utilisation de l'outil *BG* par le placement de capteur ont été introduits par [76]. Une méthode structurée pour assurer la détection des défaillances sur un bond graph mono-port est la suivante:

- S'assurer que l'on peut écrire le système sous la forme d'une équation d'état: tous les éléments dynamiques du modèle doivent rester en causalité intégrale lors de l'affectation de la causalité intégrale préférentielle du modèle.

- Confirmer l'atteignabilité du système en identifiant les chemins possibles entre un élément dynamique et une jonction candidate à être liée à un capteur. Repérer les jonctions qui ne permettent pas de vérifier l'atteignabilité des capteurs.

- Essayer de passer le modèle en causalité dérivée préférentielle. Il faut tout d'abord s'assurer qu'il n'existe pas de boucle entre les composants dynamique qui restent en causalité intégrale et les composants *R*, puis agir en fonction du nombre d'éléments (k) qui reste en causalité intégrale :

- $k = 0$: on est libre de placer le capteur sur n'importe quelle jonction du modèle (sauf contraintes technologiques). Un seul capteur placé de manière à vérifier la condition d'atteignabilité suffira pour observer et détecter les défaillances du système.

- $k = 1$: il suffira d'un capteur que l'on pourra placer de façon à l'intégrer à un chemin causal direct compris dans un autre chemin causal qui lie un élément en dérivée avec l'élément qui reste en causalité intégrale.

- $k > 1$: k capteurs sont nécessaires, placés selon la procédure suivante: La règle précédente est suivie pour le premier capteur. Puis, pour les suivants, on va avoir la première contrainte pour le premier détecteur. Puis, pour les suivants, il faut avoir en plus de la première contrainte pour le premier détecteur, le chemin causal entre le capteur et l'élément en causalité intégrale ne doit pas appartenir à un autre chemin causal entre les couples éléments/capteurs que l'on a déjà générés.

Placement de capteurs pour la localisation des défaillances La méthode proposée introduit la notion d'éléments équivalents. Ce sont des éléments généralisés qui remplacent un certain nombre de composants unitaires de type *R*, *C* et *I*. De même, si l'ensemble contient une ou plusieurs sources, on peut remplacer par une source équivalente. Ces éléments équivalents ont été introduits pour éviter les équations implicites [57].

On a besoin des définitions:

- Jonction terminale par rapport à un élément: jonction sur laquelle est placé un élément et un détecteur, permettant ainsi d'isoler ces éléments des autres.

- Chaîne linéaire: une chaîne linéaire est une suite de jonctions qui sont liées chacune avec au plus un élément de base ou équivalent.

- Boucle implicite: une boucle implicite est une chaîne linéaire fermée.

On a montré que tous les éléments placés dans une jonction qui appartient à une chaîne linéaire délimitée par deux capteurs sont isolables par rapport aux éléments placés sur les autres jonctions. Donc les jonctions d'une chaîne linéaire deviennent terminales par rapport au seul élément attaché à cette jonction. Ceci est vrai aussi avec les boucles explicites. Comme de plus on peut parcourir les boucles explicites dans les deux sens, il vient la propriété suivante: si l'on place deux capteurs dans n'importe quelle jonction d'une boucle explicite, tous les éléments liés à la boucle seront isolables.

Le principal critère à imposer est l'optimisation du nombre de capteurs et du nombre d'éléments surveillés. Les étapes qu'il faut suivre sont les suivantes:

1. Simplification progressive du modèle jusqu'à arriver à une structure sur laquelle commencer à placer les premiers capteurs: chaîne linéaire ou boucle explicite. La simplification de cette dernière structure est prioritaire.

2. On place provisoirement les premiers capteurs de manière à ce que les éléments qui nous intéressent soient placés dans des composants dont la jonction est terminale. On a placé un capteur dans chaque jonction liée à un élément équivalent qui englobe un ou plusieurs éléments à surveiller. Pour chaque boucle explicite, il faut deux capteurs placés dans n'importe quelle position, on peut assurer la localisation de tous les éléments équivalents attachés à toutes les jonctions de la boucle.

3. On commence le processus inverse de la simplification qui va nous amener au placement final des capteurs. On bouge le capteur de chaque élément équivalent jusqu'à arriver au premier élément à surveiller de chaque branche.

4. Une fois on trouve le premier élément à surveiller, on va agir de différentes façons selon le cas: Par exemple, on va ajouter une jonction terminale qui va assurer sa localisation par rapport au reste des éléments. On prend l'option de placer le capteur pour mesurer la source de flux. On arrive à un placement optimal, mais en plus, avec cette méthode, il reste le modèle équivalent pour la surveillance.

Cette méthode va s'appliquer sur un modèle qui doit satisfaire certaines contraintes: commande, observabilité, détection... L'applicabilité de cette méthode aux bond graphs thermodynamiques repose sur deux points essentiels:

- Toute cette procédure ne dépend pas de la causalité : même si une causalité est bloquée à cause d'une non-inversibilité de fonction, la méthode n'en est pas affectée;
- Cette procédure ne demande pas la connaissance de l'expression des éléments équivalents, on peut donc passer aux bond graphs thermodynamiques.

1.4 Conclusion

Cette partie a été consacrée à l'état de l'art sur les méthodes de placement de capteurs. Dans les méthodes à base de modèle rencontrées dans notre recherche bibliographique, le modèle prend la forme d'un ensemble d'équations complexes avec parfois peu de sens physiques sur les variables inconnues. Le placement de capteurs n'est pas clairement montré dans le processus. Les équations de contrainte ne sont pas déduites d'une façon systématique. Les méthodes sans modèles rencontrent la difficulté dans l'apprentissage de données et par conséquent, le calcul de la fonction objectif ne permet pas un placement rigoureux des capteurs. Notre recherche a été orientée vers les méthodes à base de modèle non pas analytique mais graphique afin d'éviter la difficulté dans l'élaboration du modèle mathématique.

Chapitre 2

Modélisation bond-graph

2.1 Introduction

Lors de la conception d'un système industriel complexe, se pose la question du placement de capteurs pour la surveillance du système. Naturellement, le critère de coût vient se greffer à ce problème: il faut connaître le nombre minimal de capteurs à placer pour détecter, voir isoler, les défaillances que peut rencontrer le processus tout au long de son activité. Les systèmes thermodynamiques industriels sont des procédés à risques: risques de bouchage, risques de fuites de produits dangereux, risques d'explosions,... Il est donc vital de concentrer une partie de l'effort de conception du processus sur la surveillance de celui-ci. Par ailleurs, des efforts particuliers ont été déployés ces dernières années pour tenter de modéliser ce type de procédés, et la modélisation bond graph s'est révélée un outil efficace dans ce domaine, de par son aspect graphique, facilement compréhensible, ainsi que grâce à son caractère multidisciplinaire: il traite en effet de la même manière de nombreux domaines de modélisation macroscopique (électricité, mécanique, thermique, chimique,...), nombreux domaines utilisés couramment dans ces systèmes [63].

Nous avons donc d'un côté un outil de modélisation efficace et qui fait ses preuves, et d'autre part, pour le même type de procédés, une demande croissante d'une surveillance précise, rapide et efficace. Notre travail s'efforce de faire la liaison entre ces deux parties, utilisant le modèle bond graph à notre disposition pour surveiller le système.

Des études ont été effectuées sur le placement de capteurs pour la surveillance d'un modèle bond graph. L'objectif de ce qui suit est de tenter d'appliquer ce travail aux modèles plus complexes que sont ceux des systèmes thermodynamiques, à savoir multiports et non linéaires.

2.2 Généralités sur les bond graphs

2.2.1 Définition

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

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

Les bond graphs permettent, à partir d'un système physique quelconque, d'obtenir une représentation graphique indépendante du domaine physique étudié.

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

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

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

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

Et enfin, il est possible de résoudre à un niveau algorithmique, les problèmes de solvabilité du schéma de simulation par une affectation adéquate des causalités sur le bond graph.

2.2.2 Eléments Bond Graph à un port

2.2.2.1 Représentation

Dans chaque système fermé, il y a non seulement conservation de l'énergie, mais aussi une continuité de puissance. On représente le flux d'énergie entre deux systèmes A et B en liaison, par un lien de puissance (figure 2.1), désigné par le symbole qui caractérise le "bond"

(ou lien) du bond graph. Le sens de la demi-flèche correspond à la direction de la puissance P échangée.

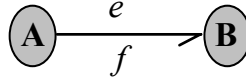


FIG. 2.1 – Représentation d'un élément bond graph 1 port

2.2.2.2 Utilisation des variables dans la modélisation bond graph

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

1. Variables de liaison : la puissance échangée P s'exprime par le produit de deux variables dites de puissance effort (e) et flux (f):

$$P = e.f$$

- 2 Variables d'énergie : elles sont définies par les relations intégrales suivantes :

$p(t)$ l'impulsion ou la quantité de mouvement généralisé,

$$p(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad p(0) = 0 \quad (2.1)$$

et $q(t)$ le déplacement généralisé,

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad q(0) = 0 \quad (2.2)$$

La signification des variables citées pour les principaux domaines est indiquée par le tableau suivant :

Domaine	Effort	Flux	Impulsion	Déplacement
	[Unités]	[Unités]	[Unités]	[Unités]
	$e(t)$	$f(t)$	$p(t)$	$q(t)$
<i>Electrique</i>	Tension	Courant	flux magnétique	charge électrique
	[<i>Volt</i>]	[<i>Ampere</i>]	[<i>Weber</i>]	[<i>Coulomb</i>]
<i>mécanique de rotation</i>	couple	Vitesse angulaire	Impulsion angulaire	Angle
	[<i>N.m</i>]	[<i>Rad/s</i>]	[<i>N.s</i>]	[<i>Rad</i>]
<i>mécanique de translation</i>	Force	vitesse linéaire	impulsion	distance
	[<i>N</i>]	[<i>m/s</i>]	[<i>N.s</i>]	[<i>m</i>]
<i>hydraulique</i>	Pression	débit volumique	impulsion de	Volume
	[<i>Pa</i>]	[<i>m³/s</i>]	pression [<i>Pa.s</i>]	[<i>m³</i>]
<i>Thermique</i>	Tempé- -rature [<i>K</i>]	Flux de chaleur [<i>J/s</i>]	-	Energie calorifique [<i>J</i>]
<i>Thermody- namique</i>	Tempé- -rature [<i>K</i>]	Flux d'entropie [<i>J/(K.S)</i>]	-	Entropie [<i>J/K</i>]
<i>Chimique</i>	Potentiel chimique	Débit molaire	-	Masse molaire
	[<i>J/mole</i>]	[<i>Mole/s</i>]		[<i>Mole</i>]
<i>Economique</i>	Prix unitaire des marchandises	Taux de flux des marchandises	Impulsion économique	Inventaire

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

2.2.2.3 Eléments passifs

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

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

$$\Phi_R(e, f) = 0 \quad (2.3)$$

Exemple 2.2.1 la loi d'ohm $U = R.i$ en électricité, ou de Bernoulli $P = K_D \dot{V}^2$ en hydraulique, ou de Fourier en thermique $\Delta T = K_C \dot{Q}$.

Les représentations graphiques respectives sont données par (figure 2.2):

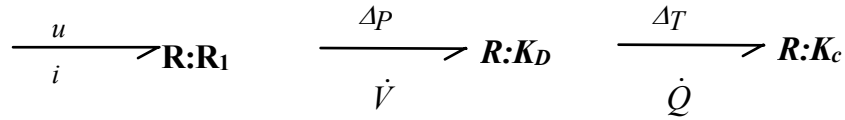


FIG. 2.2 – Représentation graphique d'un élément R

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

$$\Phi_C(e, q) = 0 \quad \text{ou} \quad \Phi_C\left(e, \int f(\tau) d\tau\right) = 0 \quad (2.4)$$

Exemple 2.2.2 $u = \frac{1}{C} \int i dt$ ou $u = \frac{q}{C}$ en électricité, $P = \frac{V}{C}$ ou $P = \frac{1}{C} \int \dot{V} dt$ en hydraulique et $T = \frac{1}{C} \int \dot{Q} dt$ en thermique.

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

$$\Phi_I(p, f) = 0 \quad \text{ou} \quad \Phi_I\left(f, \int e(\tau) d\tau\right) = 0 \quad (2.5)$$

Exemple 2.2.3 $u = L \frac{di}{dt}$ ou $\phi = Li$ en électricité et $P = \frac{\rho l}{A} \dot{V}$ en hydraulique.

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

2.2.2.4 Eléments actifs

Les éléments actifs sont des sources qui fournissent de la puissance au système. On distingue les sources d'effort Se (tel que générateur de tension) et les sources de flux Sf (générateur de courant, vitesse appliquée). On les désigne par la figure 2.3:



FIG. 2.3 – Représentation des sources d'effort et de flux

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

2.2.2.5 Eléments de jonction

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

- *Jonction 0* : associe les éléments soumis au même effort, ce qui correspond à des éléments en série en mécanique (même force) et en parallèle en hydraulique et électricité (même tension, même pression). La jonction et la loi constitutive est donnée par la figure 2.4 :

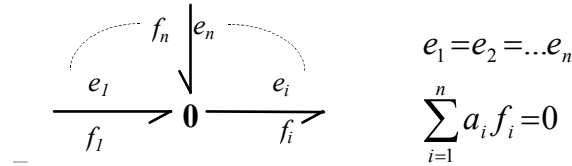


FIG. 2.4 – Jonction parallèle ou jonction 0 avec $a_i = 1$ pour une puissance entrante et $a_i = -1$ pour une puissance sortante

- *Jonction 1* : elle associe les éléments soumis à un même flux et correspond à des éléments en parallèle. Elle représente des éléments en parallèle en mécanique (même vitesse) et en série en électricité et en hydraulique (même courant ou même débit volumique) représenté par la figure 2.5.

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

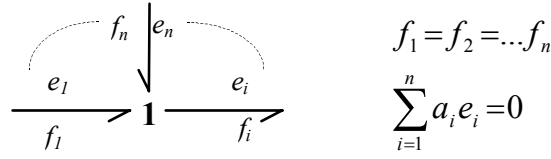


FIG. 2.5 – Jonction série ou jonction 1 avec $a_i = 1$ pour une puissance entrante et $a_i = -1$ pour une puissance sortante

$$\sum_{i=1}^n e_i f_i = 0 \quad (2.6)$$

2.2.3 Eléments bond graphs à 2 ports

2.2.3.1 Transformateur TF

Elément à deux ports, modélise les éléments transformateurs d'énergie tel un transformateur électrique, un système d'engrenage ou bras de levier. Si le module m n'est pas constant, le transformateur est dit modulé et est noté par MTF , la variable m peut alors être continue ou booléenne (0,1) (figure 2.6).

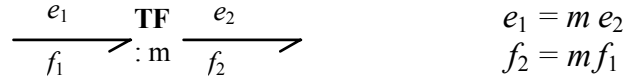


FIG. 2.6 – Transformateur TF et son équation constitutive

2.2.3.2 Gyrateur GY

Noté aussi TransDucteur TD , cet élément est un 2-ports représenté par la figure 2.7:

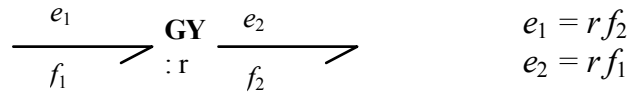


FIG. 2.7 – Gyrateur GY et son équation constitutive

Exemple 2.2.4 *gyroscope, transformateur de la puissance mécanique dans un moteur à courant continu, Un gyrateur modulé sera noté par MGY : C'est le moteur électrique à excitation variable. Notons que les deux éléments TF et GY peuvent aussi transformer la puissance inter-domaine.*

2.2.3.3 Carrousel de Thoma

les quatre variables, effort, flux, moment et déplacement peuvent être représentées par le carrousel de Thoma [80] mettant en évidence les relations entre elles. Le tétraèdre de Paynter donne la même information mais sous une forme différente (figure 2.8).

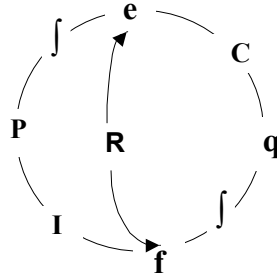


FIG. 2.8 – Carrousel de Thoma

2.2.3.4 Liens d'information

Lorsqu'une des variables effort ou flux est très faible, la puissance transmise est négligeable, on représente alors le signal transmis (par un capteur, un intégrateur, sommateur) par un lien d'information (figure 2.9(a)). Les capteurs d'effort $D : D_e$ et de flux $D : D_f$ sont représentés par la figure 2.9(b).

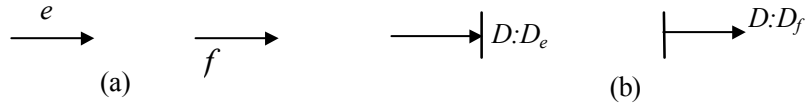


FIG. 2.9 – Lien d'information (a) et détecteur d'effort et de flux (b)

2.2.4 Éléments bond graph multiports ou champs C, I et R

Les éléments bond graph R, C et I présentés plus haut sont à un port, et les lois constitutives sont scalaires. Dans plusieurs cas, les lois mises en œuvre sont vectorielles, on utilise alors dans ce cas les éléments multiports ou champs [79]. Leur représentation est donnée par le tableau donné par figure 2.10 :

2.2.5 Éléments pseudo bond graph

Les bond graphs examinés plus haut utilisent l'effort et le flux dont le produit est la puissance instantanée transférée le long du lien ou à travers le port (élément) du composant

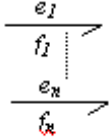
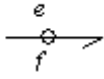
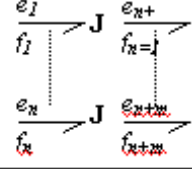
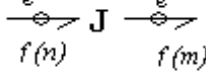
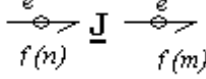
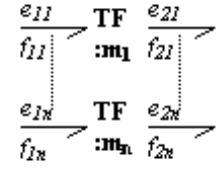
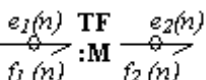
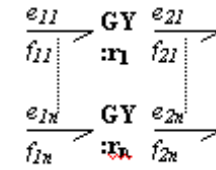
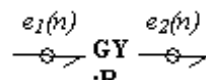
Système	Désignation	Relation
		
		
		$e_i^T f_i - e_k^T \cdot_k = 0$
		$\begin{cases} e_1^T f_1 = e_2^T f_2 \\ e_1 = m e_2 \\ f_1 = m f_2 \end{cases}$
		$\begin{cases} e_1^T f_1 = e_2^T f_2 \\ e_1 = R f_2 \\ e_2 = R f_1 \end{cases}$

FIG. 2.10 – *Eléments multiport*

du système. Ils permettent de modéliser en principe tout type de phénomène physique. Ils sont appelés vrai bond graph, et ils modélisent parfaitement les systèmes mécaniques, électriques ou hydrauliques.

L'application de la technique du bond graph n'est plus limitée aux problèmes d'engineering mais se répand à d'autres systèmes plus complexes (physiologiques, chimiques, ...) mettant en jeu les processus de diffusion des solutions et de transformations chimiques. Ces systèmes ne sont pas décrits par des variables de puissance; leur modélisation [30] consiste alors à construire un pseudo bond graph en introduisant des pseudo-liens pour lesquels le produit des variables d'effort et de flux associées à un lien n'a plus la dimension d'une puissance. Toutefois, il faut noter que les propriétés classiques d'un vrai bond graph (classification en éléments R , C et I , affectation des causalités, convention de signe) restent valables pour un pseudo bond graph.

On trouve les pseudo bond graph dans les domaines suivants:

1. Dans le domaine thermique, on utilise le flux de chaleur et non d'entropie. La raison est que la chaleur est conservée dans les problèmes de conduction (éléments R). Le flux d'entropie n'est pas conservé, il augmente avec la baisse de la température.

2. La variable d'effort dans la chimie est le potentiel chimique, qui forme avec le flux molaire un vrai bond graph. Cependant, en cinétique chimique, on utilise quelquefois la concentration au lieu du potentiel chimique.

3. Dans la mécanique des fluides compressibles, il y a des effets thermiques avec conduction. En conséquence, on utilise deux efforts, pression et température, et deux flux, flux de masse et flux d'enthalpie. La raison est de nouveau une plus simple conservation. Le flux de masse est toujours conservé, et le flux d'enthalpie se déduit par un bilan des puissances.

2.2.6 Conservation de puissance et conservation d'énergie

Au niveau des éléments jonction, transformateur et gyrateur il y a conservation de puissance et, a fortiori, conservation d'énergie. Cependant, les bond graphistes connaissent une autre conservation d'énergie, l'énergie au sens strict dans les éléments C et I . Ces éléments peuvent bien absorber l'énergie mais changent ainsi leur état. Pour les ramener à l'état initial, il faut exactement soutirer la même énergie. Donc, on fait avantageusement une différence entre conservation de puissance et conservation d'énergie.

Dans les éléments multiports C et I , la conservation d'énergie est différente. L'énergie peut sortir par un autre lien, mais c'est toujours la même quantité d'énergie qui est soutirée pour ramener le multiport à l'état initial.

L'élément R est en principe irréversible et peut absorber mais pas dégager de la puissance. Pour les multiports R cette condition est plus faible. La somme des énergies sur tous les liens doit être positive. Elle peut devenir alors négative dans un lien, à condition qu'elle soit positive et plus grande dans les autres liens. Une application est la thermoélectricité et l'effet Peltier [79].

2.3 Description des éléments multiports

Le bond graph est un graphe dans lequel sont définies des boucles et des chemins causaux, parcourus en suivant la propagation de l'information effort ou flux, et quel que soit le sens des demi-flèches. Les éléments bond graph R , C et I sont des champs ou des éléments multiports et dans ce cas, les lois mises en oeuvre sont vectorielles.[9]

2.3.1 Multiport C

Le multiport C , est associé à un système de stockage d'énergie pour lequel l'expression de l'énergie stockée est une fonction de plusieurs variables de déplacement. Il est représenté par la figure 2.11 :

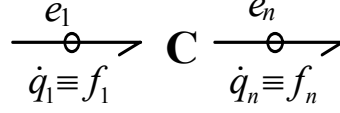


FIG. 2.11 – *Multiport C*

L'énergie stockée par un multiport C sera :

$$E = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n e_i \cdot f_i dt = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n e_i \dot{q}_i dt = \int_{q_0}^q \sum_{i=1}^n e_i(q) dq = \int_{q_0}^q e(q) dq = E(q) \quad (2.7)$$

où: $q = [q_1 \dots q_n]^T$, $e = [e_1 \dots e_n]^T$

A titre d'exemple, l'énergie stockée par un système thermodynamique chimique ayant n composants est représenté par un multiport C (figure 2.12):

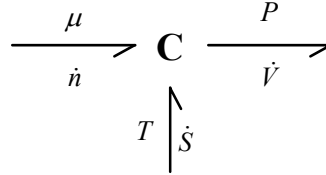


FIG. 2.12 – *Exemple thermodynamique et chimique d'un multiport C*

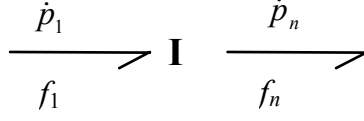
La loi constitutive du bond graph est l'équation suivante :

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (2.8)$$

Ici les variables de déplacement sont le volume V , la masse molaire n , et l'entropie S . Le signe – devant la pression est traduit par l'orientation de la puissance hydraulique.

2.3.2 Multiport I

Le multiport I est analogue au multiport capacitif C , il est représenté par la figure 2.13:

FIG. 2.13 – Multiport I

La loi générique de ce multiport lie le flux f au moment p est :

$$E = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n e_i \cdot f_i dt = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n f_i \dot{p}_i dt = \int_{p_0}^p \sum_{i=1}^n f_i(p) dp = \int_{p_0}^p e(p) dp = E(p) \quad (2.9)$$

où:

$$p = [p_1 \dots p_n]^T, \quad f = [f_1 \dots f_n]^T$$

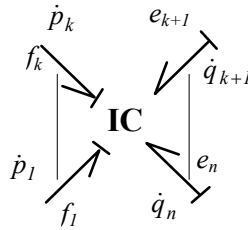
2.3.3 Multiport mixte IC

Lorsque le système de stockage d'énergie ne peut être décrit comme un multiport C ou I , car il est composé de n ports formant un champ C et m ports formant un champ I .

L'énergie stockée E est donnée par l'expression suivante:

$$E = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n e_i \cdot f_i dt = \int_{p_0}^p \left(\sum_{i=1}^k f_i \right) dp_i + \int_{q_0}^q \left(\sum_{j=k+1}^n e_j \right) dq_j \quad (2.10)$$

p est le vecteur du moment et q est le vecteur de déplacement. Les k premiers ports, représentent le champ I , et les ports de $k+1$ à n désignent le champ C , il est dit mixte (figure 2.14):

FIG. 2.14 – Multiport IC

Le champ IC convient surtout à la modélisation des systèmes électromagnétiques caractérisés par les phénomènes magnétiques et mécaniques. La partie électrique est modélisée par le champ d'inertie I et la partie mécanique par le champ capacitif C .

2.3.4 Multiport R

Le champ résistif R est un multiport dont la loi générique est une fonction statique (ou algébrique) liant n efforts et n flux sans stockage d'énergie. La loi constitutive peut être linéaire (loi d'ohm) ou non linéaire (restriction hydraulique) et est écrite sous forme résistance (figure 2.15(a)),

$$e_i = \Phi_{Ri}(f_1, \dots, f_n), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

ou conductance (figure 2.15(b)),

$$f_i = \Phi_{Ri}^{-1}(e_1, \dots, e_n) \quad (2.12)$$

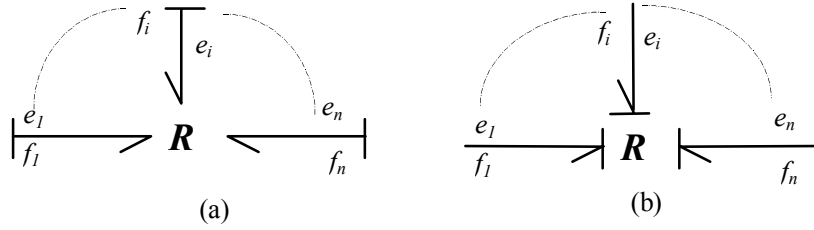


FIG. 2.15 – Multiport R en causalité résistance (a) ou conductance (b)

2.3.5 Multiport RS

L'élément RS (figure 2.16(a)) modélise tout type de résistance qui génère de la chaleur. Cette structure conserve la puissance et est irréversible. Dans le cas d'un multiport, la représentation est donnée par (figure 2.16(b)).

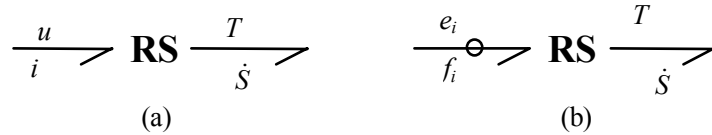


FIG. 2.16 – Élément (a) et Multiport (b) RS

2.4 Analyse des bond graphs couplés

2.4.1 Introduction

Les bond graphs monoénergies sont utilisés pour la modélisation des processus mettant en oeuvre une seule énergie à la fois (mécanique, électrique, thermique,...). Les processus technologiques en génie des procédés sont caractérisés par l'interaction des phénomènes thermiques, hydrauliques et chimiques. Ces trois formes de puissance sont couplées. Ainsi, les systèmes thermofluides introduisent une complexité supplémentaire dans leur modélisation, puisque le flux d'énergie thermique est lié à la masse du fluide transporté d'une position à une autre sans effet de dissipation.

2.4.2 Représentation des BG couplés

En génie des procédés, comprenant la transformation de matière, on propose alors de présenter les variables de puissance sous forme vectorielle comme l'indique l'équation suivante :

$$E = [e_h \ e_t \ e_c]^t, F = [f_h \ f_t \ f_c]^t \quad (2.13)$$

Ces deux vecteurs sont de dimension deux dans le cas des processus thermofluides et de dimension trois si y sont ajoutés les phénomènes chimiques.

e_t , e_h , et e_c représentent respectivement l'effort thermique, hydraulique et chimique, f_t , f_h et f_c désignent respectivement les flux correspondants.

Nous représentons le couplage de ces énergies par un lien entouré d'un anneau comme indiqué sur la (figure 2.17(a)). D'autres auteurs utilisent deux liens en pointillés et en trait plein (figure 2.17(b)) ou par deux liens séparés (figure 2.17(c)) pour distinguer le vrai et le pseudo bond graph.

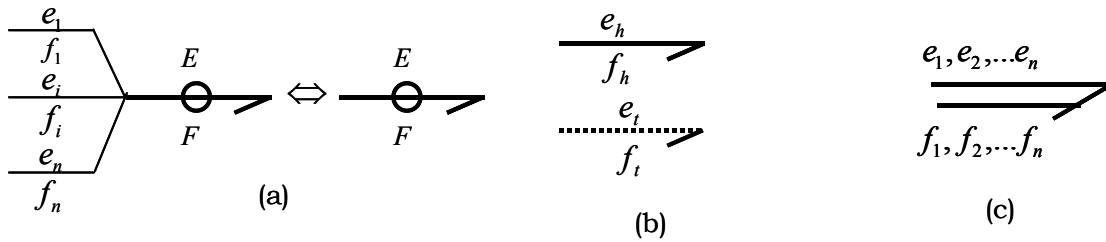


FIG. 2.17 – Représentation des bonds graphs multiénergies

Dans le cas des processus thermofluides, nous modélisons deux énergies (hydraulique avec l'indice h et thermique avec l'indice t): e_t et e_h représentent alors respectivement la pression et

l'enthalpie spécifique ou la température, f_t et f_h représentent respectivement le flux thermique et le flux hydraulique.

Les flux d'énergie thermique $\dot{E}$ et hydraulique ne sont pas indépendants. En réalité le flux thermique dépend de l'énergie due aux forces de pression ($\frac{P}{\rho}$), de l'énergie interne spécifique u , et de l'énergie cinétique convectée ($\frac{\rho v^2}{2}$):

$$\dot{E} = \dot{m} \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{\rho v^2}{2} \right) \quad (2.14)$$

v étant la vitesse du fluide, ρ sa densité et $\dot{m}$ le débit massique.

En pratique, le terme $\frac{\rho v^2}{2}$ est négligeable pour des vitesses relativement faibles. L'enthalpie spécifique h est :

$$h = u + \frac{P}{\rho} = c_p T \quad (2.15)$$

L'énergie convectée est notée flux d'enthalpie $\dot{H}$ est fonction de la variable d'effort thermique (h ou T), et de la variable de flux hydraulique $\dot{m}$. L'équation de couplage est donc :

$$\dot{H} = \dot{m}h = \dot{m}c_p T \quad (2.16)$$

h restant constante pendant le transport du fluide.

En vrai bond graph, la variable de flux thermique est le flux d'entropie $\dot{S}$.

En pseudo bond graph, la variable de flux thermique est le flux d'enthalpie $\dot{H}$ dans le cas de la convection et du flux thermique $\dot{Q}$ dans le cas de la conduction.

2.4.3 Variables de puissances intensives et extensives

En thermodynamique, les variables dont l'uniformité est nécessaire pour réaliser l'équilibre d'un système, sont appelées intensives ou de tension. Elles correspondent aux variables d'effort en bond graph. Elles jouissent de la propriété suivante:

Définition 11 *Si la réunion de n systèmes identiques en équilibre caractérisés par le paramètre x donne un système en équilibre caractérisé par le même paramètre, celui-ci est un paramètre intensif. Une variable intensive est une variable de sortie qui ne varie pas lorsque la taille du système varie, toutes choses égales par ailleurs (par exemple la température ne dépend pas de la taille du corps). C'est le cas aussi de la pression, des concentrations,...*

On oppose aux variables intensives les variables dites extensives, dont la définition est la suivante:

Définition 12 *Une variable extensive est une variable qui est fonction de la taille du système, toutes choses égales par ailleurs (par exemple la masse double lorsque la taille du corps double*

et que la masse volumique reste constante). D'autres paramètres tels que le volume, la masse, la charge électrique et l'énergie interne sont aussi des paramètres extensifs. Les variables extensives correspondent aux variables de déplacement en bond graph ou à l'intégrale du flux. La réunion de plusieurs systèmes caractérisés par ces paramètres donne un système nouveau dont les paramètres sont: $V = \sum V_i$, $m = \sum m_i$, $U = \sum U_i$.

Définition 13 *L'énergie est un concept abstrait, mathématique, qui contrairement à une idée reçue, n'a aucune grandeur physique associée. Ce concept a été inventé pour représenter les échanges entre les domaines physiques qui n'avaient apparemment rien de commun, comme le domaine électrique et le domaine mécanique. Cette variable sert à uniformiser les divers domaines physiques. Elle est à la base de la modélisation Bond Graph.*

Définition 14 *La puissance est la représentation instantanée de l'énergie. Elle se déduit de l'énergie par l'opération de dérivation par rapport au temps. Il s'avère que cette grandeur est la représentante de deux variables liées: l'une intensive, l'autre extensive.*

L'analyse des processus physiques en génie des procédés concerne principalement la modélisation des systèmes avec fluide circulant, et ses ramifications thermiques et thermodynamiques. Les grandeurs entropie et enthalpie sont avec la puissance mécanique, les outils pour une description de tels systèmes. Nous utilisons les concepts de la thermodynamique, et notamment l'entropie, lorsque cela est nécessaire pour la réticulation des machines thermiques. Toute modélisation d'un système physique passe par la définition d'un ensemble de valeurs. Il faut aussi définir une plage de fonctionnement du système sur lequel on effectue la modélisation. Dans cette plage de fonctionnement, certaines valeurs n'évoluent pas: elles correspondent aux constantes. Par contre, d'autres valeurs évoluent de manière significative: celles-ci correspondent aux variables. Il est bon de signaler que l'appartenance d'une valeur au groupe des constantes ou des variables dépend fortement de la plage de fonctionnement du système.

Pour les thermofluides, on utilise quelquefois la paire (flux d'enthalpie, enthalpie spécifique) pour modéliser la matière en mouvement (problème de convection). Ce choix permet de reconstituer d'autres variables telle que le titre de la vapeur dans un mélange diphasique et d'utiliser en simulation les fonctions thermodynamiques. Dans le cas de la modélisation de la matière au repos (problème de conduction), on peut utiliser aussi bien la paire flux d'entropie-température pour constituer un vrai bond graph, que la paire flux thermique-température pour un pseudo bond graph.

2.4.4 Causalité

[15]

Une propriété importante du bond graph par rapport aux représentations graphiques est la possibilité de mettre en évidence les relations de cause à effet au sein du système. Les relations de cause à effet au sein du système sont mises en évidence par le trait causal placé perpendiculairement au lien (figure 2.18(a)). Le trait indique par convention le sens dans lequel l'effort est connu, le flux étant toujours considéré comme connu dans le sens opposé au trait causal.

Dans notre cas (figure 2.18(b)), A applique à B un "effort" e , qui réagit en envoyant à A un "flux" f . L'effort imposé par A est une donnée pour B . La notion de causalité en bond graph permet de résoudre le niveau algorithmique de la modélisation en choisissant par exemple des causalités intégrales (la résolution numérique d'une intégration étant plus simple que la dérivation).

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



FIG. 2.18 – Causalité

2.4.4.1 Règle d'affectation de la causalité

[5]

Les relations de cause à effet associées à leurs schémas bloc ainsi que les règles d'affectation des causalités pour les éléments de bond graph sont présentées par les tableaux suivants. La procédure d'affectation des causalités est effectuée comme suit :

1. Affecter la causalité aux sources,
2. Mettre les éléments I et C en causalité intégrale et affecter la causalité obligatoire sur les R non linéaires et répercuter sur l'environnement. On essaiera toujours d'affecter aux éléments C et I une causalité associée à une loi de type intégrale car il est plus aisé et plus robuste d'intégrer que de dériver.
3. Affecter les causalités aux jonctions 0,1, TF , GY .
4. Affecter les causalités aux éléments R linéaires en fonction des possibilités restantes.
5. Rechercher les conflits de causalité. En cas de conflit, reprendre en 2 et modifier la causalité sur l'élément I ou C origine du conflit. Quelquefois, on est contraint d'ajouter des éléments C ou I (pouvant représenter un phénomène physique) pour obtenir une causalité intégrale.

Sur les tableaux des figures 2.19 et 2.20 est présenté un résumé des règles de causalité en bond graph.

Élément	Forme causale	Relation	Bloc diagramme	Règle
Sources d'effort (Sf) et de flux (Se)	 	f donné e donné	 	L'effort (ou flux) imposé par la source d'effort (ou de flux) est une donnée connue pour le système. la causalité est obligatoire.
Jonction 0		$e_1 = e_2, e_{A1} = e_1, e_a = e_1$ $f_1 = -(f_2 + f_{A1} + f_a)$		Un seul effort peut donner sa valeur aux autres, (ici e_1). Un seul trait causal près de la jonction 0
Jonction 1		$f_1 = f_2, f_{A1} = f_1, f_a = f_1$ $e_1 = -(e_2 + e_{A1} + e_a)$		Un seul flux peut donner sa valeur aux autres (ici f_1). Un seul lien sans trait causal près de la jonction 1
Transfor-mateur		$e_2 = m e_1, f_2 = m f_1$		e_1 et f_1 sont connus. Un seul trait causal près du TF
TF		$f_2 = f_1/m, e_2 = e_1/m$		e_1 et f_1 sont connus. Un seul trait causal près du TF

FIG. 2.19 – Causalité des éléments bond graph (partie 1)

2.4.4.2 Chemin causal

Définition 15 Un **chemin causal** dans une structure de jonction (0,1,TF ou GY) est une alternance de liens et d'éléments de base (R, C ou I), appelés nœuds telle que tous les nœuds ont une causalité complète et correcte, et deux liens du chemin causal ont en un même nœud des orientations causales opposées. Suivant la causalité, la variable traversée est l'effort ou le flux. Pour changer cette variable il faut passer par un élément de jonction GY, ou par un élément passif (I, C ou R).

Définition 16 Un **chemin causal** est dit **simple** s'il est parcouru en suivant toujours la même variable. Il existe donc pour une même séquence de liens et de nœuds, deux chemins

Elément	Forme causale	Relation	Bloc diagramme	Règle
Gyrateur	$\begin{array}{c} e_1 \\ \hline \text{GY} \\ \hline f_2 \end{array}$	$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	$\begin{array}{c} e_1 \rightarrow [1/r] \rightarrow e_2 \\ f_1 \leftarrow [1/r] \leftarrow f_2 \end{array}$	Les flux f_1 et f_2 sont connus. Pas de traits causaux près du GY
GY	$\begin{array}{c} e_1 \\ \hline \text{GY} \\ \hline f_1 \end{array}$	$f_1 = e_2/r$ $f_2 = e_1/r$	$\begin{array}{c} e_1 \rightarrow [1/r] \rightarrow e_2 \\ f_1 \leftarrow [1/r] \leftarrow f_2 \end{array}$	Les efforts e_1 et e_2 sont connus. 2 traits causaux près du GY
Résistance	$\begin{array}{c} e \\ \hline \text{R} \\ \hline f \end{array}$	$e = \Phi_R(f)$	$\begin{array}{c} e \leftarrow \Phi_R \\ f \rightarrow \end{array}$	Le flux f est une donnée pour R
R	$\begin{array}{c} e \\ \hline \text{R} \\ \hline f \end{array}$	$f = \Phi_R^{-1}(e)$	$\begin{array}{c} e \rightarrow \Phi_R^{-1} \\ f \leftarrow \end{array}$	L'effort e est une donnée pour R. Pas de causalité préférentielle pour R linéaire.
Capacité	$\begin{array}{c} e \\ \hline \text{C} \\ \hline f = \dot{q} \end{array}$	$e = \Phi_C^{-1}(\int f dt)$	$\begin{array}{c} e \leftarrow \Phi_C^{-1} \\ f \rightarrow \int \rightarrow q \end{array}$	f est une donnée pour l'élément C. La causalité est "intégrale".
C	$\begin{array}{c} e \\ \hline \text{C} \\ \hline f = \dot{q} \end{array}$	$f = \frac{d}{dt} \Phi_C(e)$	$\begin{array}{c} e \rightarrow \Phi_C \\ f \leftarrow d/dt \end{array}$	e est une donnée pour l'élément C. La causalité est "dérivée".
Inertie	$\begin{array}{c} e = \dot{p} \\ \hline \text{I} \\ \hline f \end{array}$	$f = \Phi_I^{-1}(\int e dt)$	$\begin{array}{c} e \rightarrow \int \\ f \leftarrow \Phi_I^{-1} \end{array}$	f est une donnée pour l'élément I. La causalité est "intégrale"
I	$\begin{array}{c} e = \dot{p} \\ \hline \text{I} \\ \hline f \end{array}$	$e = \frac{d}{dt} \Phi_I(f)$	$\begin{array}{c} e \leftarrow d/dt \\ f \rightarrow \Phi_I \end{array}$	e est une donnée pour l'élément I. La causalité est "dérivée".

FIG. 2.20 – Causalité des éléments bond graph (partie 2)

en suivant soit l'effort soit le flux (figure 2.21).

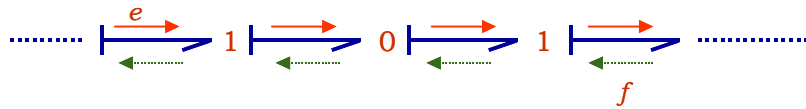


FIG. 2.21 – Chemin causal simple en suivant l'information "effort" → ou l'information flux ←

Définition 17 Un **chemin causal** est **mixte** s'il faut changer de variable lors du parcours. C'est le cas en présence d'un GY, où le chemin est appelé mixte direct (figure 2.22) ou lorsqu'il faut traverser un élément R, C ou I, ce qui correspond à un chemin mixte indirect (figure

2.23).



FIG. 2.22 – *Chemin causal mixte direct*

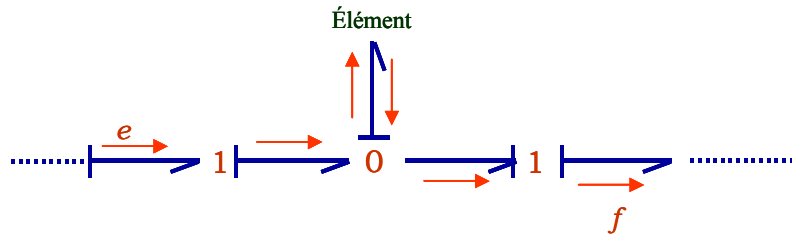


FIG. 2.23 – *Chemin causal mixte indirect*

Définition 18 Une **chaîne d'action** est un chemin causal entre une source et une sortie (qui est représentée par un capteur, détecteur).

Exemple 2.4.1 Sur la figure 2.24, à titre d'exemple, les chaînes d'action pour la source $Sf : f_1$ sont : $Sf : f_1 - Df : f_6 : 1 - 2 - C - 2 - 4 - 6 - R - 6 - 5$, $Sf : f_1 - De : e_2 : 1 - 2 - C - 2 - 3$.

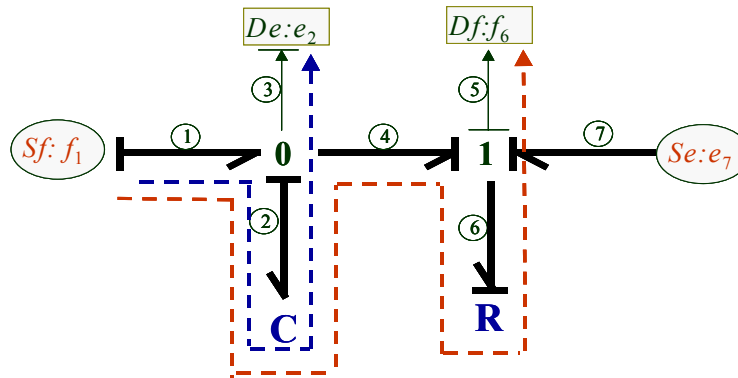


FIG. 2.24 – *Chaîne d'action*

Définition 19 Une **boucle causale** est un chemin causal fermé entre deux éléments de type R , C ou I , sans lien parcouru en suivant la même variable plus d'une fois (figure 2.25)..

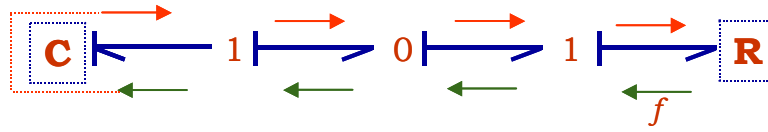


FIG. 2.25 – Boucle causale

2.4.5 Éléments pseudo bond graph

Les bond graphs examinés plus haut utilisent l'effort et le flux dont le produit est la puissance instantanée transférée le long du lien ou à travers le port (élément) du composant du système. Ils permettent de modéliser en principe tout type de phénomène physique. Ils sont appelés vrai bond graph, et ils modélisent parfaitement les systèmes mécaniques, électriques ou hydrauliques.

L'application de la technique du bond graph n'est plus limitée aux problèmes d'engineering mais se répand à d'autres systèmes plus complexes (physiologiques, chimiques..) mettant en jeu les processus de diffusion des solutions et de transformations chimiques. Ces systèmes ne sont pas décrits par des variables de puissance; leur modélisation [30] consiste alors à construire un pseudo bond graph en introduisant des pseudo-liens pour lesquels le produit des variables d'effort et de flux associées à un lien n'a plus la dimension d'une puissance. Toutefois, il faut noter que les propriétés classiques d'un vrai bond graph (classification en éléments R , C et I , affectation des causalités, convention de signe) restent valables pour un pseudo bond graph.

On trouve les pseudo bond graph dans les domaines suivants:

1. Dans le domaine thermique, on utilise le flux de chaleur et non d'entropie. La raison est que la chaleur est conservée dans les problèmes de conduction (éléments R). Le flux d'entropie n'est pas conservé, il augmente avec la baisse de la température.
2. La variable d'effort dans la chimie est le potentiel chimique, qui forme avec le flux molaire un vrai bond graph. Cependant, en cinétique chimique, on utilise quelquefois la concentration au lieu du potentiel chimique.
3. Dans la mécanique des fluides compressibles, il y a des effets thermiques avec conduction. En conséquence, on utilise deux efforts, pression et température, et deux flux, flux de masse et flux d'enthalpie. La raison est de nouveau une plus simple conservation. Le flux de masse est toujours conservé, et le flux d'enthalpie se déduit par un bilan des puissances.

2.4.6 Conservation de puissance et conservation d'énergie

Au niveau des éléments jonction, transformateur et gyrateur il y a conservation de puissance et, a fortiori, conservation d'énergie. Cependant, les bond graphistes connaissent une

autre conservation d'énergie, l'énergie au sens strict dans les éléments C et I . Ces éléments peuvent bien absorber l'énergie mais changent ainsi leur état. Pour les ramener à l'état initial, il faut exactement soutirer la même énergie. Donc, on fait avantageusement une différence entre conservation de puissance et conservation d'énergie.

Dans les éléments multiports C et I , la conservation d'énergie est différente. L'énergie peut sortir par un autre lien, mais c'est toujours la même quantité d'énergie qui est soutirée pour ramener le multiport à l'état initial.

L'élément R est en principe irréversible et peut absorber mais pas dégager de la puissance. Pour les multiports R cette condition est plus faible. La somme des énergies sur tous les liens doit être positive. Elle peut devenir alors négative dans un lien, à condition qu'elle soit positive et plus grande dans les autres liens. Une application est la thermoélectricité et l'effet *Peltier*.

2.5 Modèles bond graphs non linéaires des éléments thermofluides

2.5.1 Sources thermofluides

Dans les systèmes thermofluides, le couplage des deux énergies est quantifié par l'équation de couplage $\dot{H} = \dot{m}h = \dot{m}c_p T$ à travers cette équation, on voit que le flux thermique est une fonction du flux hydraulique et de l'effort thermique $f_t = F(f_h, e_t)$. Il est possible de représenter la source thermofluide comme définie par la figure 2.26 : [83], [55] et [9]

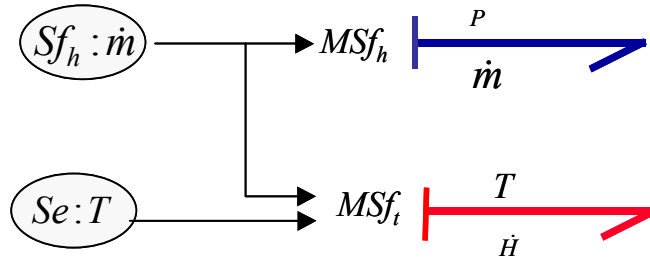


FIG. 2.26 – Représentation d'une source thermofluide

Cette représentation est importante du point de vue physique et de l'analyse des systèmes de commande. En effet, le modèle bond graph nous montre bien que les véritables actionneurs sont le flux hydraulique $Sf_h : \dot{m}$ (qui peut être fourni par une pompe), et la source du température $Se : T$ (fournie par une source extérieure). La source du flux thermique (flux d'enthalpie) dépend bien de la température du fluide et de son débit massique. D'autres auteurs introduisent une résistance fictive sur le lien thermique modulé par le débit fourni par le lien hydraulique comme sur la figure 2.27. Cette représentation ne met pas en évidence

les véritables actionneurs nécessaires pour le parcours de chemins causaux lors de l'analyse des propriétés structurelles. De plus, la résistance fictive introduit des ambiguïtés quand on cherche à lui attribuer un sens physique (le couplage des deux énergies se produit sans dissipation d'énergie).

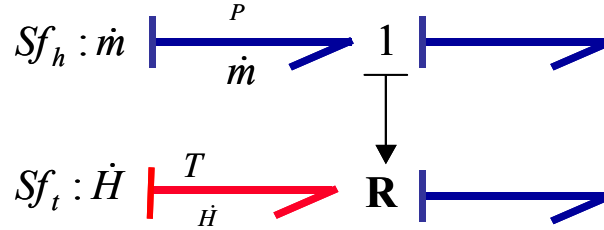


FIG. 2.27 – Autre représentation d'une source thermofluide

2.5.2 Processus de transport d'énergie

2.5.2.1 Conduite à restriction fixe (figure 2.28(a))

A chaque système réel de transport est associé les éléments I et R : l'élément I décrit l'inertie du fluide transporté et R représente le phénomène de dissipation d'énergie.[77]

La forme de l'équation de conservation d'énergie que nous utilisons est l'équation de *Bernoulli*, qui est la plupart du temps employée pour résoudre les systèmes d'écoulements sous les hypothèses générales suivantes :

- l'écoulement est régulier,
- le fluide est à viscosité constante,
- les énergies cinétiques et gravitationnelles sont négligées.

Les phénomènes dissipatifs d'énergie sans génération d'entropie rencontrés usuellement dans les procédés thermofluides sont principalement modélisés par un multiport R (figure 2.28(b)) qui met en oeuvre des lois matricielles. Dans notre cas, nous avons quatre entrées et quatre sorties choisies en fonction de la causalité affectée à cet élément. Les causalités peuvent être quelconques, mais le cas général, les efforts amont et aval sont imposés, et on détermine les flux thermiques f_T et hydraulique f_H . La force motrice est la différence des efforts amont et aval. Cette causalité est naturelle car dans un élément résistif de type convection dans une conduite ou conduction thermique, c'est le flux thermique ou massique transféré qui est la conséquence d'une variation des efforts, on obtient un modèle bond graph (figure 2.28(c)) et un schéma bloc de simulation comme représenté sur la figure 2.28(d):

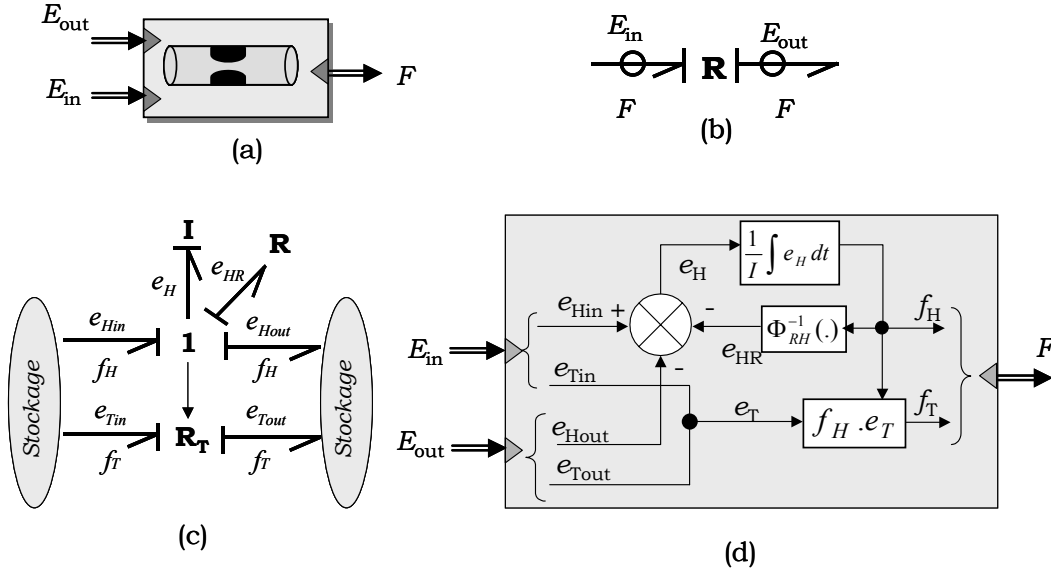


FIG. 2.28 – Modèle bond graph d’un tuyau avec une restriction hydraulique: (a) schéma de principe, (b) bond graph avec inertie du fluide négligeable, (c) bond graph avec inertie du fluide prise en compte, (d) schéma-bloc associé au bond graph (c).

2.5.2.2 Conduite à orifice variable (vanne réglable) (figure 2.29(a))

Si la restriction est une vanne, alors le coefficient hydraulique dépend de la position x de la tige de la vanne. Le modèle bond graph correspondant est donné par la figure 2.29(b). Le schéma bloc est donné par la figure 2.29(c).

2.5.3 Processus d’accumulation d’énergie

Les processus d’accumulation d’énergie sont modélisés par un multiport C . Les propriétés thermodynamiques de ce multiport sont développés par John Thoma en 2000 [78]. Globalement, la conservation des énergies hydrauliques et thermiques est modélisée par une jonction "0" vectorielle (que nous avons représentée par " $\underline{0}$ ").

2.5.3.1 Réservoir sous-saturé (figure 2.30(a))

Considérons le modèle dynamique d’un réservoir de stockage qui appartient à la classe des processus d’accumulation d’énergie. Cette sous-classe est utilisée dans l’industrie seulement pour stocker le fluide qui est donc considéré comme sous-saturé (car non chauffé). Le modèle bond graph couplé correspondant est donné par la figure 2.30(b) et le modèle bond graph découplé est donné par la figure 2.31 :

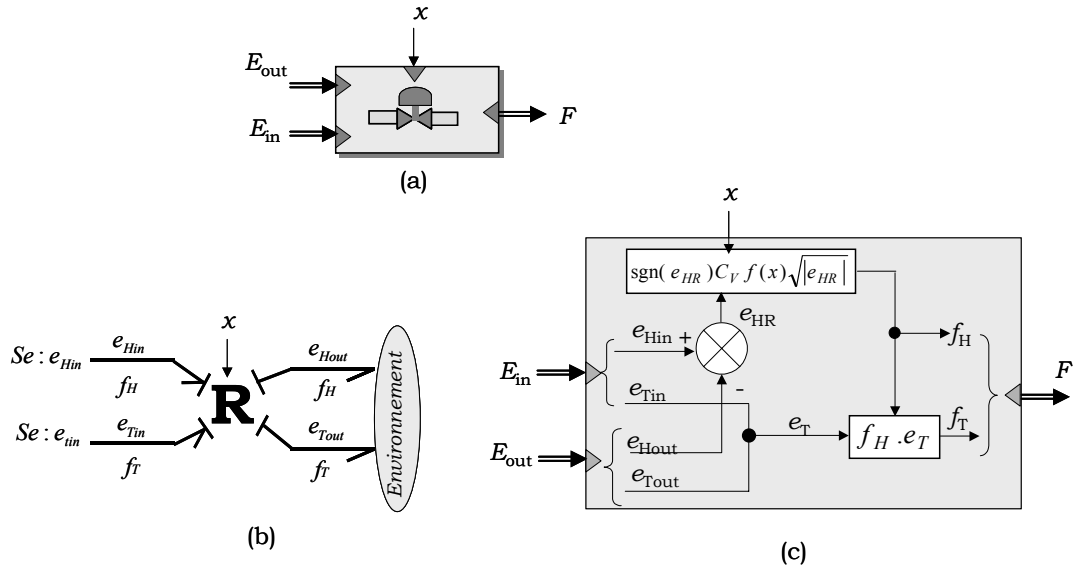


FIG. 2.29 – Modèle bond graph d’une vanne avec orifice variable: (a) schéma de principe, (b) modèle bond graph, (c) schéma-bloc.

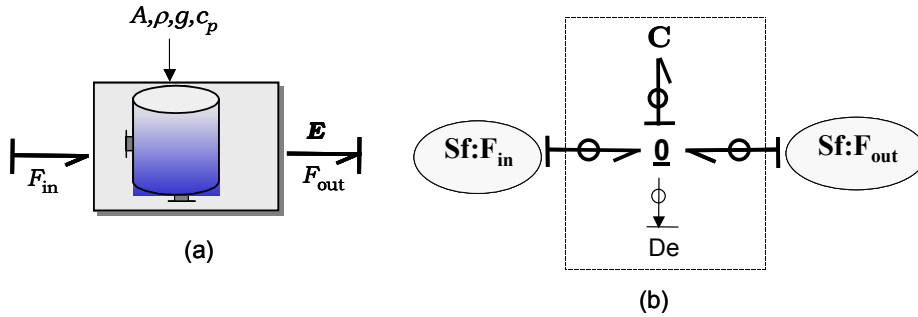


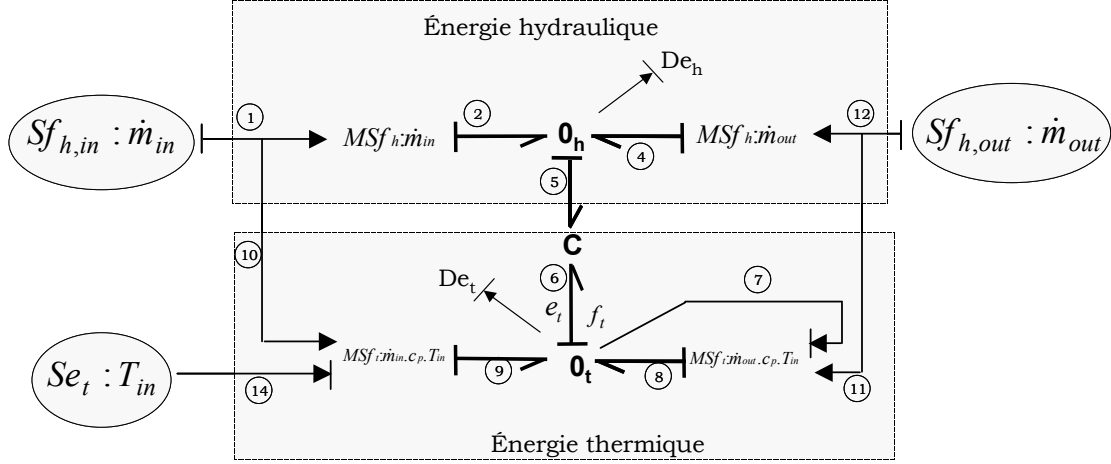
FIG. 2.30 – Composant "Réservoir de stockage" (a) et modèle bond graph couplé (b)

2.5.4 Bond graph linéarisé des composants thermofluides

Examinons pour fixer les idées quelques exemples [55].

Cette partie traite de la linéarisation des éléments rencontrés dans les systèmes thermofluides : la source thermofluide, l’élément dissipatif R (cas d’une résistance hydraulique simple, d’une résistance thermique simple, et du multiport R). Le même travail a été ensuite fait pour l’élément C . L’inertie quant à elle ne peut être trouvée sous la forme d’un multiport, alors on s’est contenté d’aborder le cas de l’inertie hydraulique.

Le cas de la pompe n’est pas trivial. Selon sa position dans le processus de production, le modèle bond graph de la pompe est différent.

FIG. 2.31 – *Modèle bond graph découlé d'un réservoir de stockage*

Ensuite tous les éléments linéarisés ont été introduits dans le logiciel *SYMBOLS2000* comme des capsules génériques qui tiennent compte des différentes causalités possibles.

Ces capsules sont désormais prêtes à être incorporées pour la simulation des systèmes thermofluides. Lors de l'implémentation de ces capsules, certaines paramètres doivent être précisés; cependant pour faciliter le travail, ces paramètres ont été formulés et il ne reste à l'utilisateur qu'à déterminer les valeurs numériques.

Dans les systèmes thermofluides, le couplage des deux énergies est quantifié par l'équation suivante:

$$\dot{H} = \dot{m}.h = \dot{m}.C_p.T = F(\dot{m}, T) \quad (2.17)$$

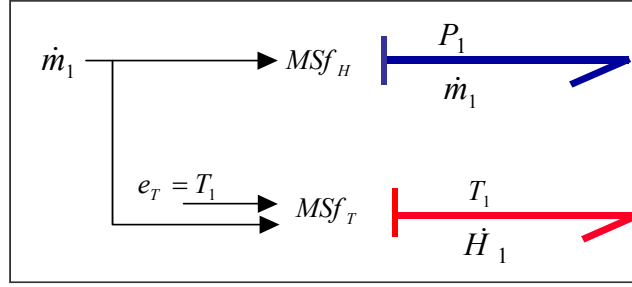
A travers cette équation non linéaire, on voit que le flux thermique f_T (flux d'enthalpie) est une fonction du flux hydraulique f_H (débit massique) et de l'effort thermique e_T (température):

$$f_T = F(f_H, e_T) \quad (2.18)$$

On rappelle qu'on représente la source thermofluide ST_f par la figure 2.32:

La linéarisation de cette équation autour du point de fonctionnement $(\bar{\dot{m}}, \bar{T}, \bar{\dot{H}})$ donne:

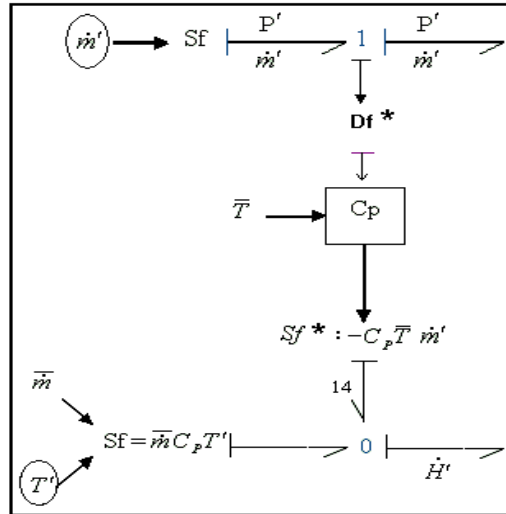
$$\begin{aligned} \dot{H}' &= \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{m}}\right)_{(\bar{\dot{m}}, \bar{T})} \cdot \dot{m}' + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_{(\bar{\dot{m}}, \bar{T})} \cdot T' \\ \dot{H}' &= C_p \cdot \bar{T} \cdot \dot{m}' + \bar{\dot{m}} \cdot C_p \cdot T' = a_0 \cdot \dot{m}' + a_1 \cdot T' \end{aligned} \quad (2.19)$$

FIG. 2.32 – Modèle bond graph d'une source thermofluide STf non linéaire

où $\dot{m}'$, $\dot{H}'$ et T' sont les variables incrémentées, et représentent les nouvelles variables.

Le terme $\bar{m}.C_p.T'$ est représenté dans le modèle bond graph linéarisé par une source de flux modulée par T' , le terme $C_p.\bar{T}.\dot{m}'$ par une source de flux modulée par un lien d'information sur la variation du débit hydraulique $\dot{m}'$. On suppose que le détecteur informant la source modulée est idéal (ne consomme pas de puissance) et par suite le lien liant les deux est représenté par une flèche entière classique.

Le bond graph linéarisé est représenté par la figure 2.33:

FIG. 2.33 – Modèle bond graph d'une source thermofluide STf linéarisée

Cette linéarisation ajoute donc au système une source de flux fictive modulée par une variable d'effort. Dans le but de faciliter la modélisation des systèmes thermofluides par des modèles bond-graphs linéarisés, une capsule *MR1* a été créée dans le logiciel *SYMBOLS2000*. Cette capsule contenant le sous-modèle, qui représente le multiport R en causalité conductance, sera disponible pour être incorporée dans n'importe quel modèle bond graph thermo-

fluide et avec n'importe quel nombre d'occurrences.

Deux raisons significatives pour la création et l'incorporation des capsules :

- création de modèles d'une installation d'une façon générique en connectant les composants technologiques d'une façon modulaire;
- analyse structurelle du processus global en utilisant les fonctionnalités existantes dans *SYMBOLS*. La capsule créée a été enregistrée dans la librairie des composants. Le sous-système (capsule) apparaît sur l'interface graphique du logiciel *SYMBOLS2000* comme le montre la figure 2.34 :

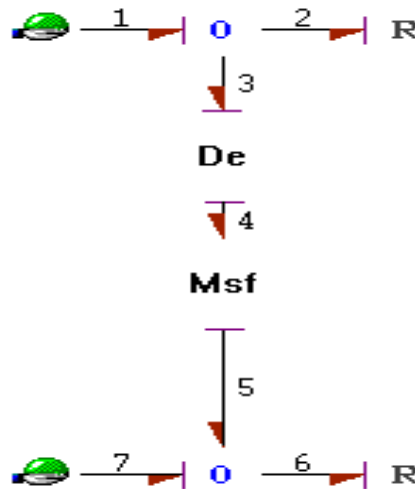


FIG. 2.34 – Capsule du multiport R (causalité conductance)

Les liens qui joignent une capsule à d'autres objets, éléments ou capsules ont ce que l'on appelle des portes collantes. Ici, les liens 1 et 7 ont des portes collantes; en effet le lien 1 et 7 portent chacun un *EIGP* (effort input glue port). Ces portes du point de vue bond graph ne sont ni des sources d'effort, ni des sources de flux. Elles permettent le couplage du modèle au niveau des jonctions 1 hydraulique et thermique.

Contrairement à une source d'effort (resp. de flux), une porte d'effort (resp. de flux) amène l'information sur l'effort (resp. le flux) du modèle parent (ou sous-modèle) à la capsule et passe l'information sur le flux (resp. l'effort) de la capsule au modèle parent.

Une icône a été faite pour distinguer le multiport résistance en causalité conductance des différentes capsules existantes déjà dans la librairie. Cette icône a été faite en utilisant Icone Editeur, un outil accessoire dans le logiciel cité.

2. Causalité résistance

Le modèle bond-graph d'une résistance multiport (causalité résistance) est celui indiqué par la figure 2.35:



FIG. 2.35 – Modèle bond graph d'une résistance multiport en causalité résistance

Les équations constitutives dans le cas d'un 2-Ports R en causalité résistance sont :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ T_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(\dot{m}) \\ T_1(\dot{m}) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Le BG linéarisé et la capsule dans *SYMBOLS* seront tels qu'ils sont indiqués sur les figures 2.36(a) et 2.36(b):

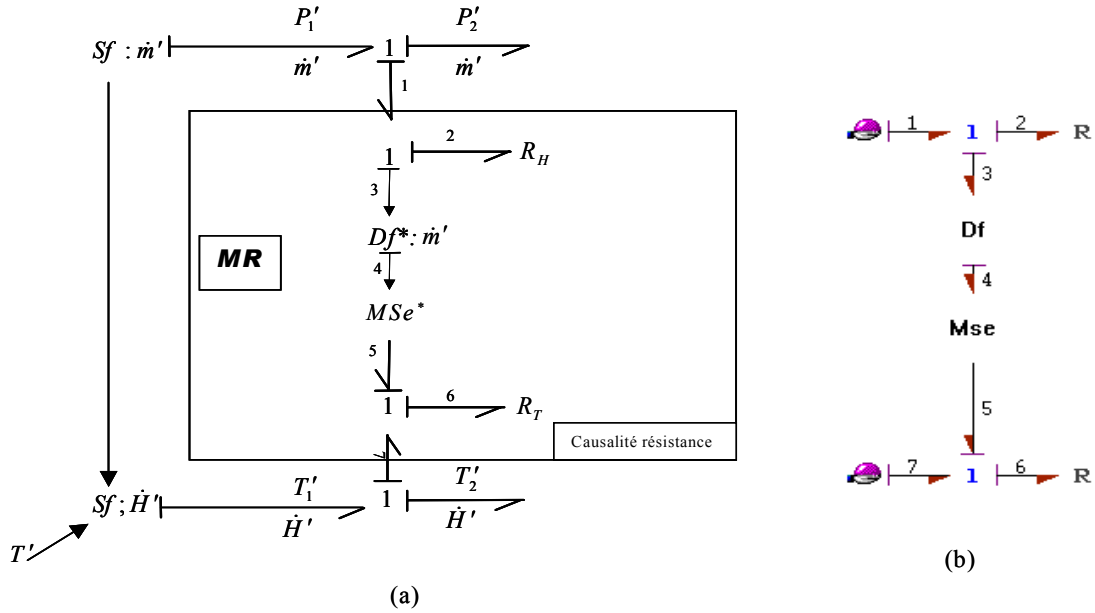


FIG. 2.36 – (a) bond graph linéarisé (causalité résistance), (b) capsule correspondante

Ici, les liens 1 et 7 ont des portes collantes; en effet les liens 1 et 7 portent chacun un *FIGP* (flux input glue port).

Enfin, les capsules étant faites dans les différentes causalités possibles, on a remplacé ces capsules par une capsule générique.

Une capsule générique est un groupe de capsules d'un même modèle en différentes causalités possibles. Quand un utilisateur implémente une capsule générique dans le modèle, suivant la nécessité, la capsule interne portant la causalité concernée sera chargée.

Dans nos capsules, on a fait appel à une source de flux et à une source d'effort modulées. En général tout lien d'information ne doit être représenté que par une porte de flux et le retour d'effort doit être interdit.

Le bond graph linéarisé d'un élément C à 2 ports et la capsule résultante dans *SYMBOLS2000* sont indiqués respectivement par les figures 2.37(a) et 2.37(b):

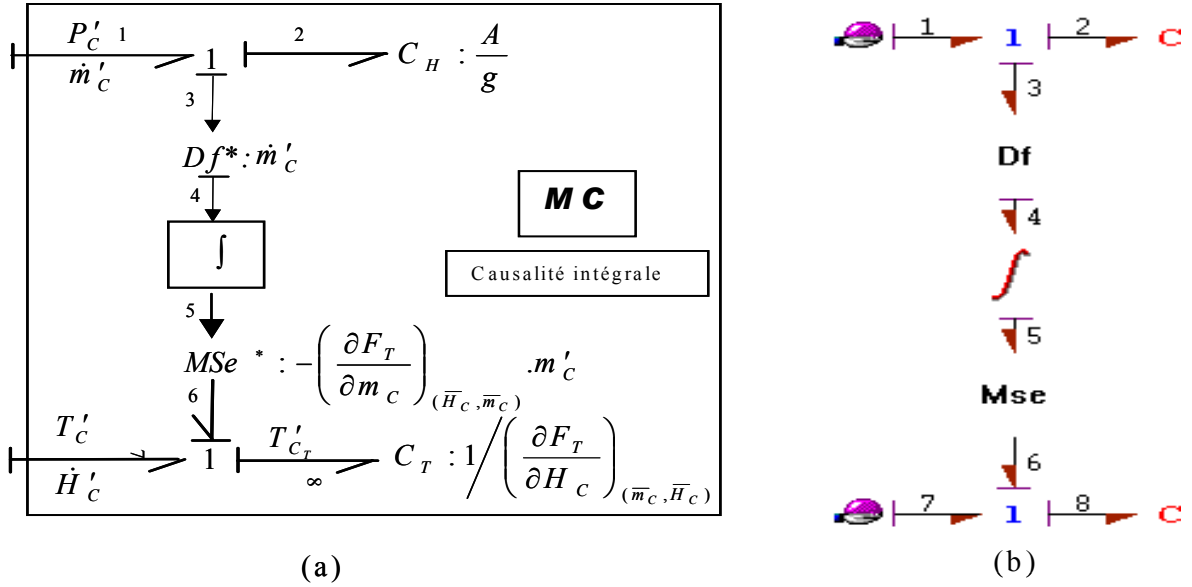


FIG. 2.37 – Modèle bond graph linéarisé du multiport C , (a) et capsule correspondante (b).

La capacité du lien 2 est la capacité hydraulique, celle du lien 8 est la capacité thermique.

Le multiport est connecté au modèle parent par l'intermédiaire des portes collantes (*FIGP*) se trouvant sur les liens 1 et 7.

2.6 Conclusion

La modélisation des systèmes à structure rigide (mécanique, électrique) a connu d'énormes progrès, par contre, la modélisation des systèmes thermiques, thermodynamiques ou tout simplement en génie des procédés reste encore un domaine ouvert en raison de la complexité (due au couplage des phénomènes thermique, chimique, hydraulique, et au nombre de variables les décrivant..) de ces phénomènes. Le choix de ces variables de puissance n'est pas trivial et dépend du système à modéliser.

D'autre part du point de vue de la supervision, un processus industriel est considéré par l'opérateur en termes de fonctions (ce que fait le système ou le composant) et non en terme du modèle mathématique. C'est pourquoi une classification de ces processus sur la base d'une approche fonctionnelle et bond graph est développée. Cette classification permet d'entrevoir une implémentation information des méthodes d'analyse des modèles bond graph.

Le modèle bond graph est aussi un outil d'analyse, afin d'appliquer les propriétés structurelles déduites du bond graph linéaire, nous avons étendu les méthodes de linéarisation des bond graph multiport monoénergie aux bond graph couplés. Nous avons alors exploité cette propriété pour la linéarisation des modèles complexes des processus thermofluides à partir uniquement des bond graphs linéarisés de chaque composant. Le modèle global linéarisé est alors obtenu en connectant chaque composant. Une implémentation informatique pour l'étude des propriétés structurelles sur ces modèles est en cours de développement sur le logiciel *SYMBOLS2000*.

Chapitre 3

Identification des défaillances d'un système thermofluide

3.1 Introduction

Dans le passé, les systèmes automatisés de production ont contribué à assister l'opérateur dans ses tâches de conduite automatique du processus pour améliorer la qualité des produits finis, la sécurité et le rendement des unités industrielles. L'objectif principal était d'augmenter la productivité en implantant des commandes performantes. Aujourd'hui, un autre challenge est apparu, il s'agit de l'automatisation de la surveillance des processus en utilisant un contrôle intelligent fournissant ainsi à l'opérateur humain une assistance dans ses tâches urgentes de gestion des situations d'alarmes pour l'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement du processus [64].

La gestion des risques et la gestion des situations des alarmes sont toutes les deux concernées par les questions de sûreté de fonctionnement. La première concerne le diagnostic des origines des fautes alors que la deuxième concerne l'analyse des conséquences des fautes. La mise en place des procédures de détection et de diagnostic des fautes constitue la première étape dans l'automatisation des systèmes de supervision [26] et [63].

Notre travail s'efforce de faire la liaison entre ces deux parties, utilisant le modèle bond graph à notre disposition pour surveiller le système. Des études ont été effectuées sur le placement de capteurs pour la surveillance d'un modèle bond graph. L'objectif de ce qui suit est de tenter d'appliquer ce travail aux modèles plus complexes que sont ceux des systèmes thermodynamiques, à savoir multiports et non linéaires.

Les bond graphs monoénergies sont utilisés pour la modélisation des processus mettant en oeuvre une seule énergie à la fois (mécanique, électrique, ou thermique,...). Les processus technologiques en génie des procédés sont caractérisés par l'interaction des phénomènes thermiques, hydrauliques et chimiques. Ces trois formes de puissance sont couplées. Ainsi, les

systèmes thermofluides introduisent une complexité supplémentaire dans leur modélisation, puisque le flux d'énergie thermique est lié à la masse du fluide transporté d'une position à une autre sans effet de dissipation.

Les méthodes existantes de placement de capteurs par bond graph [76] reposent, soit sur un modèle statique [6] qui ne tient pas compte de la dynamique du système soit sur un modèle dynamique [60] mis sous forme d'équations d'état et difficile à résoudre. Les travaux initiés pour les bond graphs monoénergies en génie des procédés sont décrits par des bond graphs à énergies couplées. De plus, ils ont posé comme cahier de charges, la détection, la localisation et l'identification des défaillances des processus thermofluides [77], [34] et [63] au niveau des capteurs, des actionneurs, des composants physiques (fuite du fluide dans un réservoir), ou défaut de calorifugeage thermique au niveau des composants de stockage d'énergie ou de type bouchage des conduites. Parmi ces travaux nous pouvons citer:

”Application de la modélisation bond graph à la surveillance des systèmes complexes” l'inconvénient majeur de cette méthode réside dans la détermination de l'expression analytique de la matrice de projection permettant de générer les relations de redondance [76].

” Procédures graphiques pour l'analyse structurelle de systèmes physiques modélisés par bond graphs” [56].

” Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés” consiste à la génération des relations de redondance sensibles aux défaillances des systèmes de commande pour la détection et la localisation des défaillances au niveau des composants physiques avec des capteurs déjà placés [9].

Pour la surveillance, divers outils ont été utilisés, dont nous citons les graphes bipartis orientés puis les bond graphs [10].

3.2 Placement de capteurs à partir des bond graphs

Dans ce cadre, initialement les modèles bond graph obtenus ne sont pas directement utilisés comme support à la surveillance : une fois le modèle effectué, une transformation de celui-ci vers une forme plus connue pour la surveillance est utilisée pour la génération des Relations de Redondance Analytique (*RRAs*). Le modèle est alors utilisé en causalité intégrale, ce qui bien sûr pose le problème des conditions initiales mais en contre-partie évite les difficultés du calcul numérique de la dérivée des résidus lors de sa simulation. Ces travaux ont fait l'objet d'applications à des processus thermofluides ([62], [1], [63]).

3.2.1 Génération des *RRAs*

La génération sous forme symbolique des *RRAs* est un problème complexe en raison de la diversité des modèles et de la procédure d'élimination des variables inconnues à partir d'un

ensemble d'équations (représentant le modèle dynamique du procédé) ([13], [29], [8]). Pour les processus thermofluides ces modèles sont principalement sous forme d'un ensemble complexe d'équations algébro-différentielles. La procédure est complexe et le choix des couplages est souvent intuitif. Le graphe devient rapidement complexe avec l'augmentation du nombre de variables. Les équations ne mettent pas en évidence explicitement le nombre et le type de variables à inclure dans l'algorithme de surveillance. Du point de vue général où se situe l'analyse structurelle, le modèle du système est considéré comme un ensemble de contraintes qui s'appliquent à un ensemble de variables, dont seules certaines sont mesurées. Il faut alors un guide pour le choix de ces variables et de ces contraintes. Du point de vue de la supervision, les processus industriels sont en réalité vus par l'opérateur en termes de fonctions. Les méthodes de diagnostic développées dans la littérature utilisent soit des modèles de comportement (ou structurels) pour la redondance analytique ou des modèles fonctionnels ([54], [11], [12]). L'intégration des modèles fonctionnels et comportementaux pourrait compléter les insuffisances de chaque méthode.

L'outil bond graph par ses propriétés structurelles et causales d'une part, et son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est introduit pour la contribution à la conception des systèmes de surveillance.

Les outils de modélisation des procédés sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes de surveillance. Le présent chapitre est consacré à la mise en place de méthodes permettant de détecter, d'isoler et d'identifier les défaillances survenant au sein d'un système thermofluide modélisé par un bond graph multiénergie couplé. Les procédures systématiques de génération des *RRAs* à partir des modèles bond graph non linéaires pour détecter des fautes pouvant affecter le processus physique, les actionneurs, et le système de régulation sont développées. Toutefois, il est possible d'analyser la surveillabilité de certains éléments, toujours à partir du modèle bond graph, sans avoir besoin de calculer les *RRAs*. Une fois les fautes sont isolées, la jonction sur laquelle est placé le détecteur d'effort ou de flux va nous informer sur le genre de défaillance.

3.2.2 Algorithme de placement de capteurs

L'outil bond-graph [32] par ses propriétés structurelles et causales d'une part, et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est introduit pour la contribution à la conception des systèmes de surveillance.

Un modèle bond graph est un graphe qui décrit les échanges de puissance à travers des liens appelés bonds au sein d'un système physique. Le postulat de puissance indique que tout bond porte les deux variables duales, effort et flux. Les noeuds du graphe sont de deux types:

- Les éléments de base qui permettent de stocker (I, C), dissiper (R) ou transformer (TF, GY) l'énergie dans le système.

- Les noeuds jonction (0 ou 1) qui représentent la conservation de l'énergie.

La causalité est le moyen de donner un sens calculatoire au modèle en imposant un sens de calcul : effort connu ou flux connu.

Par rapport à une description classique d'un processus, la localisation des capteurs sur un modèle bond-graph correspond à un placement physique sur le processus. En effet le placement d'un capteur sur une jonction "0" ou "1" correspond à un composant physique où se déroule une conservation d'énergie (réservoir, conduite, etc...). On distingue deux grandes classes de capteurs en bond-graph, les détecteurs d'effort De (capteur de pression, de température) et les détecteurs de flux Df (débit massique, volumique). D'autres types de capteurs peuvent être rajoutés, ils sont toutefois, toujours associés aux deux classes De et Df . Il s'agit de capteur de puissance (le produit $De.Df$ en vrai bond-graph) ou correspond à la variable de flux en pseudo bond-graph et de capteur de niveau (dépend de celui de la pression donc de l'effort). Un détecteur d'effort De dans une jonction 0 avec un élément C correspond à un capteur de pression ou de température dans un élément de stockage (réservoir). Un détecteur de flux Df dans une jonction 1 avec un élément R correspond à un capteur de flux sur une conduite ayant une résistance R .

Le bond-graph est un graphe dans lequel sont définis des boucles et des chemins causaux, parcourus en suivant la propagation de l'information effort ou flux, et ce, quel que soit le sens des demi-flèches [15]. Un chemin causal généralisé est un chemin qui peut traverser les liens de puissance et les liens d'information, ou les deux à la fois. Un composant est dit surveillable si et seulement si les défaillances affectant ce composant peuvent être détectées et isolées.

3.2.3 Contraintes pour la surveillance des composants

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.

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 capteurs et les sources ne sont pas affectés. Puisqu'en bond graph, les détecteurs ne sont placés qu'aux jonctions, on considère un placement virtuel du capteur à la position j , ce qui est représenté par une variable booléenne. De plus, à chaque type de jonction, on peut connaître le type de détecteur, ce qui réduit la combinatoire d'affectation.

Soit N_0 le nombre de jonctions 0_{Ci}

Soit N_1 le nombre de jonctions 1_{Rj}

Soit i le numéro des jonctions 0_{Ci}

Soit j le numéro des jonctions 1_{Rj}

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

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

Soit C l'ensemble de variables connues $C = \{Sf_1, Sf_2, De_i, Df_j\}$

Soit X l'ensemble des variables inconnues $X = \{e_{Ci}, f_{Ci}, e_{Rj}, f_{Rj}\}$

Soient x_i et y_j les variables booléennes caractérisant le placement ou non des capteurs.

Les équations aux jonctions 0_{Ci} sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^n a_k f_k = 0 \text{ où } a_k = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ e_k = e_{Ci} \text{ pour } k = 1, n \end{array} \right. \quad (3.1)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{Ci} = \Phi_{Ci}[s\{(1 - x_i)e_{Ci} + x_i De_i\}] \text{ où } i = 1, N_0 \\ e_{Ci} = \frac{1}{s}(1 - x_i)\Phi_{Ci}^{-1}(f_{Ci}) + x_i De_i \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Les équations aux jonctions 1_{Rj} sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^m a_l e_l = 0 \text{ où } a_l = \begin{cases} 1 & \text{si la demi-flèche est vers la jonction} \\ -1 & \text{sinon} \end{cases} \\ f_l = f_{Rj} \text{ pour } l = 1, m \end{array} \right. \quad (3.3)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{Rj} = \Phi_{Rj}[(1 - y_j)f_{Rj} + y_j Df_j] \text{ avec } j = 1, N_1 \\ f_{Rj} = (1 - y_j)\Phi_{Rj}^{-1}(e_{Rj}) + y_j Df_j \end{array} \right. \quad (3.4)$$

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 défaillances.

La structure d'un résidu est caractérisée par le vecteur binaire dans lequel on associe à l'ensemble des relations de redondance analytique R , l'ensemble des variables connues C .

La structure sr est définie par :

$$sr(r, c) = \begin{cases} 1 & \text{si et seulement si } c \text{ apparaît dans la RRA } r \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.5)$$

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

$$sd_i = [sr(r_1, f_i), sr(r_2, f_i), \dots, sr(r_k, f_i), \dots, sr(r_m, f_i)]^t \quad (3.6)$$

$$sr(r_k, f_i) = \begin{cases} 1 & \text{si le résidu } r_k \text{ utilise la relation } f_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.7)$$

Par abus de langage, 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 et seulement si le vecteur sd_i est différent du vecteur nul.

f_i est isolable si et seulement si elle est détectable et $\forall f_j \in F / i \neq j \quad \exists r_k \in R / sr(r_k, f_i) \oplus sr(r_k, f_j) = 1$ c'est à dire unique dans sa classe.

$$\begin{cases} f_i \text{ est détectable ssi le vecteur } sd_i \neq 0 \\ f_i \text{ est isolable ssi } \forall f_j \in F / \exists r_k \in R / sr(r_k, f_i) \oplus sr(r_k, f_j) = 1 \end{cases} \quad (3.8)$$

Les méthodes utilisées jusque là [60] testent les vecteurs binaires deux à deux en utilisant la distance de Hamming.

Etudions d'abord à travers un exemple, la problématique de la combinatoire.

3.2.4 Exemple

Soit le schéma d'un système thermofluide constitué de trois réservoirs représenté par la figure 3.1 :

Le but principal des deux réservoirs est de fournir un débit d'eau continu Q_o au consommateur. Le processus consiste en la connexion des deux réservoirs T_1 et T_2 à l'aide d'un tuyau. Le réservoir T_1 est rempli par la pompe P_1 au dessus d'un niveau nominal d'eau $h_1 = 0.5m$. Le niveau d'eau dans ce réservoir T_1 est contrôlé par la commande du niveau de P_1 actionnée par le flux d'entrée Q_p fourni par la pompe.

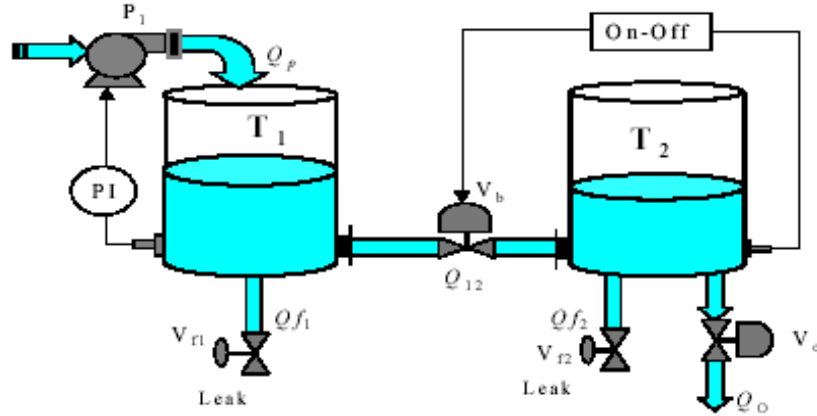


FIG. 3.1 – Système thermofluide à deux réservoirs

Le débit d'eau Q_{12} entre les deux réservoirs T_1 et T_2 peut être contrôlé par une vanne V_b utilisant un contrôleur "ON/OFF" afin de maintenir le niveau d'eau h_2 dans le réservoir T_2 au milieu ($0.09m \leq h_2 \leq 0.11m$). La quantité du débit d'eau de sortie Q_o destiné au consommateur est simulé par la position vanne V_0 . Dans notre cas, V_0 est ouverte en régime nominal. Les vannes V_{f1} et V_{f2} peuvent être utilisées pour simuler les fuites respectivement dans les réservoirs T_1 et T_2 . Le tuyau de connexion entre les réservoirs est placé au bas des réservoirs (tuyau avec la vanne V_b).

Le modèle bond graph correspondant donné par la figure 3.2, est composé de : 2 jonctions $0 : 0_1$ et 0_2 , 2 jonctions $1 : 1_1$ et 1_2 , 4 composants : C_1 , R_1 , C_2 , et R_2 , 2 sources : Sf_1 et Se_1 . Le placement des capteurs est virtuel.

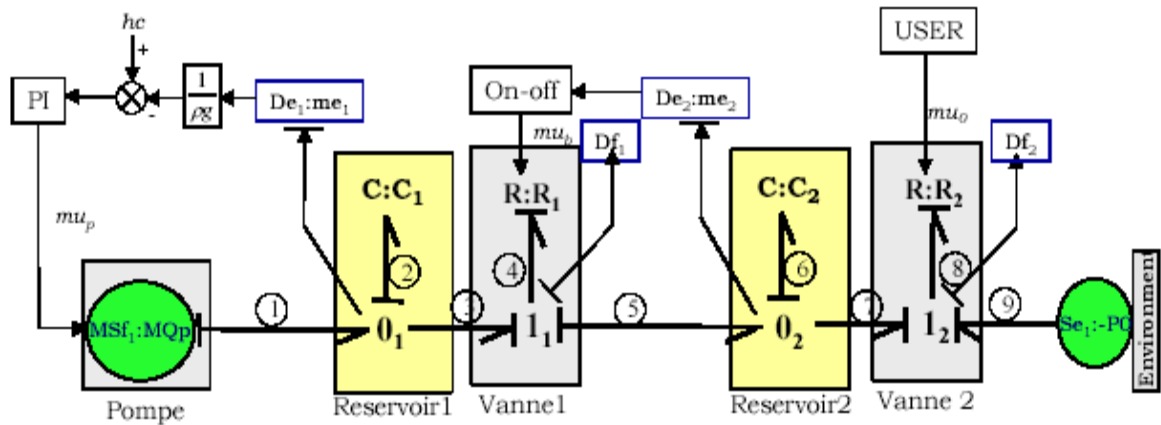


FIG. 3.2 – Modèle bond graph avec des détecteurs virtuels

La problématique est qu'on veut placer un minimum de capteurs pour surveiller les 4

composants en supposant que les fautes ne sont pas multiples et que les capteurs et les sources ne sont pas affectés. L'ensemble des variables connues $C = \{Sf_1, De_1, Df_1, De_2, Df_2, Se_1\}$ et l'ensemble des variables inconnues $X = \{e_2, f_2, e_4, f_4, e_6, f_6, e_8, f_8\}$.

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

Pour la jonction 0_1 on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 - f_2 - f_3 = 0 \quad \text{et} \quad e_1 = e_2 = e_3 \\ f_1 = Sf_1 \text{ et } f_{C1} = f_2 = \Phi_{C1}[s\{(1-x_1)e_2 + x_1De_1\}] \\ e_2 = e_{C1} = \frac{1}{s}(1-x_1)\Phi_{C1}^{-1}(f_2) + x_1De_1 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Pour la jonction 1_1 on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_3 - e_4 - e_5 = 0 \quad \text{et} \quad f_3 = f_4 = f_5 \\ e_{R1} = e_4 = \Phi_{R1}[(1-y_1)f_4 + y_1Df_1] \\ f_4 = f_{R1} = (1-y_1)\Phi_{R1}^{-1}(e_4) + y_1Df_1 \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Pour la jonction 0_2 on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_5 - f_6 - f_7 = 0 \quad \text{et} \quad e_5 = e_6 = e_7 \\ f_{C2} = f_6 = \Phi_{C2}[s\{(1-x_2)e_6 + x_2De_2\}] \\ e_6 = e_{C2} = \frac{1}{s}(1-x_2)\Phi_{C2}^{-1}(f_6) + x_2De_2 \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Pour la jonction 1_2 on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_7 - e_8 - e_9 = 0 \quad \text{et} \quad f_7 = f_8 = f_9 \\ e_{R2} = e_8 = \Phi_{R2}[(1-y_2)f_8 + y_2Df_2] \\ f_8 = f_{R2} = (1-y_2)\Phi_{R2}^{-1}(e_8) + y_2Df_2 \end{array} \right. \quad (3.12)$$

A partir des équations aux jonctions on obtient :

$$\begin{aligned}
Sf_1 - \Phi_{C1}[s\{(1-x_1)e_2 + x_1De_1\}] - (1-y_1)\Phi_{R1}^{-1}(e_4) - y_1Df_1 &= 0 \\
\frac{1}{s}(1-x_1)\Phi_{C1}^{-1}(f_2) + x_1De_1 - \Phi_{R1}[(1-y_1)f_4 + y_1Df_1] - \frac{1}{s}(1-x_2)\Phi_{C2}^{-1}(f_6) - x_2De_2 &= 0 \\
(1-y_1)\Phi_{R1}^{-1}(e_4) + y_1Df_1 - \Phi_{C2}[s\{(1-x_2)e_6 + x_2De_2\}] - (1-y_2)\Phi_{R2}^{-1}(e_8) - y_2Df_2 &= 0 \\
\frac{1}{s}(1-x_2)\Phi_{C2}^{-1}(f_6) + x_2De_2 - \Phi_{R2}[(1-y_2)f_8 + y_2Df_2] - Se_1 &= 0
\end{aligned} \tag{3.13}$$

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

Deux combinaisons avec 3 capteurs ont permis d'assurer la surveillabilité des 4 composants.

Pour la combinaison $[x_1y_1x_2y_2]^t = [1 \ 1 \ 0 \ 1]^t$ les résidus sont donnés par :

$$r_1 = Sf_1 - \Phi_{C1}[sDe_1] - Df_1 \tag{3.14}$$

$$r_2 = De_1 - \Phi_{R1}[Df_1] - \frac{1}{s}\Phi_{C2}^{-1}(Df_1 - Df_2) \tag{3.15}$$

$$r_3 = \Phi_{R2}[Df_2] - \frac{1}{s}\Phi_{C2}^{-1}(Df_1 - Df_2) - Se_1 \tag{3.16}$$

La table des structures des résidus est donnée par TAB. 3.1:

	Φ_{C1}	Φ_{R1}	Φ_{C2}	Φ_{R2}
r_1	1	0	0	0
r_2	0	1	1	0
r_3	0	0	1	1

TAB. 3.1 – Signature de fautes utilisant trois capteurs

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles, donc les composants C_1 , R_1 , C_2 et R_2 sont surveillables.

Pour la combinaison $[x_1y_1x_2y_2]^t = [1 \ 0 \ 1 \ 1]^t$ les résidus sont donnés par :

$$r_1 = Sf_1 - \Phi_{C1}[sDe_1] - \Phi_{R1}^{-1}(De_1 - De_2) \tag{3.17}$$

$$r_2 = \Phi_{C2}[sDe_2] + Df_2 - \Phi_{R1}^{-1}(De_1 - De_2) \quad (3.18)$$

$$r_3 = Se_1 - De_2 - \Phi_{R2}(Df_2) \quad (3.19)$$

La table des structures des résidus est donnée par TAB. 3.2 :

	Φ_{C1}	Φ_{R1}	Φ_{C2}	Φ_{R2}
r_1	1	1	0	0
r_2	0	1	1	0
r_3	0	0	0	1

TAB. 3.2 – Signature de fautes utilisant trois capteurs

On remarque que les structures des résidus sont différentes et les signatures de fautes sont différentes et non nulles, donc les composants C_1 , R_1 , C_2 et R_2 sont surveillables.

Les résultats du placement de trois et quatre capteurs sont donnés par le tableau TAB. 3.3 :

Nbre de capteurs	Combinaisons	Surveillables	DéTECTABLES
3	1101	C_1, R_1, C_2, R_2	ϕ
3	1011	C_1, R_1, C_2, R_2	ϕ
3	1110	C_1, R_1	C_2, R_2
3	0111	C_2, R_2	C_1, R_1
2	0101	C_1, R_1	C_2, R_2
2	1010	C_1, R_1	R_2, C_2
2	1100	C_1, R_1	ϕ
2	1001	R_2	C_1, R_1
2	0011	R_2	R_1, C_2
2	0110	ϕ	C_1, R_1, C_2, R_2

TAB. 3.3 – Résultats du placement de 2 et 3 capteurs

3.2.5 Identification des défaillances :

les détecteurs d'effort De (capteur de pression, de température) et les détecteurs de flux Df (débit massique, volumique). Le capteur de niveau dépend de celui de la pression donc de l'effort. Un détecteur d'effort De dans une jonction 0 avec un élément C correspond à un capteur de pression ou de température dans un élément de stockage (réservoir). Un détecteur de flux Df dans une jonction 1 avec un élément R correspond à un capteur de flux sur une conduite ayant une résistance R représentant une vanne.

D'après les résultats déduits à partir de la génération des résidus r_i deux combinaisons $[De_1, Df_1, Df_2]$ et $[De_1, De_2, Df_2]$ permettent la détection, la localisation et l'isolation des défaillances affectant les 4 composants.

Le détecteur d'effort De_1 assure la surveillance du niveau d'eau dans le réservoir T_1 , le niveau d'eau dans ce réservoir est contrôlé par la commande du niveau de P_1 actionnée par le flux d'entrée Q_p fourni par la pompe donc c'est un capteur de pression qui est directement proportionnelle au niveau d'eau h_1 .

Le détecteur de flux Df_1 surveille le débit d'eau Q_{12} entre les deux réservoirs T_1 et T_2 qui est contrôlé par une vanne V_b c'est un capteur de débit volumique qui dans la deuxième combinaison peut être remplacé par le capteur du niveau d'eau h_2 dans le réservoir T_2 .

Le détecteur de flux veille à ce que la quantité du débit d'eau de sortie Q_o destiné au consommateur soit contrôlé par la position de la vanne V_0 .

Souvent en génie des procédés, les défaillances se résument en fuites dans les réservoirs et bouchage dans les conduites.

3.2.6 Méthode de placement

Dans cette section, nous présentons l'originalité de notre travail qui consiste en une méthode d'affectation des détecteurs sur les noeuds jonction du bond graph.

Une stratégie de placement de capteurs se dégage dans les bond graphs monoénergies. On suppose dans un premier temps qu'il n'existe pas de boucle de causalité.

Il est inutile de générer les relations de redondance analytique car les résidus sont déduits directement à partir de la combinaison donnée par le vecteur de placement de capteurs $[x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2]^t$.

Cette méthode s'énonce comme suit :

Pour chaque '1' dans la combinaison, associer une structure de résidu en suivant les règles ci-dessous:

1. Lorsqu'on a deux 1 adjacents, on place 1 sur la position de l'élément où le capteurs est placé et on met partout des 0:

$$[1 \ 1.X \ X \ X] \rightarrow [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

2. Si 1 est adjacent à 0, on garde la position du 1 et on remplace le 0 par 1:

$$[1\ 0] \rightarrow [1\ 1]$$

$$[0\ 1] \rightarrow [1\ 1]$$

3. Si on a 1 suivi de deux 0 consécutifs, on place le 1 et on remplace les 0 par des 1

$$[1\ 0\ 0] \rightarrow [1\ 1\ 1]$$

$$[0\ 0\ 1] \rightarrow [1\ 1\ 1]$$

4. Si les deux 0 sont suivis d'un 1, le dernier 0 et le 1 deviennent 1:

$$[1\ 0\ 0\ 1] \rightarrow [1\ 0\ 1\ 1]$$

Proposition 1 *Les règles 1 à 4 génèrent la structure des résidus sans les calculer effectivement*

preuve 1 *Ces règles de génération du tableau de signatures viennent du fait de l'existence des chemins causaux entre les jonctions où un capteur est placé et une autre où il est absent.*

En effet, si la combinaison contient un '1', un détecteur est placé à cette jonction et fera apparaître l'élément E correspondant dans le résidu par $\phi_E() =$

En parcourant les chemins causaux, la présence d'un '0' adjacent au '1' implique l'absence d'un détecteur au niveau de la position du '0' et impose l'utilisation de l'équation constitutive de l'élément présent à cette jonction, ce qui impose son apparition dans la structure du résidu.

L'apparition du '1' suivant le '0' arrête le calcul de substitution et donc éliminera l'élément correspondant (et ses poursuivants) dans la structure du résidu (règle 3); l'application de cette règle se fait dans les deux sens (droite et gauche).

Cependant, si deux '0' ou plus se suivent, la substitution dans les équations aux efforts et flux implique l'utilisation de l'équation de l'élément rattaché à la deuxième jonction où le détecteur est absent au dépens de celle du premier.

Ce raisonnement est répété si on a plusieurs '0' consécutifs, seul le dernier '0' (avant le '1') fera apparaître l'élément correspondant (règle 4).

Dans la cas d'une boucle de causalité (un chemin causal fermé ne contenant que des noeuds jonction), il suffit d'appliquer les règles aux positions extrêmes de la combinaison en les considérant comme adjacentes. (C.Q.F.D)

Cet ensemble d'heuristiques permet de déduire un algorithme de placement de capteurs sur un bond graph simple.

Proposition 2 *Le placement optimal sur une structure de jonction simple est celle qui alterne les positions des capteurs.*

preuve 2 *Raisonnons par induction sur le nombre de capteurs. $n = 1$ trivial, un seul capteur surveille un composant.*

Pour $n > 1$ composants, il faudrait k détecteurs $k \leq n$ pour surveiller le modèle.

A partir du bond graph, il a été montré que l'on peut générer un résidu par jonction où est placé un capteur donc il faut que k soit tel que :

$$2^k > n \quad (3.20)$$

pour avoir des combinaisons différentes.

On peut démarrer avec $k = n + 1$ si n est impair et $k = n$ si n est pair.

Pour $n = 2$, nous avons $[1 \ 0]$ et $[0 \ 1]$ représenté par la figure 3.3.

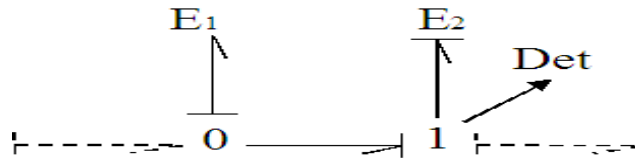


FIG. 3.3 – Cas de deux jonctions différentes représentant la combinaison $[0 \ 1]$

Ce qui nous donne un seul résidu et on ne peut pas surveiller les deux composants.

Pour $n = 3$, il est facile de vérifier que seule la combinaison $[1 \ 0 \ 1]$ permet de surveiller les trois composants. Elle donne lieu à deux résidus :

$$1 \ 1 \ 0$$

$$0 \ 1 \ 1$$

qui sont suffisants pour la surveillance. Supposons que la propriété est vraie à n , et montrons qu'elle reste vraie à $n + 1$.

1er cas : si n est impair alors la combinaison optimale est celle qui compute deux 1 extrêmes et une alternance de 0 et 1.

2ème cas : si n est pair alors la paire $[1 \ 0]$ ou $[0 \ 1]$ est dupliquée autant de fois que nécessaire, ceci conduit à la table de signature TAB. 3.4 :

Dans cette table, il est clair que toutes les combinaisons sont différentes deux à deux. Si on ajoute un composant à la colonne $n + 1$, pour le rendre surveillable, il suffit d'ajouter un résidu où seuls les composants n et $n + 1$ apparaissent, cela revient à ajouter un détecteur après le dernier 0 si n est pair et ne rien faire si n est impair.

3.3 Conclusion

Le modèle bond graph est un modèle multidisciplinaire et est surtout unifié à tous les domaines, l'introduction des chemins causaux dans ce modèle a facilité énormément la tâche du placement de capteurs pour la surveillabilité des processus industriels quel que soit leur

1	2	3	...	n
1	1	0	...	0
0	1	1	10...	0
:	:	:	:::	:
0	0	0	...01	1

TAB. 3.4 – *Signatures de défaillances*

complexité. Le fait aussi, qu'il peut assurer le couplage entre divers types d'énergie (*BG* couplés) simplifie le diagnostic et la compréhension des phénomènes physiques qui s'y déroulent. Le modèle bond-graph s'est révélé un outil efficace dans ce domaine, de par son aspect graphique, facilement compréhensible, il traite en effet, de la même manière, plusieurs domaines de modélisation macroscopique (électricité, mécanique, thermique, chimique,...). Néanmoins, au niveau de la modélisation apparaît la difficulté de faire le lien entre l'architecture et la physique du système car les *BG* sont une représentation graphique du transfert de puissance entre les composantes de ce système. Pour la tâche du placement de capteurs en vue de la surveillabilité des composants, notre algorithme s'est avéré efficace. C'est une technique qui d'une part évite l'exploration 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 derniers. Des perspectives de recherche peuvent concerner l'application des outils combinatoires pour d'autres cahiers de charge de la surveillance. Une autre perspective concerne les modèles bond-graphs couplés.

Chapitre 4

Application à un processus réel

4.1 Description du processus de génération de vapeur

Le processus technologique est une installation pilote qui représente le fonctionnement à échelle réduite d'une partie d'une centrale électrique. Elle est située à l'université de Lille (France) et appartient au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (*LAIL*), unité *CNRS*. La vue générale est présentée sur la figure 4.1:

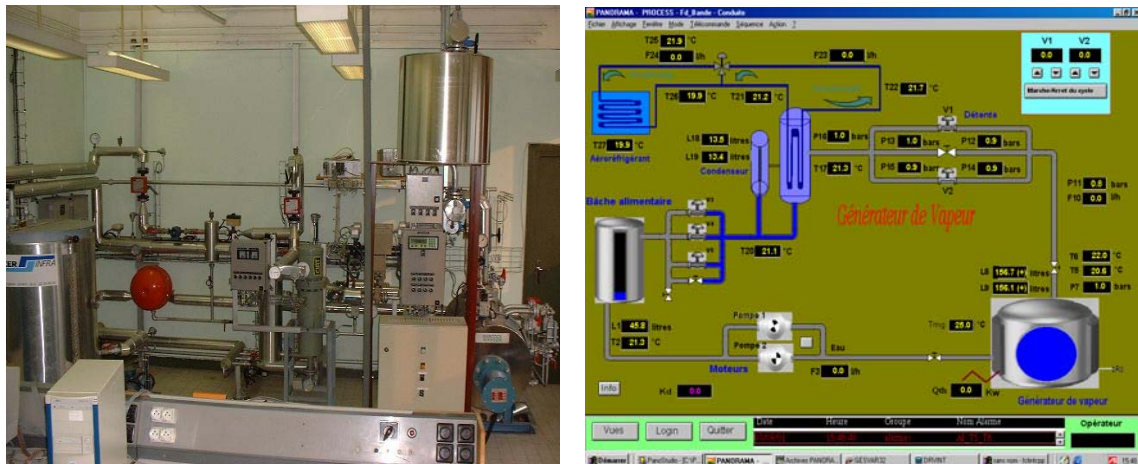


FIG. 4.1 – Vue générale de l'installation à surveiller et de son interface de supervision

L'installation est constituée principalement d'une chaudière d'une capacité de 175 litres qui réalise la chauffe et la vaporisation de l'eau au moyen d'un thermoplongeur, élément chauffant d'une puissance électrique de 60 kilowatts. Le Plan des Instruments Détaillés (*PID*) est donné par la figure 4.2:

La vapeur d'eau produite subit une détente isenthalpique par un ensemble de 3 vannes modulantes installées en parallèle. Le système de la détente de l'installation simule le fonc-

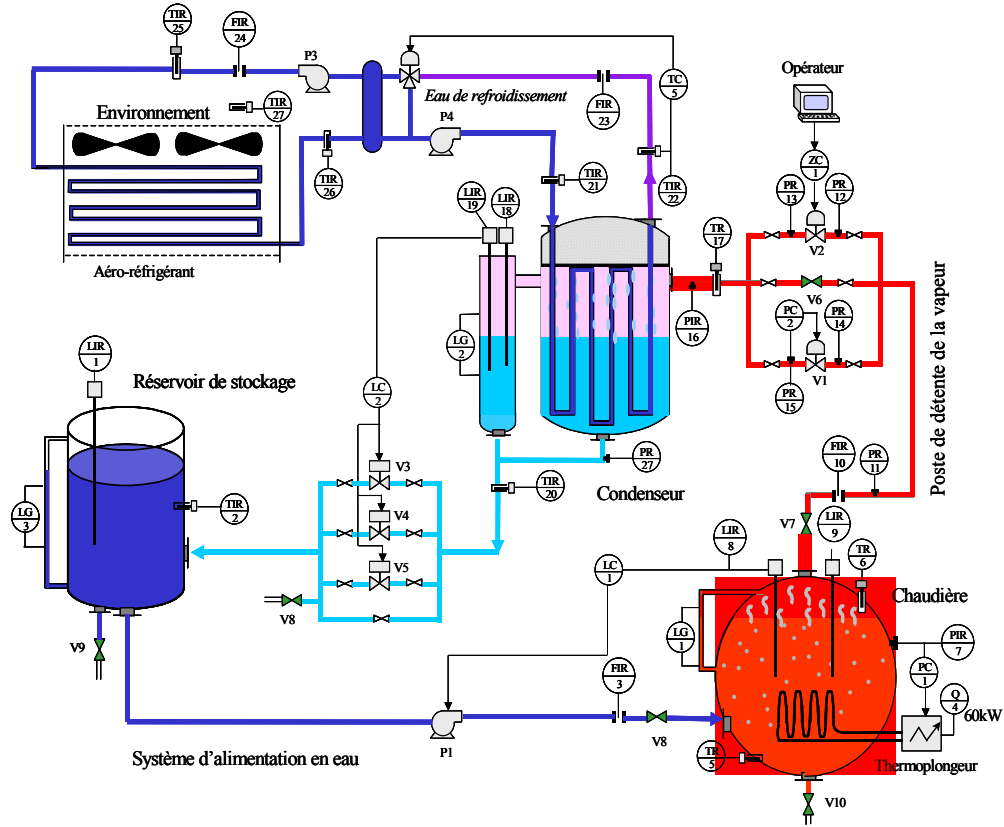


FIG. 4.2 – Plan des Instrument Détaillé du processus

tionnement technologique de la turbine dans une centrale électrique. Cette partie a pour but de faire chuter la pression de sortie du générateur de vapeur à l'aide d'un ensemble de vannes contrôlées comme indiqué sur le schéma de principe. La vanne V_7 est manuelle. La vanne V_2 est commandée à partir du calculateur en boucle ouverte. La consigne z_ref est le pourcentage d'ouverture (0–100%). Cette branche simule le contournement de la vapeur dans une centrale réelle. La vanne V_1 est asservie en boucle fermée en fonction de la pression du condenseur P_{15} . Cette branche simule le fonctionnement de la turbine. Une vanne de -manuelle fermée en fonctionnement normal, permet d'augmenter ou de diminuer la charge de l'installation par l'ouverture ou la fermeture du robinet ou de simuler une fuite dans le système. La troisième est commandée automatiquement, afin de garder constante la pression à l'intérieur du condenseur. La vapeur est ensuite condensée dans un échangeur-condenseur à l'aide d'un circuit de refroidissement d'eau. Suivant la température ambiante, l'eau de refroidissement peut utiliser le circuit court ou le circuit long. Le condensât est stocké dans une bâche alimentaire pour boucler le circuit. L'eau d'alimentation est refoulée par une pompe à vitesse constante vers la chaudière. Les paramètres opératoires de l'installation pilote à étudier sont saisis et visualisés sur un ordinateur à l'aide d'un logiciel de supervision.

4.2 Modélisation Bond graph de l'installation [65] et [35]

4.2.1 Bond graph à mots

Le bond graph à mots représente le niveau technologique de la modélisation. Ce niveau de modélisation consiste à construire l'architecture du système par l'assemblage des différents sous-systèmes. Les éléments de base sont des processus technologiques simples (échangeur de chaleur, bouilleur, conduite...). On décompose le système global en sous-systèmes simples. Le bond graph à mots est donné par la figure 4.3. A l'entrée et à la sortie de chaque sous-système de l'installation, nous avons représenté les variables de puissance mises en jeu et non les signaux comme dans les schémas-blocs classiques.

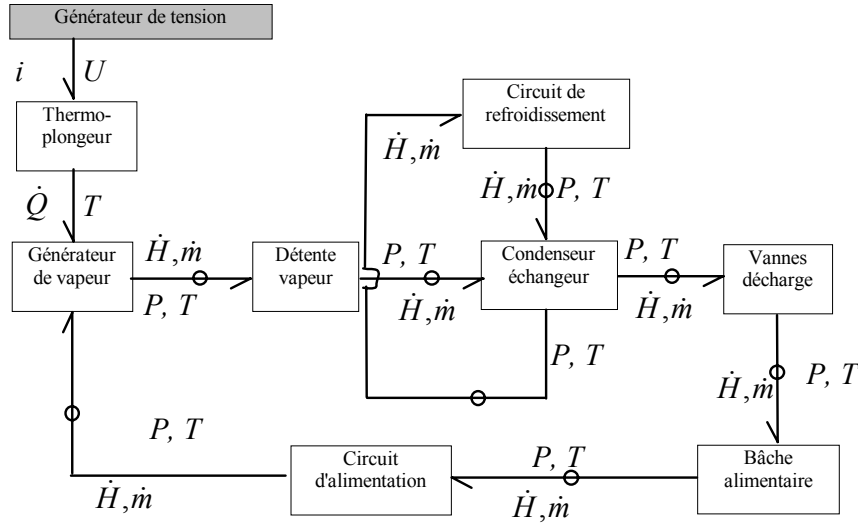


FIG. 4.3 – Bond graph à mots de l'installation

4.2.2 Problématique de la modélisation des générateurs de vapeur

Malgré le grand nombre de publications sur la modélisation des générateurs de vapeurs ([67], [81], [2], [59], [3]) (une recherche bibliographique détaillée est présentée dans [35] et [36]), jusqu'à présent, le problème de la modélisation des générateurs de vapeur des centrales électriques reste ouvert. La complexité est due principalement aux phénomènes couplés non linéairement et de natures diverses, aux phénomènes d'instabilités statiques, dynamiques et de type débit, aux phénomènes de gonflement-tassement (dus à la variation de la densité de la vapeur) décrit dans [36] (introduisant des dynamiques à déphasage non minimales incontrôlables) et enfin les variables internes difficilement mesurables, aux différentes configurations de modélisation (monophasique ou phases séparées).

Les modèles des centrales se différencient principalement par les hypothèses posées, les

équations employées, les méthodes de résolution, et les moyens de calcul. Nous pouvons les classer en :

- Modèles linéaires : les équations sont linéarisées autour d'un point de fonctionnement (régime nominal en général). Le système est alors écrit par l'interconnexion de fonctions de transfert [73]. Deux avantages sont liés à cette approche, les difficultés et le volume de calcul réduit et le grand nombre de méthodes d'analyse utilisables. L'inconvénient est que nous ne pouvons pas simuler les variations importantes et rapides de la charge et d'autres perturbations. En effet la sensibilité des résidus est fonction du point de fonctionnement. C'est pourquoi, ce type de modèle ne peut décrire fidèlement le procédé.
- Modèles non linéaires : les équations aux dérivées partielles de l'hydrodynamique (conservation de la masse, de l'énergie et du moment) sont transformées par discrétisation dans le temps et dans l'espace, en équations aux différences, et intégrées numériquement sans être linéarisées. Ces modèles permettent de déterminer la réponse à des grandes perturbations. L'inconvénient réside dans le fait qu'elles ne permettent pas une synthèse directe des régulateurs et nécessitent un grand volume de calcul. De plus, il existe trois ordres de complexité croissante du modèle, en fonction du nombre de dimensions d'espaces de l'écoulement pris en compte dans la modélisation. Dans les installations de petites dimensions, le modèle non linéaire peut être considéré à paramètres localisés: le système est alors décrit par un ensemble d'équations différentielles et algèbro-différentielles [59]. Il faut noter aussi que ce système est caractérisé par la coexistence de plusieurs phénomènes de natures diverses. C'est pourquoi, l'application d'une approche unifiée telle que les bond graphs ([65], [61], [83], [78]) permet de mettre en évidence la localisation des différents phénomènes de stockage et de dissipation et transformation d'énergie et de raffiner le modèle par simple ajout d'éléments bond graph.
- Modèles calculant ou non le volume d'eau : la dynamique du niveau d'eau joue un rôle important dans la modélisation des générateurs de vapeur en raison du phénomène de gonflement et de tassement. Celui-ci est dû à l'effet de variation de la densité de la vapeur. Il introduit alors une allure du niveau de déphasage non minimal très nuisible à la stabilité du système. La dynamique de ces deux phénomènes est dans l'industrie identifiée par des réponses de type à déphasage non minimal. Dans [61], un modèle physique non linéaire de ces phénomènes a été obtenu par une approche bond graph. Les dimensions géométriques et la puissance relativement réduite de notre installation ne mettent pas en évidence le phénomène de gonflement-tassement du niveau. C'est pourquoi, il ne sera pas modélisé. Il faut noter aussi que nous sommes en présence d'un mélange diphasique et qu'en réalité la séparation entre les phases vapeur et liquide en écoulement n'est pas aussi nette. Ce phénomène introduit les difficultés de mesure du niveau bien connues des industriels. D'autres phénomènes liés à la stabilité dans les

générateurs de vapeur sont traités dans l'ouvrage [78].

Même si un grand nombre de travaux en bond graph traitent les accumulateurs de vapeur comme un multiport C , ([30], [31], [58], [24]) quelques travaux ont timidement abordé le sujet de la modélisation des installations de génération de vapeur: on peut citer [83] et [55].

Les travaux cités jusque là, nous ont donné une plate-forme indispensable au diagnostic: c'est la modélisation des sous-systèmes de l'installation ce sont: la bache alimentaire représentant un réservoir de stockage d'eau, le circuit d'alimentation de l'installation comprenant la pompe, la vanne et la conduite, le générateur de vapeur représenté par une chaudière avec le thermoplongeur, la partie détente de la vapeur constituée d'un ensemble de vannes modulantes, le condenseur couplé à l'échangeur de chaleur, et enfin les vannes de décharge sur ces modèles nous avons implanté des indicateurs de défaillances, les détecteurs d'effort et de flux selon le besoin. Une fois les détecteurs sont placés, ils nous permettent de générer les relations de redondance analytique afin d'élaborer une table de signature de fautes pour la surveillance de tous les composants du système.

4.2.3 Réservoir de stockage

La bache alimentaire est un réservoir de stockage qui appartient à la classe des processus d'accumulation d'énergie. Le fluide n'y est pas chauffé: il est donc considéré comme sous-saturé. Les flux (de masse et d'enthalpie) sont imposés par les composants amont condenseur ($COMP_{i-1}$) et aval circuit d'alimentation ($COMP_{i+1}$).

Au niveau de chaque jonction du modèle bond graph nous avons inséré un détecteur, l'un est un capteur de niveau et l'autre est un capteur de température comme est indiqué sur la figure 4.4:

Les relations de redondance analytique $RRAs$ sont déduites des relations constitutives des jonctions "0" hydrauliques et thermiques. Nous n'avons qu'un capteur de niveau $De_h : L_1$. Dans le cas d'un processus thermofluide sous-saturé, nous avons montré que l'indication du capteur de niveau est proportionnelle à la pression au fond du réservoir: $De_h = \rho g L_1$

– Jonction "0_h"

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_7 - \dot{m}_3 = 0 \quad (4.1)$$

$\dot{m}_1$ et $\dot{m}_7$ représentent la somme algébrique des sources de flux respectivement à l'entrée et à la sortie du réservoir pris comme composant. Le réservoir étant connecté dans un réseau de processus, ces deux variables deviennent des sources d'énergie et sont alors exprimées en fonction des variables connues en propageant l'information effort ou flux liant ces variables

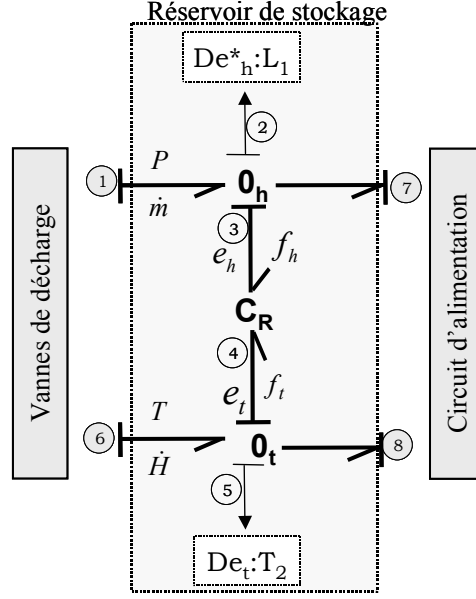


FIG. 4.4 – Modèle bond graph du réservoir de stockage

aux capteurs par un parcours de chemins causaux sur le bond graph du circuit d'alimentation et du modèle bond graph des vannes de décharge.

Le parcours du chemin causal 7 – $Df : F_3$ donne :

$$\dot{m}_7 = F_3 \quad (4.2)$$

$\dot{m}_1$ est le débit massique à l'entrée. Il est déterminé à partir du parcours de chemins causaux sur le modèle bond graph des vannes de décharges et du condenseur : (1 – 108 – 107 – R_{V3} – 107 – 106 – 101 – $De_h : P_{27}$), (1 – 105 – 104 – R_{V4} – 104 – 102 – 101 – $De_h : P_{27}$) et (1 – 111 – 110 – R_{V5} – 110 – 109 – 101 – $De_h : P_{27}$). De la jonction "0" à la sortie de la vanne de décharge, des jonctions "1" de chaque branche et des équations de comportement de vannes contrôlées par le régulateur $LC2, V3, V4$ et $V5$ on obtient :

$$\dot{m}_1 = \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1) \sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} (R_{V3} u_5 + R_{V4} u_6 + R_{V5} u_7) \quad (4.3)$$

Le premier résidu est alors:

$$\mathbf{R}_1 = \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1) \sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} (u_5 R_{V3} + u_6 R_{V4} + u_7 R_{V5}) - F_3 + C_{hR.s.}(\rho g L_1) \quad (4.4)$$

$R_{V(i=3,4,5)}$ sont les coefficients de débit de la vanne complètement ouverte (identifiées sur site), $u_{(i=5,6,7)}$ sont les variables de commande (booléennes) délivrées par l'algorithme du régulateur $LC2$ en fonction du niveau dans le condenseur.

- Le second résidu est déterminée de la jonction 0_t thermique :

$$\dot{H}_6 - \dot{H}_4 - \dot{H}_8 = 0 \quad (4.5)$$

On considère que la capacité thermique c_p est constante dans le composant (l'eau est à température ambiante). La variable T_6 est la température du fluide à l'entrée, elle est indiquée par le capteur T_{20} . On considère que les pertes thermiques dans le circuit de décharge (bien calorifugées) sont négligeables, de plus le gradient de température entre celle du fluide et celle extérieure est faible. Sur le bond graph, cette égalité est représentée par les jonctions "0" mises dans le lien de puissance thermique (chemin $6 - 113 - 112 - 102 - De_t : T_{20}$). Rappelons que les éléments RC (résistance de couplage) sont ajoutées sur le lien de puissance thermique pour exprimer la relation entre le flux d'enthalpie et le débit de masse ($\dot{H} = \dot{m}c_p.T$).

Le résidu thermique sera :

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_2 = & T_{20}c_p \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1) \sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} (u_5 R_{V3} + u_6 R_{V4} + u_7 R_{V5}) \\ & - T_2 c_p F_3 - T_2 . C_{t.s.} (\rho g L_1) - \rho g L_1 C_{t.s.} (T_2) \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.2.4 Circuit d'alimentation en eau

Le circuit d'alimentation est constitué d'une conduite d'eau formée d'un ensemble de coudes, d'une restriction hydraulique, de deux pompes montées en parallèle et d'une vanne manuelle V_8 . L'eau est refoulée par une pompe hydraulique P_{p1} commandée par un relais en fonction du niveau d'eau dans le générateur de vapeur.

Les modèles bond graph sont donnés par les figures 4.5(a) et 4.5(b). Il est à noter que nous utilisons ici le modèle avec résistance de couplage car il se prête mieux que le modèle de la source thermofluide à la représentation des influences de la chaudière et du réservoir de stockage sur le circuit d'alimentation (c'est le cas généralement de tout processus- CT).

4.2.4.1

Deux modèles bond graph sont analysés pour la génération des $RRAs$ de ce composant.

A) Caractéristiques de la pompe et de la conduite séparées

Le modèle bond graph de la figure 4.5(a) représente les deux caractéristiques de la pompe et de la conduite séparément. R_{p1} et R_{V8} modélisent respectivement la caractéristique de la

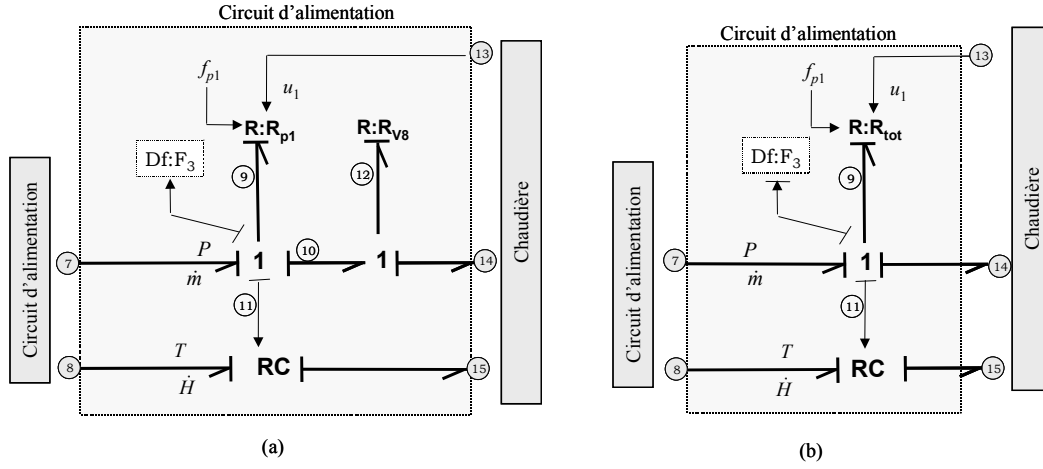


FIG. 4.5 – Modèle bond graph du circuit d'alimentation avec (a) et sans boucle algébrique (b)

pompe et de la conduite. La première est fonction du type de la pompe, elle est modulée par la commande fournie par le régulateur de niveau. La pompe est arrêtée lorsque le niveau est bas ($u_1 = 0$). Cette résistance est active, elle fournit de la puissance, c'est pourquoi elle est négative. La deuxième résistance est passive, elle consomme de l'énergie et représente le coefficient de perte de charge provoqué par les accidents de tuyauterie.

Du modèle bond graph on voit bien qu'il existe une boucle algébrique entre ces deux résistances, en suivant l'information de l'effort par exemple : $(7 - 9 - R_{p1} - 9 - 10 - 12 - R_{v8} - 12 - 10 - R_{p1} - 9 - 7)$. On peut évidemment résoudre cette boucle, mais manuellement.

Des deux jonctions, on écrit :

$$\begin{aligned} e_7 - e_9 - e_{10} &= 0 \\ e_{10} - e_{12} - e_{14} &= 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Le parcours des différents chemins causaux des variables inconnues vers les différents capteurs donne:

$$\begin{aligned} e_7 &= \rho g L_1 \\ e_9 &= f_{P1}(u_1, F_3) \\ e_{12} &= \Phi_{RV8}^{-1}(F_3) \\ e_{14} &= P_7 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Le résidu obtenu est alors:

$$r_{31} : \rho g L_1 - f_{P1}(u_1, F_3) - \Phi_{RV8}^{-1}(F_3) - P_7 = 0 \quad (4.9)$$

B) Caractéristiques de la pompe et de la conduite réunies

Les deux éléments résistifs représentant les caractéristiques de la pompe et de la conduite peuvent être modélisés par un seul élément R_{tot} représentant la résistance totale (figure 4.5(b)).

Soit P_{P1} la pression délivrée par la pompe, on écrit alors :

$$\Delta P = P_{P1} - \rho g L_1 \quad (4.10)$$

Le débit délivré par la pompe est donné par l'équation de la pompe utilisé sur le site pilote :

$$\dot{m}_9 = K_1 \Delta P + K_2 = f_{P1} = K_1 \Delta P + K_2 \quad (4.11)$$

D'autre part le débit passant par la conduite est égal à celui de la pompe (loi de continuité) :

$$\dot{m}_9 = \sqrt{P_{P1} - P_7} \quad (4.12)$$

La résolution de ces deux équations (en éliminant la variable P_{P1}) nous donne le débit passant par le circuit d'alimentation :

$$\dot{m}_9 = \frac{(R_{V8})^2 - R_{V8} \sqrt{(R_{V8})^2 - 4K_1 (K_2 + K_1 (P_7 - \rho g L_1))}}{2K_1} \quad (4.13)$$

En tenant compte de la commande u_1 , le résidu sera alors :

$$\mathbf{R}_3 = F_3 - \left(\frac{(R_{V8})^2 - R_{V8} \sqrt{(R_{V8})^2 - 4K_1 (K_2 + K_1 (P_7 - \rho g L_1))}}{2K_1} \right) . u_1 \quad (4.14)$$

4.2.5 Chaudière

Considérons le modèle bond graph de la figure 4.6 en configuration monophasique. Dans ce chapitre, le modèle sera utilisé pour la génération des $RRAs$, c'est pourquoi nous avons

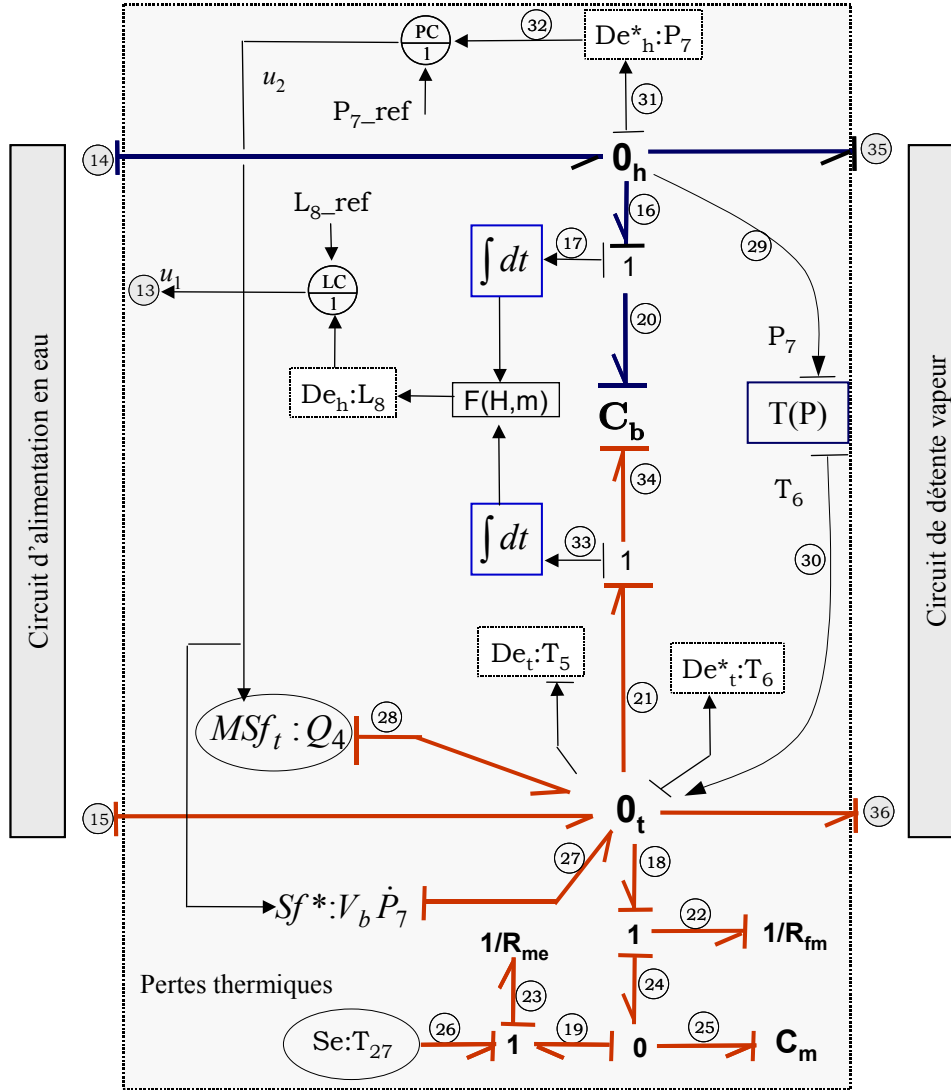


FIG. 4.6 – Modèle bond graph de la chaudière en causalité dérivée

représenté en détail l'architecture d'instrumentation (et plus particulièrement le capteur de niveau) ([78] et [59]).

Dans le cas de la chaudière l'analyse de l'ensemble des variables inconnues est beaucoup plus complexe : en plus des variables d'effort et de flux associées à chaque élément bond graph, la qualité de la vapeur X associée au multiport C est une variable d'état complémentaire qui n'est pas directement représentée par le modèle bond graph. En effet dans un système thermodynamique eau-vapeur en équilibre thermodynamique, les variables d'état sont associées bien sûr à la masse et l'enthalpie du mélange mais aussi à la qualité de la vapeur (le taux de vapeur contenue dans le mélange) comme peut le montrer le diagramme de Molier.

Le système d'instrumentation est composé des capteurs suivants :

$$\begin{bmatrix} P_7 & T_5 & T_6 & L_8 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

et des sources connues

$$\begin{bmatrix} T_{27} & Q_4 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

mesurant respectivement la pression, la température de l'eau et la vapeur, et le niveau dans le générateur de vapeur. T_{27} et Q_4 indiquent la mesure de la température extérieure et la puissance de chauffe qui sont considérées comme des sources de contrôle. La température ambiante $Se : T_{27}$ est une source de température considérée constante, alors que la puissance de chauffe du thermoplongeur $MSf : Q_4$ est une source de contrôle modulée (actionneur) par la variable de commande u_2 . Le capteur $De_h : L_8$ représente le capteur du volume d'eau dans la chaudière qui est bien sûr fonction du titre de la vapeur X , des variables de déplacement masse (m) et enthalpie (H) du mélange. Cette fonction est indiquée par l'expression $F(H, m)$ sur le modèle bond graph. $F(H, m)$ est le système d'équation du mélange. Par rapport au composant "réservoir de stockage", les indications de capteurs de niveau et de pression sont indépendantes. Les jonctions "1" (liens 17 et 33) sont rajoutées pour fournir l'information au capteur de niveau. Les températures de la vapeur et de l'eau saturée sont indiquées par les thermocouples T_5 et T_6 , ces mesures sont redondantes, car on considère un mélange homogène monophasique en équilibre thermodynamique. Leurs indications sont reliées par une relation thermodynamique $T(P)$ déterminée à partir de la table de la vapeur d'eau saturée.

– Redondance matérielle

Les capteurs $De_h : P_7$ et $De_t : T_6$ sont dualisés et mis en causalité dérivée. Les capteurs ne pouvant pas être dualisés sont alors redondants : c'est le cas du capteur $De_t : T_5$. La relation thermodynamique liant T_6 et P_7 introduit aussi une relation de redondance matérielle.

$$\mathbf{R}_4 = T_5 - T_6 \quad (4.17)$$

$$\mathbf{R}_5 = T_6 - T(P_7) \quad (4.18)$$

– Jonction "0_h" : conservation de l'énergie hydraulique

$$\dot{m}_{14} - \dot{m}_{20} - \dot{m}_{35} = 0 \quad (4.19)$$

La variable de flux hydraulique $\dot{m}_{20}$ dans la chaudière est une fonction non linéaire de la capacité thermique C_t et hydraulique C_h formant le multiport C_b :

$$\dot{m}_{20} = \Phi_h(C_h, C_t) \quad (4.20)$$

– **Jonction "0" : conservation de l'énergie thermique**

$$\dot{H}_{15} - \dot{H}_{34} - \dot{H}_{36} - \dot{Q}_{18} + V_b \cdot \dot{P}_{21} + \dot{Q}_4 = 0 \quad (4.21)$$

Le flux de vapeur $\dot{H}_{36}$ sort avec une enthalpie spécifique égale à celle de la vapeur h_v qui est une fonction thermodynamique de la pression $h_v(p)$ et avec un débit massique $\dot{m}_{35}$. Le flux d'enthalpie à l'entrée $\dot{H}_{15}$ arrive du circuit d'alimentation avec un débit massique $\dot{m}_{14}$. $\dot{Q}_{18}$ sont les pertes thermiques par conduction vers le métal du corps de la chaudière. $V_b \cdot \dot{P}_7$ est le travail fourni par les forces de pression. V_b est le volume géométrique de la chaudière.

On déduit :

$$\dot{m}_{14} c_p T_{15} - \dot{H}_{34} - \dot{m}_{35} h_v(P_7) - \dot{Q}_{18} + V_b \cdot \dot{P}_7 + \dot{Q}_4 = 0 \quad (4.22)$$

La variable de flux hydraulique $\dot{H}_{34}$ dans la chaudière est aussi une fonction non linéaire de la capacité thermique C_t et hydraulique C_h formant le multiport C_b :

$$\dot{H}_{34} = \Phi_t(C_h, C_t) \quad (4.23)$$

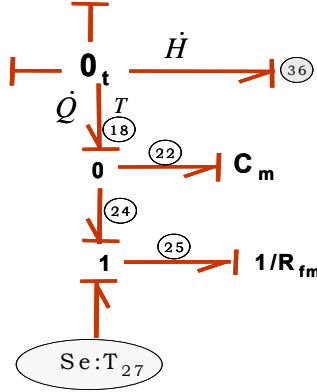
D'autre part, les variables $\dot{m}_{14}$ et $\dot{m}_{35}$ sont déduites des modèles bond graphs précédents : $\dot{m}_{14} = F_3$ et $\dot{m}_{35} = F_{10}$, d'où la *RRA* suivante en remplaçant l'expression de $\dot{m}_{20}$ dans la relation du la chaudière :

$$\mathbf{R}_6 = F_3 - F_{10} - s \left[\frac{(V_b - L_8)}{\nu_v(P_7)} + \frac{L_8}{\nu_l(P_7)} \right] \quad (4.24)$$

Le modèle bond graph des pertes thermiques devient alors comme représenté sur la figure 4.7:

On déduit alors du modèle bond graph :

$$c_{pm} m_m \dot{T}_m = \dot{Q}_{18} - R_{me} (T_{ex} - T_m) \quad (4.25)$$

FIG. 4.7 – *Modèle bond graph simplifié des pertes thermiques*

où m_m et c_{pm} désignent respectivement la masse et la capacité thermique spécifique du métal.

Tenant compte que $T_m = T_6 = T(P_7)$, on écrit :

$$\dot{Q}_{18} = c_{pm} m_m \dot{T}_6 - R_{me} (T_{ex} - T_6) \quad (4.26)$$

En substituant les expressions de pertes thermiques $\dot{Q}_{18}$ et de $\dot{H}_{34}$ dans l'équation du de la chaudière, on obtient le second résidu :

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_7 = & -F_{10} \cdot h_v(P_7) + F_3 \cdot c_p \cdot T_2 + R_{me} (T(P_7) - T_{27}) + Q_4 \\ & -s \left[\frac{L_8}{\nu_l(P_7)} \cdot h_l(P_7) + \frac{(V_b - L_8)}{\nu_v(P_7)} \cdot h_v(P_7) - P_7 V_b + c_{pm} m_m T(P_7) \right] \end{aligned} \quad (4.27)$$

4.2.6 Circuit de détente

Le modèle bond graph de la détente de vapeur est présenté sur la figure 4.8:

La vanne manuelle V_7 est modélisée par l'élément bond graph résistif R_{V7} .

Les vannes de commande (identiques) sont modélisées par un multiport $R : Rvi(i = 1,2)$.

– Jonction "1" (vanne manuelle V_7)

De la jonction "1" modélisant l'égalité des débits au travers de la vanne manuelle V_7 , de l'équation de comportement de la vanne, et des chemins causaux (35 – $De_h : P_7$ et 37 – De_h –

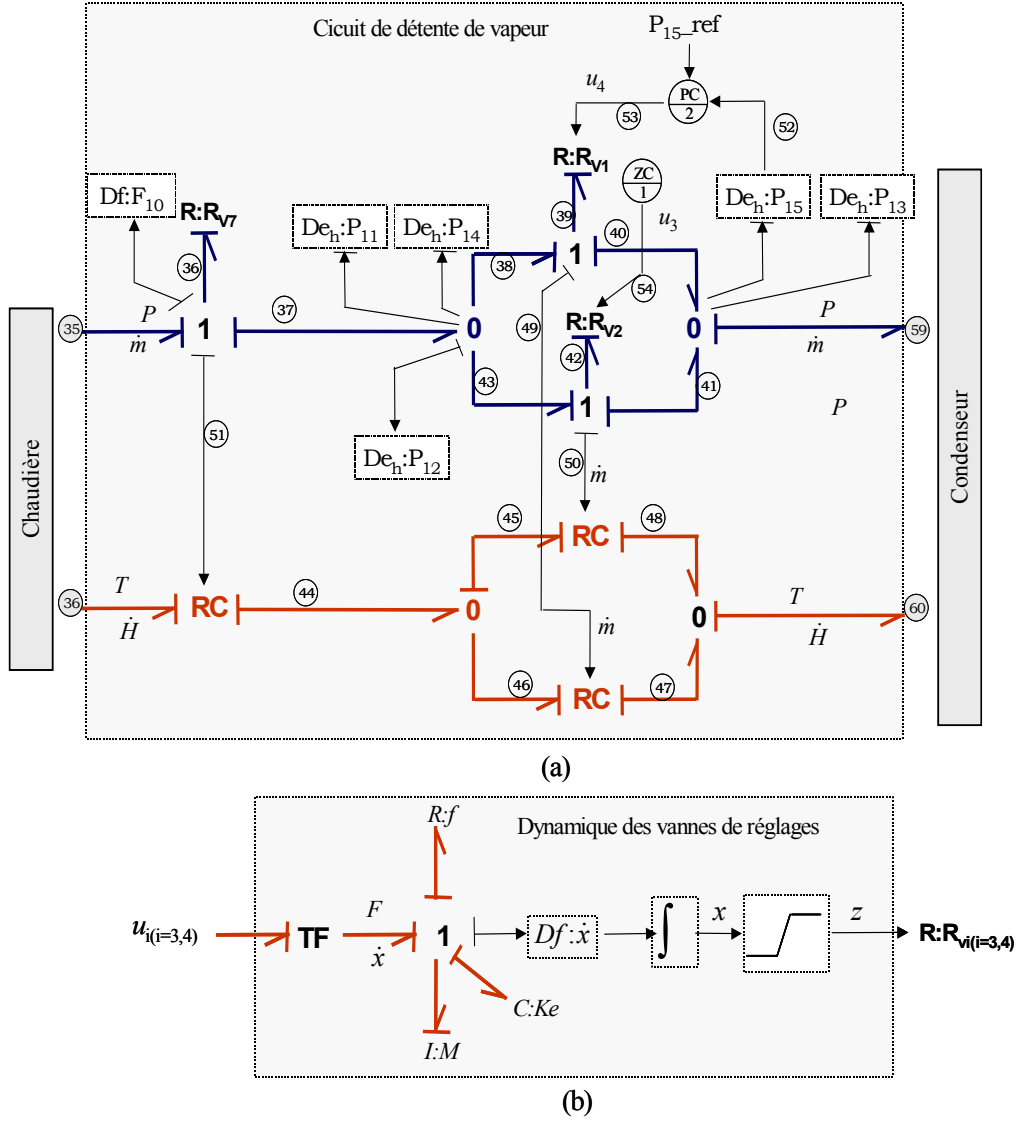


FIG. 4.8 – Modèle bond graph du circuit de détente

P_{12}), on détermine le résidu suivant (qui sera sensible au bouchage de la conduite en sortie du générateur de vapeur) :

$$\mathbf{R}_8 = F_{10} - \text{signe}(P_7 - P_{12})\sqrt{|P_7 - P_{12}|}.R_{V7} \quad (4.28)$$

– **Jonction "0" entrée du circuit de détente**

Dans cette jonction, le capteur $De_h : P_{12}$ est dualisé. Les autres capteurs $De_h : P_{14}$ et $De_h : P_{11}$, ne pouvant pas être dualisés, introduisent alors des redondances matérielles qui sont :

$$\mathbf{R}_9 = P_{12} - P_{14} \quad (4.29)$$

$$\mathbf{R}_{10} = P_{12} - P_{11} \quad (4.30)$$

L'équation de structure de la jonction "0" nous donne une redondance analytique:

$$\dot{m}_{37} - \dot{m}_{38} - \dot{m}_{43} = 0 \quad (4.31)$$

Les variables inconnues $\dot{m}_{37}$, $\dot{m}_{38}$, et $\dot{m}_{43}$ sont déterminées par propagation de l'information le long des chemins $37 - Df : F_{10}$, $38 - 39 - R_{V1} - 39 - 40 - 59 - Deh : P_{16}$ et $43 - 42 - R_{V2} - 42 - 41 - 59 - Deh : P_{16}$ respectivement. On déduit alors le résidu suivant :

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{11} : F_{10} - \text{signe}(P_{12} - P_{16})\sqrt{|P_{12} - P_{16}|}.R_{V1}(z,\tau).u_4 \\ - \text{signe}(P_{12} - P_{16})\sqrt{|P_{12} - P_{16}|}.R_{V2}(z,\tau).u_3 \end{aligned} \quad (4.32)$$

– Jonction "0" sortie du circuit

Dans cette jonction, le capteur $De_h : P_{16}$ (voir la jonction "0" du modèle bond graph du condensateur est dualisé. Les autres capteurs $De_h : P_{15}$ et $De_h : P_{13}$ ne pouvant pas être dualisés, ils introduisent alors des redondances matérielles qui sont :

$$\mathbf{R}_{12} = P_{16} - P_{13} \quad (4.33)$$

$$\mathbf{R}_{13} = P_{16} - P_{15} \quad (4.34)$$

L'équation structurelle de la jonction "0" est :

$$\dot{m}_{59} - \dot{m}_{40} - \dot{m}_{41} = 0 \quad (4.35)$$

La RRA déduite possède la même signature de fautes.

4.2.7 Condenseur (figure 4.9)

La vapeur d'eau que nous considérons encore sèche arrivant du poste de détente de l'installation et passant dans le condenseur (partie calandre) est condensée par contact avec les serpentins verticaux du circuit de refroidissement (appelé coté faisceau) dans lequel circule l'eau froide. La température de cette eau est régulée à 35°C et est considérée alors constante.

Ce changement de phase de la vapeur s'accompagne de la libération de sa chaleur latente de vaporisation et le liquide est refroidi à une température inférieure à la température de saturation. Le liquide mouille la surface des tubes froids et forme ainsi un film continu de condensât qui s'écoule vers le bas sous l'effet de la pesanteur. Le niveau dans le condenseur est régulé par un algorithme de commande *LC* tout ou rien en agissant sur les vannes de décharges.

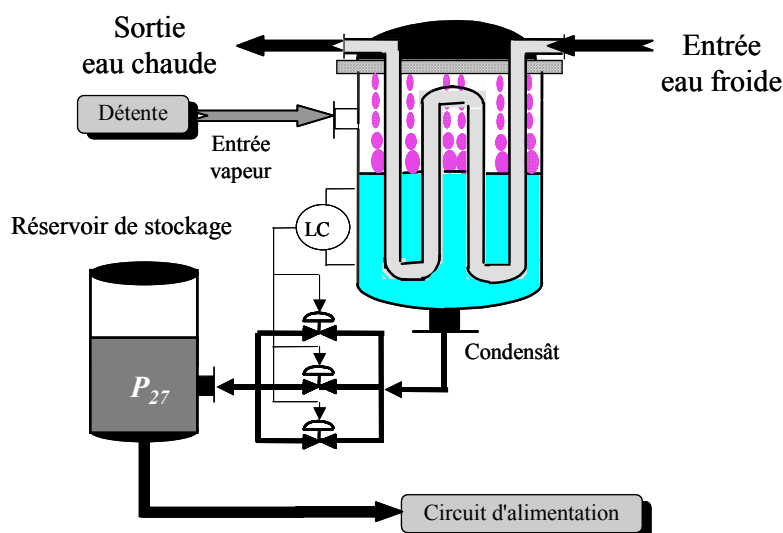


FIG. 4.9 – Schéma de principe du condenseur

4.2.7.1 Bond graph à mots

Les tubes sont divisés en trois sections : à l'entrée du condenseur au contact de la vapeur, dans le liquide du condensât et enfin de nouveau au contact de la vapeur à la sortie du condenseur. On considère que le condenseur est parfaitement calorifugé, que les paramètres sont localisés et que la vapeur dans le condenseur est à saturation. Le bond graph à mots est représenté par la figure 4.10:

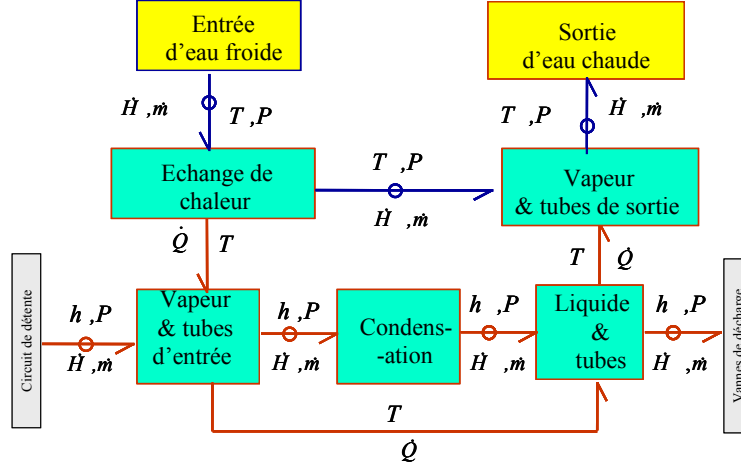


FIG. 4.10 – Bond graph à mots du condenseur

4.2.7.2 Modèle bond graph

Le modèle bond graph du condenseur avec le système d'instrumentation est donnée par la figure 4.11:

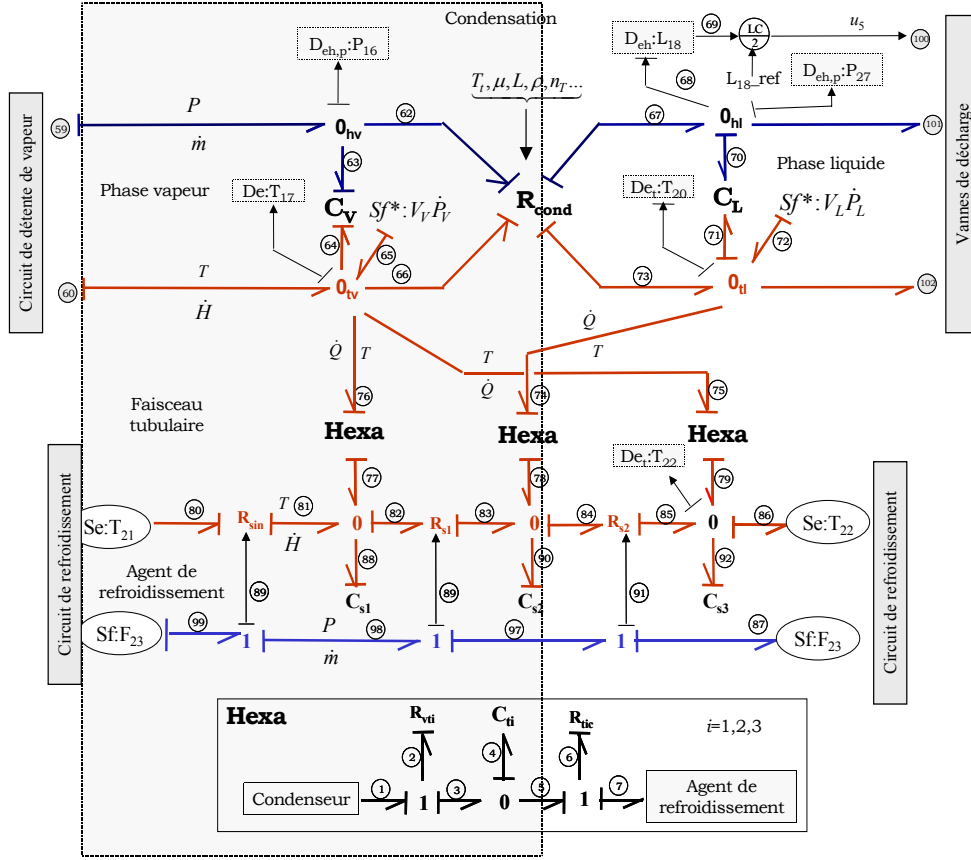
Afin de distinguer les différentes formes d'énergies thermiques, nous avons désigné par $\dot{H}$ le flux d'enthalpie du fluide véhiculé par convection et par $\dot{Q}$ le flux thermique transféré par conduction.

- Élément *Hexa* : échange de chaleur

Les phénomènes d'échange de chaleur entre les deux fluides à travers la paroi métallique sont modélisés par 3 éléments *Hexa* (Heat exchanger ou échangeur de chaleur). Dans un échangeur de chaleur, le fluide froid reçoit à travers une paroi une puissance thermique qui représente le flux transféré par conduction. Nous proposons de modéliser les phénomènes d'échange de chaleur par un élément que nous appelons *Hexa*. Un échangeur de chaleur est modélisé par deux éléments résistifs (modélisant le transfert de chaleur du fluide chaud vers le métal et du métal vers le fluide froid) et un élément capacitif modélisant l'accumulation de l'énergie thermique par la paroi.

- Multiport *R* : R_{cond} : changement de phase de la vapeur

Le débit de condensation de la vapeur autour des tubes est calculé par le multiport R_{cond} . Il est fonction de la différence de température entre celle de la vapeur T_{63} (déterminée à partir des tables thermodynamiques) et celle moyenne des tubes T_T ($T_T = \frac{T_2 + T_6}{2}$), des masses volumiques de la vapeur ρ_V et du liquide ρ_L , de la viscosité dynamique μ_V et de la chaleur latente L_V de la vapeur et du nombre n_T et des dimensions (diamètre D_T , longueur l_T)

FIG. 4.11 – *Modèle bond graph détaillé du condenseur*

géométriques des tubes. L'épaisseur du film de condensât reste suffisamment faible pour que le régime d'écoulement dans le film reste laminaire.

A partir du modèle bond graph, on détermine la dimension et la nature physique du vecteur d'état. Dans le système étudié, nous avons dix variables d'état :

- les énergies thermiques (images des températures) stockées par les tubes (entrée vapeur Q_{76} , dans le liquide Q_{74} et à la sortie Q_{75}) modélisées par les éléments C simples C_{t1} , C_{t2} et C_{t3} ,
- les énergies thermiques (enthalpie totale) et hydrauliques (masse totale) accumulées par la vapeur (partie supérieure du condenseur) modélisées par le multiport C_V (H_{64}, m_{63}),
- l'enthalpie totale et la masse totale accumulée par la partie liquide (condensât) modélisées par le multiport C_L (H_{71}, m_{70})
- et enfin l'énergie thermique accumulée par l'eau dans le circuit de refroidissement dans les trois sections modélisées par les éléments C simples C_{s1} , C_{s2} et C_{s3} . En effet, on considère ici que seules l'énergie thermique est accumulée, le débit d'eau dans le circuit

de refroidissement reste constant égal à celui indiqué par le débitmètre $Sf : F_{23}$.

La modélisation pour la simulation de ce type de composant a déjà été réalisée ([78], [65]). Par contre la génération des *RRAs* de ce composant nécessite quelques remarques et analyses.

4.2.7.3 Analyse du modèle bond graph

Déterminons du bond graph le nombre de relations (contraintes) et de variables inconnues pour la génération de *RRAs*.

$$\Phi = \left\{ \begin{array}{ccccc} \Phi_s & \Phi_b & \Phi_m & \Phi_c & \Phi_a \end{array} \right\} \quad (4.36)$$

Les contraintes caractérisant le processus physiques sont constituées des relations de structure Φ_s (dédites des jonctions) de comportement Φ_b et de mesure Φ_m . Leur nombre est déduit directement du bond graph.

- $\Phi_s \in \mathbb{R}^{n_j}$, où n_j est le nombre de jonctions reliées aux composants (dans notre cas $n_j = 16 - \Phi_s \in \mathbb{R}^{16}$).
- $\Phi_b \in \mathbb{R}^{l*n_{ep}+n_{es}}$. $l = 2$, est le nombre de ports du bond ou le nombre d'énergies modélisées. n_{ep} est le nombre d'éléments bond graph **R** et **C** deux ports (C_V , C_L et R_{cond}) $n_{ep} = 3$. n_{es} est le nombre d'éléments bond graph **R**, **C** et **I** simples (C_{t1} , C_{t2} et C_{t3} , C_{s1} , C_{s2} et C_{s3}) $n_{es} = 6$. $\Phi_b \in \mathbb{R}^{12}$
- $\Phi_m \in \mathbb{R}^{n_s}$, où n_s est le nombre de capteurs non redondants (dans notre cas $n_s = 4$).
Soulignons que F_{23} , T_{21} et T_{22} sont des sources (entrées connues). $\Phi_m \in \mathbb{R}^4$

Le nombre de variables inconnues X est déduit directement du bond graph en fonction du nombre d'éléments multiports n_{ep} et d'éléments simples n_{es} ($l = 2$)

$$X \in \mathbb{R}^{2l*n_{ep}+2n_{es}} \text{ où } n_e = n_{ep} + n_{es} \quad (4.37)$$

Alors $X \in \mathbb{R}^{4*3+2*6}$.

4.2.7.4 Simplification du modèle bond graph pour la génération de *RRAs*

La dynamique d'échange de chaleur dans le faisceau tubulaire et dans le circuit de refroidissement sera remplacé par un élément global *Hexa*, qui représente ici l'échange de chaleur global entre le condenseur et le circuit de refroidissement. Cela signifie que le modèle sera valable pour cette partie uniquement en régime permanent. Le modèle bond graph correspondant est donné par la figure 4.12:

1. Résidu déduit la conservation de masse

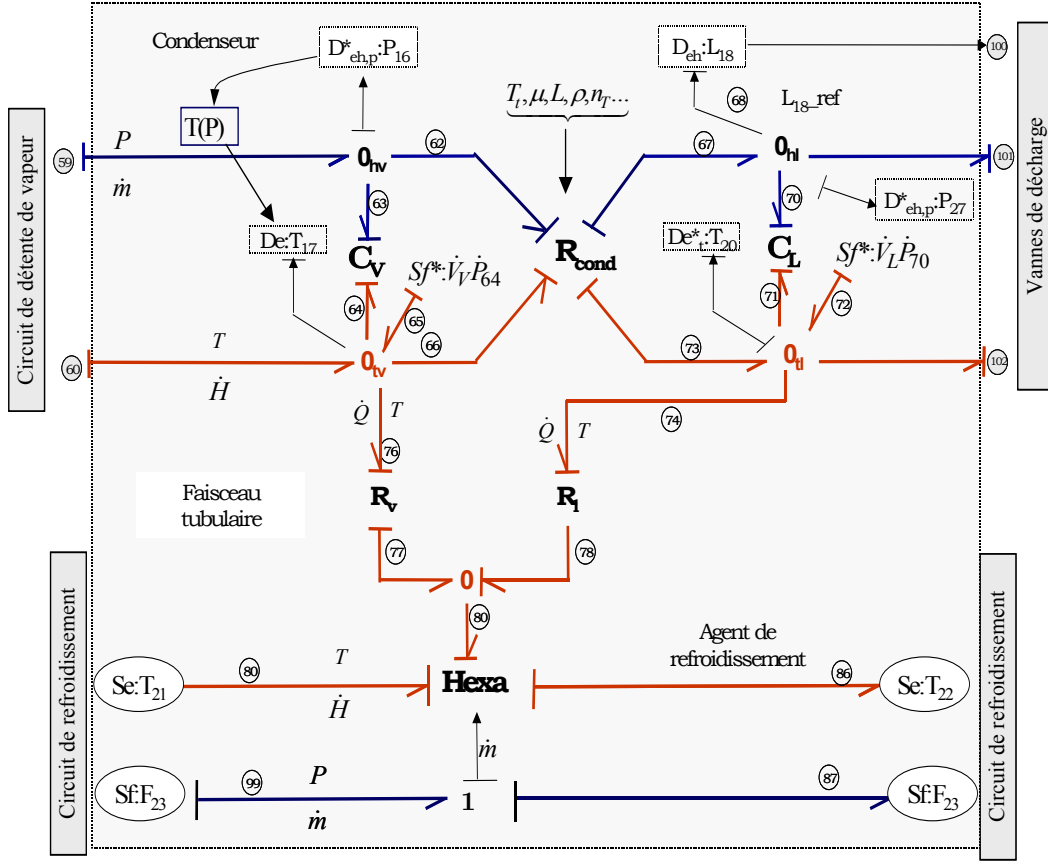


FIG. 4.12 – Modèle bond graph simplifié du condenseur en causalité dérivée

– Jonction " 0_{hv} "

$$\dot{m}_{59} - \dot{m}_{63} + -\dot{m}_{62} = 0 \quad (4.38)$$

– Jonction " 0_{hL} "

$$\dot{m}_{67} - \dot{m}_{70} - \dot{m}_{101} = 0 \quad (4.39)$$

Le débit massique de condensation $\dot{m}_{67} = \dot{m}_{62}$ est calculé par la relation de Nusselt. Ce débit dépend de plusieurs paramètres et variables et dépend principalement de la température moyenne des tubes. Cette température n'étant pas mesurée, on propose d'éliminer la variable $\dot{m}_{67}$, on obtient alors

$$\dot{m}_{59} - \dot{m}_{63} - \dot{m}_{70} - \dot{m}_{101} = 0 \quad (4.40)$$

Exprimons les variables inconnues par les variables connues (mesures).

$$\dot{m}_{63} = \frac{d(\rho_v V_V)}{dt} \quad (4.41)$$

La densité de la vapeur sous saturée ρ_v est une fonction de la variable pression P_{63} :
 $\rho_v = \rho_v(P_{63})$

Le volume V_V occupé par la vapeur dépend du volume du condensât V_L et du volume réel (en tenant compte du volume des tubes) du condenseur V_{cond} :

$$V_V = V_{cond} - V_L \quad (4.42)$$

Le volume du condensât V_L est exprimé par la mesure du capteur de niveau

$$L_{18} : V_L = A_{cond} \cdot L_{18} \quad (4.43)$$

où A_r (m^2) est la section du réservoir. Sachant que la variable P_{63} est mesurée par le capteur P_{16} , on obtient alors

$$\dot{m}_{63} = \frac{d[\rho_v(P_{16})(V_{cond} - A_{cond} \cdot L_{18})]}{dt} \quad (4.44)$$

$\dot{m}_{70}$ est la variable de flux hydraulique du multiport C_L :

$$\dot{m}_{70} = \frac{d(\rho V_L)}{dt} = \frac{d(\rho A_{cond} \cdot L_{18})}{dt} \quad (4.45)$$

$\dot{m}_{59}$ est exprimée par les variables mesurée suivant les chemins causaux ($P_{16} - 59 - 40 - 39 - R_{V1} - 39 - 38 - Deh : P_{12}$) et ($59 - 41 - 42 - R_{V2} - 42 - 43 - Deh : P_{12}$)

$$\dot{m}_{59} = \text{signe}(P_{12} - P_{16}) \sqrt{|P_{12} - P_{16}|} \cdot [R_{V1}(z, \tau) \cdot u_4 + R_{V2}(z, \tau) \cdot u_3] \quad (4.46)$$

$\dot{m}_{101}$ est le débit massique à la sortie du condenseur passant par les vannes de décharges et imposée par la différence de pression entre le condenseur et le réservoir. Il est aisé de l'exprimer par les variables mesurées à partir de l'équation de structure de la jonction "0" à l'entrée du circuit de décharge.

$$\dot{m}_{101} = \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1) \sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} \cdot [R_{V3} \cdot u_5 + R_{V4} \cdot u_6 + R_{V5} \cdot u_7] \quad (4.47)$$

u_5 , u_6 et u_7 sont des variables booléennes délivrées par le régulateur de niveau. R_{V3} , R_{V4} et R_{V5} sont les coefficients de débits caractérisant les pertes de charge hydrauliques de ces vannes.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{14} = & \text{signe}(P_{12} - P_{16})\sqrt{|P_{12} - P_{16}|} \cdot [R_{V1}(z, \tau) \cdot u_4 + R_{V2}(z, \tau) \cdot u_3] \\ & - s[\rho A_{cond} \cdot L_{18}] - s[\rho_v(P_{16})(V_{cond} - A_{cond} \cdot L_{18})] \\ & - \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1)\sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} \cdot [R_{V3} \cdot u_5 + R_{V4} \cdot u_6 + R_{V5} \cdot u_7] \end{aligned} \quad (4.48)$$

– **Jonction** ” 0_{tV} ”

$$\dot{H}_{60} - \dot{H}_{66} - \dot{Q}_{76} - \dot{H}_{64} + V_V \dot{P}_V = 0 \quad (4.49)$$

– **Jonction** ” 0_{tL} ”

$$\dot{H}_{66} - \dot{H}_{71} - \dot{Q}_{74} - \dot{H}_{102} + V_L \dot{P}_L = 0 \quad (4.50)$$

Le débit d'enthalpie transporté par le flux de condensation dépend de l'enthalpie spécifique du fluide condensé et du débit massique condensé calculé par la relation de Nusselt. Pour les mêmes raisons citées précédemment, on propose d'éliminer la variable $\dot{H}_{66}$, on obtient alors

$$\dot{H}_{60} + V_V \dot{P}_V + V_L \dot{P}_L - \dot{Q}_{76} - \dot{H}_{64} - \dot{H}_{71} - \dot{Q}_{74} - \dot{H}_{102} = 0 \quad (4.51)$$

$\dot{Q}_{76}$ et $\dot{Q}_{74}$ représentent les flux thermiques échangés par conduction avec le faisceau tubulaire. Il sont modélisés par les multiport R_V et R_L . La somme de ces deux flux thermiques (jonction ”0” sur le modèle bond graph) est égale évidemment à la variation du flux thermique transmis au fluide du circuit de refroidissement:

$$\dot{Q}_{76} + \dot{Q}_{74} = \dot{H}_{80} - \dot{H}_{86} = F_{23} \cdot c_p (T_{21} - T_{22}) \quad (4.52)$$

F_{23} , T_{21} et T_{22} désignent respectivement les indications des capteurs de débit de l'eau de refroidissement, la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du circuit de refroidissement.

L'élément *Hexa* représente l'échange de chaleur global entre le condenseur et le circuit de refroidissement.

La variation de l'enthalpie totale dans la phase vapeur $\dot{H}_{64}$ et dans le condensât (phase liquide) $\dot{H}_{71}$ (modélisée par les multiports C_V et C_L) est :

$$\begin{aligned}\dot{H}_{64} &= \frac{d(m_V h_V)}{dt} = \frac{d}{dt} [\rho_V(P_{16}) (V_{cond} - A_r.L_{18}) h_V(P_{16})] \\ \dot{H}_{71} &= \frac{d(m_L c_p T_L)}{dt} = \frac{d}{dt} [\rho A_r L_{18} c_p T_{20}]\end{aligned}\quad (4.53)$$

Le flux d'enthalpie de l'eau à la sortie du condenseur $\dot{H}_{102}$ est

$$\dot{H}_{102} = \dot{m}_{102} c_p T_{20} = \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1) \sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} \cdot [R_{V3}.u_5 + R_{V4}.u_6 + R_{V5}.u_7] c_p T_{20} \quad (4.54)$$

Le flux d'enthalpie de l'eau à l'entrée du condenseur $\dot{H}_{60}$ est

$$\dot{H}_{60} = h_V(P_{16}).\text{signe}(P_{12} - P_{16}) \sqrt{|P_{12} - P_{16}|} \cdot [R_{V1}(x, \tau).u_4 + .R_{V2}(z, \tau).u_3] \quad (4.55)$$

$h_V(P_{16})$ est l'enthalpie spécifique de la vapeur à l'entrée du condenseur, elle est fonction de la pression P_{16} .

On obtient l'expression du résidu:

$$\begin{aligned}\dot{H}_{60} + V_V \dot{P}_V + V_L \dot{P}_L - \dot{Q}_{76} - \dot{H}_{64} - \dot{H}_{71} - \dot{Q}_{74} - \dot{H}_{102} &= 0 \\ \mathbf{R}_{15} &= h_V(P_{16}).\text{signe}(P_{12} - P_{16}) \sqrt{|P_{12} - P_{16}|} \cdot [R_{V1}(z, \tau).u_4 + .R_{V2}(z, \tau).u_3] + \\ &\quad (V_{cond} - A_r.L_{18}) .s [P_{16}] + (\rho A_r.L_{18}) .s [P_{27}] \\ &\quad - F_{23}.c_p (T_{21} - T_{22}) - s [\rho_V(P_{16}) (V_{cond} - A_r.L_{18}) h_V(P_{16})] \\ &\quad - s [\rho A_r L_{18} c_p T_{20}] - \text{signe}(P_{27} - \rho g L_1) \sqrt{|P_{27} - \rho g L_1|} \cdot [R_{V3}.u_5 + R_{V4}.u_6 + R_{V5}.u_7] c_p T_{20}\end{aligned}\quad (4.56)$$

Une redondance matérielle est introduite par le capteur de niveau L_{18} , sa mesure est proportionnelle à celle du capteur de pression :

$$\mathbf{R}_{16} = P_{16} + \rho g L_{18} - P_{27} \quad (4.57)$$

La relation thermodynamique liant T_{17} et P_{16} introduit aussi une relation de redondance matérielle.

$$\mathbf{R}_{17} = T_{17} - T(P_{16}) \quad (4.58)$$

4.2.8 Vannes de décharge

Le modèle bond graph du circuit de décharge est donné par la figure 4.13. Ces vannes sont utilisées pour le réglage du niveau dans le condenseur. Elles sont commandées en tout ou rien par l'algorithme de commande *LC2*.

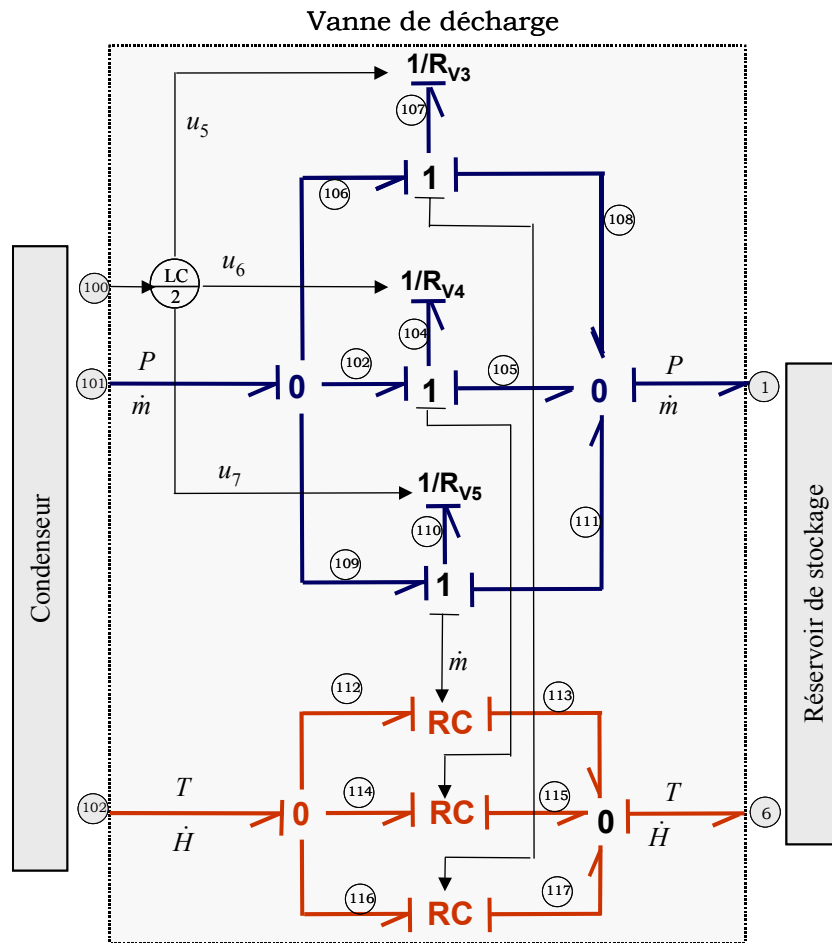


FIG. 4.13 – Modèle bond graph du circuit de vannes de décharge

Ce sous système est juste déterminé. En effet, il suit du modèle bond graph hydraulique par exemple que le nombre de relations est de 6 : trois de structure (liées aux composants $R_{Vi}(i=3,4,5)$) et trois de comportement. Il est égal au nombre de variables inconnues : (e_{107}, f_{107}) , (e_{104}, f_{104}) , et (e_{110}, f_{110}) . Les variables imposées par le condenseur et le réservoir de stockage sont considérés pour ce composant comme des sources d'effort connues.

4.2.9 Génération des RRAs sensibles aux défaillances des actionneurs

Nous rappelons que les sources contrôlées transforment le signal de commande u (mesurée) en action réglante MSf ou MSe . Nous avons deux actionneurs la pompe d'alimentation commandée par le régulateur de niveau $LC1$ et le thermoplongeur commandé par le régulateur $PC1$.

La détermination des expressions des résidus sensibles à une faute sur ces actionneurs est simple. Le signal de commande u délivré par le régulateur est fourni directement par l'algorithme de commande, l'action réglante (MSf ou MSe) délivrée par l'actionneur est mesurée. On doit alors vérifier la cohérence entre le signal délivré par le capteur (mesure de l'action réglante) et celui calculé par le modèle de l'actionneur commandé :

$$F_a(MSf, MSe, u) = 0 \quad (4.59)$$

Il suit du modèle bond graph de la chaudière.

$$\mathbf{R}_{18} = Q_4 - u_2.Pu \quad (4.60)$$

où Pu est la puissance de chauffe égale à $60KW$.

4.2.10 Génération des RRAs sensibles aux défaillances des systèmes de commandes

Nous rappelons que ces RRAs sont déterminées sur la base des signaux délivrés par les capteurs (De, Df), les paramètres du régulateur θ_{reg} , et le signal de commande u , et les points de consigne y_{ref} . Le résidu sera :

$$RRA = f(De, Df, y_{ref}, u, \theta_{reg}) \quad (4.61)$$

– RRA sensible aux défaillances du contrôleur de niveau dans la chaudière

$$\mathbf{R}_{19} : u_1 - LC1(sign(L_{8_ref} - L_8), \Delta) \quad (4.62)$$

L'algorithme de commande de niveau (en tout ou rien) est présenté par la fonction $LC1(sign(L_{8_ref} - L_8), \Delta)$, où L_{8_ref} , L_8 et Δ désignent respectivement la consigne du niveau, la mesure du niveau et la zone morte du relais.

– RRA sensible aux défaillances du contrôleur de pression dans la chaudière

$$\mathbf{R}_{20} : u_2 - PC1(sign(P_{7_ref} - P_7), \Delta) \quad (4.63)$$

- *RRA* sensible aux défaillances du contrôleur de pression à l'entrée du condenseur

$$\mathbf{R}_{21} : u_4 - PC2(sign(P_{15_ref} - P_{15}), \Delta) \quad (4.64)$$

- *RRA* sensible aux défaillances du contrôleur de position de la vanne de contournement

$$\mathbf{R}_{22} : u_3 - ZC(sign(z_{V2ref} - z_{V2})) \quad (4.65)$$

L'algorithme de commande de position est présenté par la fonction $ZC(sign(z_{V2ref} - z_{V2}))$ où z_{V2ref} et z_{V2} désignent respectivement la consigne du position donnée par l'opérateur et la position de la vanne.

- *RRA* sensible aux défaillances du contrôleur de niveau dans le condenseur

$$\mathbf{R}_{23} : u_5 - LC2(sign(L_{18_ref} - L_{18}), \quad (4.66)$$

$$\mathbf{R}_{24} : u_6 - LC2(sign(L_{18_ref} - L_{18}), \quad (4.67)$$

$$\mathbf{R}_{25} : u_7 - LC2(sign(L_{18_ref} - L_{18}), \quad (4.68)$$

4.3 Analyse de l'installation

4.3.1 Signature des pannes

La signature d'une défaillance est l'ensemble des relations de redondance telles que la défaillance influence ces relations. Si la valeur 1 apparaît dans la case (i,j) , c'est que la relation de redondance R_i est sensible à la défaillance j . Les types de pannes (bouchage, fuite) sont donnés en fonction de la structure utilisée pour la génération des *RRAs*. Le tableau de signatures de pannes de l'installation est donnée par la figure 4.14. Nous ne représentons pas les défaillances des indications des signaux de commande des correcteurs u , nous considérons qu'ils ne sont jamais défaillants.

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃	R ₁₄	R ₁₅	R ₁₆	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉	R ₂₀	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃	R ₂₄	R ₂₅
L ₁	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ch R	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ct R	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pp ₁	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F ₃	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
V ₈	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ch G	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ct G	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₅	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₆	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P ₇	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
L ₈	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Q ₄	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
T ₁₇	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
LC1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Th	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
V ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F ₁₀	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
P ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
V ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ZC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Z ₂₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
P ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ch C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ct C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
P ₁₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
T ₁₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
P ₂₇	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₃₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T ₂₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F ₂₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V ₃	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V ₄	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V ₅	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIG. 4.14 – Signature de pannes du système de surveillance de l'installation

Il suit de la table de signature de pannes que toutes les défaillances fixées par le cahier des charges sont détectables et isolables. Seules les défaillances pouvant affecter les vannes de décharges (V_3 , V_4 et V_5) et les vannes du circuit de détente vapeur (V_1 et V_2) ainsi que la pompe d'alimentation et la conduite d'alimentation (V_8) ne sont pas localisables. Elles possèdent la même signature de fautes.

Les différents actionneurs (pompe, thermoplongeur) ont par contre des signatures de fautes différentes, ce qui permet d'isoler les défaillances pouvant les affecter. Il est possible de les rendre surveillable (détectable et isolable) en ajoutant des capteurs supplémentaires. Il est aisé d'ajouter par exemple un capteur de débit sur une des branches du circuit de détente du modèle bond graph pour que ces vannes deviennent surveillables. Cette opération est actuellement automatisée à l'aide d'un logiciel développé au laboratoire sur la supervision des processus chimiques.

4.3.2 Procédures de décision

Une relation de redondance exprime le fait que le résultat d'une fonction des variables connues (résidu de la relation) doit être nul. Cette relation est vérifiée si le comportement du système suit exactement le modèle : le résidu est alors strictement nul. Cependant le modèle ne représente pas exactement le système réel et le résidu sera en général différent de zéro. Deux hypothèses se présentent alors :

1. H_0 : le résidu est différent de zéro à cause des bruits de mesure (modèle imparfait des relations de connaissance) ou des erreurs de modélisation, et le fonctionnement est normal.

H_1 : le résidu est différent de zéro parce que l'un des éléments (capteur ou paramètre) ne suit plus le modèle donné par sa relation de connaissance. Il y a défaillance.

Le rôle de la procédure de décision est alors double :

1. détecter la défaillance, c'est-à-dire indiquer quelle est celle des deux hypothèses H_0 ou H_1 à retenir.
2. localiser la défaillance.

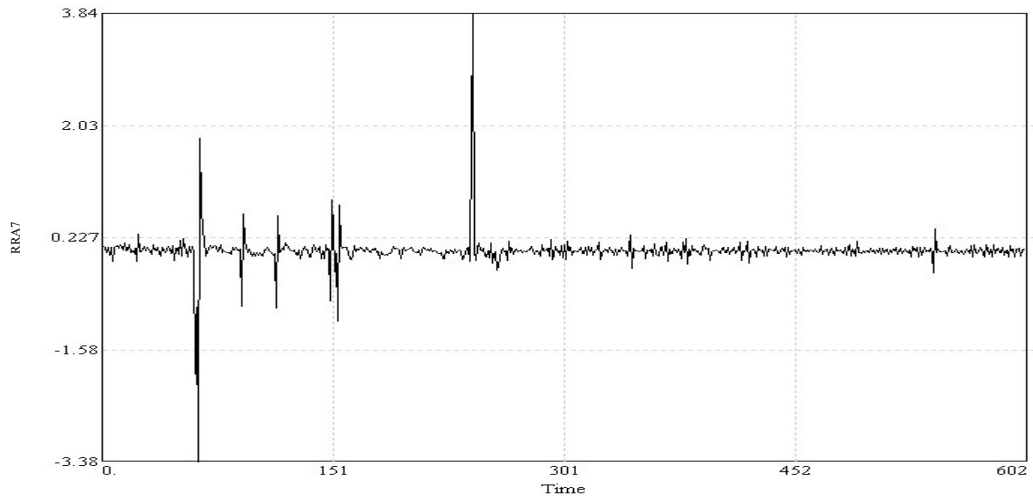
Cette procédure va être décomposée en deux niveaux :

- Le traitement individuel de chaque résidu pour détecter un changement de valeur moyenne en prenant en compte les aspects statistiques de celui-ci. Les méthodes sont celles de la théorie de la décision ou du traitement de signal appliqué à la détection de rupture [4].
- Le vecteur binaire de cohérence est ensuite comparé aux différentes signatures de panne ainsi qu'à la signature de fonctionnement normal (vecteur de composantes nulles). Cette comparaison fournit une conclusion sur l'état du système : fonctionnement normal, ou défaillance identifiée et cause de la défaillance, ou défaillance non identifiée [17].

4.4 Essais sur le processus et résultats

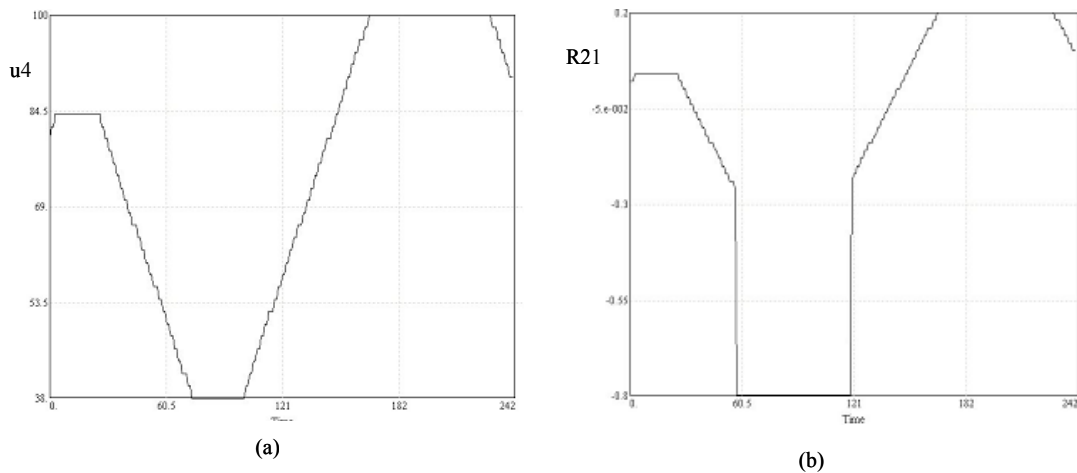
4.4.1 Fonctionnement normal des résidus

En fonctionnement idéal, les résidus doivent être constamment nuls. Ce n'est pas toujours le cas, car les erreurs de modélisation introduisent des résidus différents de zéro. La figure 4.15 montre l'évolution du résidu R_7 en fonctionnement normal à 8 bars. Les bruits et erreurs de modélisation induisent des oscillations dont certaines très importantes du signal autour de zéro. Cela s'explique ici par une composante de dérivation importante. Lors de la procédure de décision, qui, rappelons-le, ne sera pas développée ici, il s'agira de filtrer ces déviations pour ne garder que le comportement "utile".

FIG. 4.15 – Evolution du résidu $R7$ en fonctionnement normal

4.4.2 Défaillances sur les contrôleurs

Une défaillance du contrôleur de pression $PC2$ a été introduite en déconnectant la sortie du régulateur u_4 (figure 4.16(a)) à la 58^e seconde. L'algorithme de commande continue à fournir une action de commande u_4 , mais le résidu R_{21} sensible à cette défaillance réagit comme le montre la figure 4.16(b).

FIG. 4.16 – Evolution d'action de commande de la vdu controleur $PC2$ (a) et du résidu R_{21}

4.4.3 Signature de pannes du système de surveillance de l'installation

4.4.3.1 Défaillances physiques sur le générateur de vapeur

Trois défaillances vont être expérimentées: le bouchage de la vanne de sortie V_7 (de la 60^e seconde à la 100^e), une grosse fuite d'eau (de la 125^e seconde à la 128^e, l'essai étant dangereux) et une faute sur le réservoir de stockage.

Comme prévu, le résidu R_8 a été sensible au bouchage (figure 4.17(c)) car il ne concerne que le débit de vapeur F_{VG} qui est indépendant d'une fuite d'eau. Par contre le résidu R_6 est insensible à une fuite d'eau dans la chaudière.(figure 4.17(d)), l'énergie mise en œuvre dans cette défaillance (la valeur moyenne en joule du résidu est de $2,5842 \times 10^3$) est négligeable devant l'énergie du générateur ($7.19 \times 10^5 J$).

Le résidu R_6 (figure 4.17(a)) est sensible à la défaillance de type fuite dans le réservoir de stockage. Les capteurs utilisés (principalement celui du niveau) sont très bruités. Le filtrage de ce signal est indiqué par la figure 4.17(b).

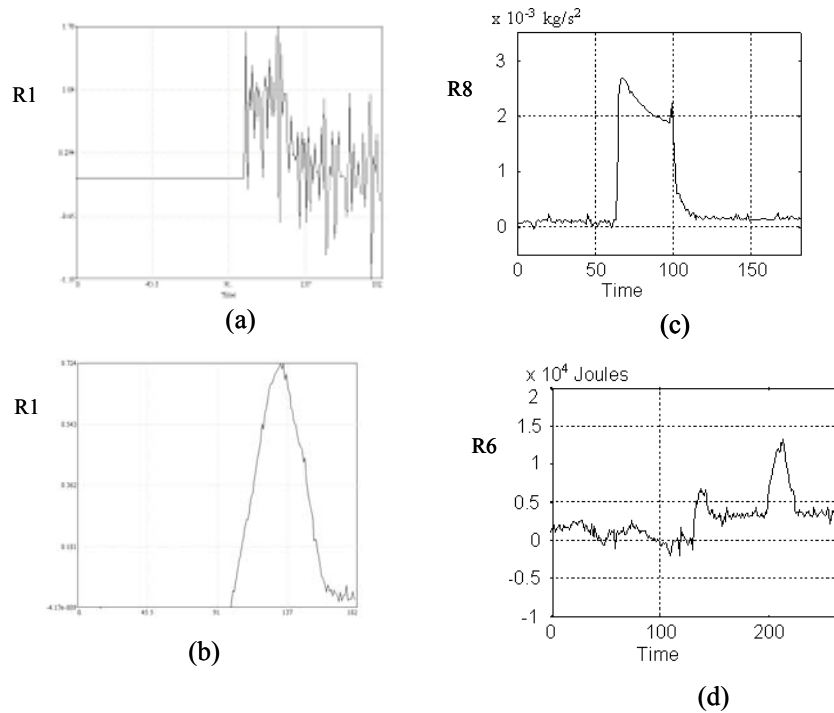


FIG. 4.17 – Réactions des résidus R_6 , R_8 et R_1 aux défaillances physiques de type fuite et bouchage

4.5 Application de l'algorithme pour la surveillance d'une partie de l'installation

4.5.1 Présentation du sous-système étudié

La partie de l'installation à modéliser peut être représentée par la figure 4.18 où C_1 représente la bache alimentaire, R_1 la vanne du circuit d'alimentation, C_2 la chaudière et R_2 la vanne de détente.

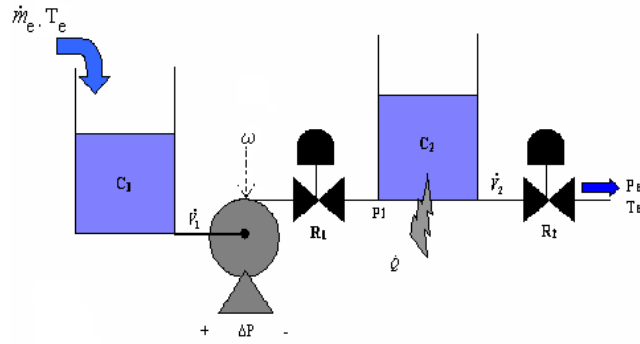


FIG. 4.18 – Schéma de principe du sous-système étudié

L'équation d'état est de la forme :

$$\dot{\vec{x}}(t) = \vec{f}(t, \vec{x}(t), \vec{u}(t)) \quad (4.69)$$

avec le vecteur d'état :

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} m_{C_1} \\ H_{C_1} \\ m_{C_2} \\ H_{C_2} \end{pmatrix} \quad (4.70)$$

et le vecteur d'entrée :

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} \dot{m}_e \\ T_e \\ P_a \\ T_a \\ \omega \end{pmatrix} \quad (4.71)$$

Le modèle bond graph multi-énergie et non linéaire est visualisable par la figure 4.19:

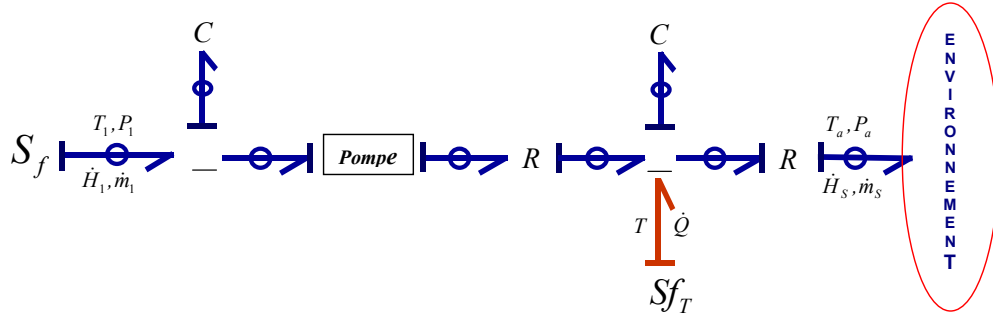


FIG. 4.19 – *Modèle bond graph multi-énergie non linéaire du sous-système*

S_f est la source de flux thermofluide. Sf_T est le thermoplongeur chauffant la chaudière, il est alimenté par un générateur de tension d'une puissance de $60kW$. Ce bloc exprime l'échange d'énergie entre l'élément chauffant (qui est le cœur dans une centrale nucléaire) et la chaudière.

L'alimentation du générateur de tension est commandée en boucle ouverte. Le thermoplongeur étant immergé dans la chaudière, sa température T_{TH} va être confondue très rapidement avec celle de la chaudière, T_{GV} .

Le modèle bond graph linéarisé correspondant à l'ensemble du sous-système étudié est donné par la figure 4.20:

4.5.2 Surveillabilité des composants

Le chemin causal à parcourir dans la partie hydraulique est :

$$Sf_H : \dot{m}'_1 - 9 - 10 - 29 - 31 - 32 - C_{hb} - 32 - 31 - 83 - Rp - 83 - 85 - De_h$$

Ce chemin passe par deux jonctions '1' et une jonction '0' donc on prévoit deux détecteurs de flux pour le couplage thermofluide et la capacité hydraulique de la bache et un détecteur d'effort pour l'écoulement vers la pompe.

Neuf combinaisons binaires sont possibles, la surveillance de cette partie est évidente avec 3 capteurs placés sur les 3 jonctions et elle est impossible sans le moindre capteurs, ou même avec un seul capteur car les deux couplages vers la partie thermique nécessitent des capteurs de flux.

Appliquons les règles de déduction des résidus au 3 combinaisons restantes en plaçant uniquement 2 capteurs:

$$[0 \ 1 \ 1]$$

$$[1 \ 0 \ 1]$$

$$[1 \ 1 \ 0]$$

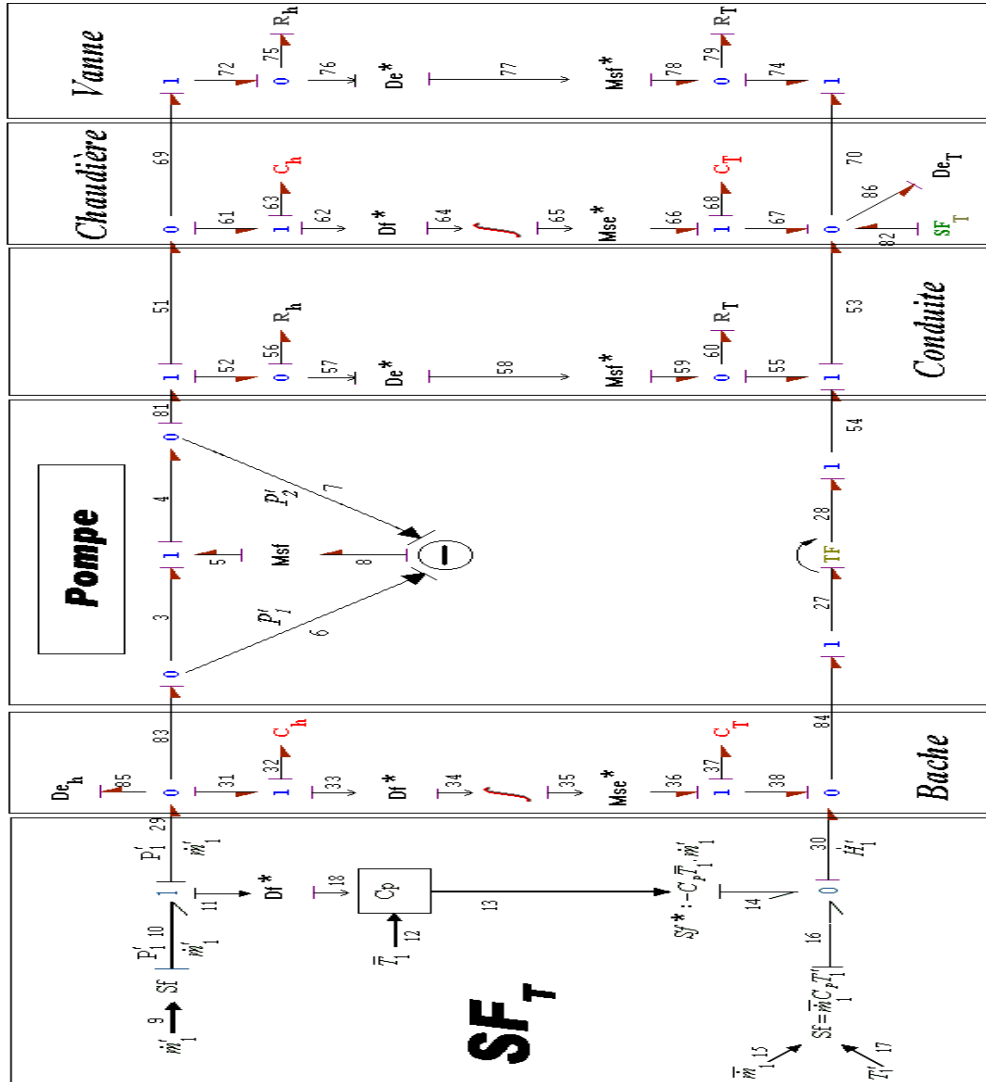


FIG. 4.20 – Modèle bond graph linéarisé du sous-système étudié

	C_p	R_p	C_h
r_1	1	1	0
r_2	0	0	1

TAB. 4.1 – Signature de défaillances1

Dans le 1^{er} et le 3^{me} cas les composants ne sont pas isolables car deux signatures de fautes sont les mêmes dans chaque cas par contre dans le 2^{me} cas, les trois signatures sont différentes et sont non nulles donc les composants C_p , R_p , et C_h sont détectables et isolables

	C_p	R_p	C_h
r_1	1	1	0
r_2	0	1	1

TAB. 4.2 – Signature de défaillances2

	C_p	R_p	C_h
r_1	1	0	0
r_2	0	1	1

TAB. 4.3 – Signature de défaillances3

sans placer de capteurs au niveau de la pompe car le détecteur d'effort hydraulique assure sa surveillance.

Le chemin causal à parcourir dans la partie thermique est : $Sf_T : T'_1 - 17 - 16 - 30 - 38 - 37 - C_{Tb} - 37 - 38 - 84 - 27 - 28 - 54 - 55 - 60 - R_{Tc} - 60 - 55 - 53 - 67 - 68 - C_{Tc} - 68 - 67 - 86 - De_T$

Entre Sf_T et De_T il y a trois composants à surveiller C_{Tb} la capacité thermique de la bache, R_{Tc} la résistance thermique de la conduite, et C_{Tc} la capacité thermique de la chaudière. Ces trois composants sont liés à des branches de couplage thermofluide, donc nécessitent autant de capteurs.

Aucun chemin causal menant d'une source aux capteurs n'est inclus dans les chemins causaux menant d'une autre source aux mêmes capteurs: toutes les sources sont donc surveillables indépendamment les unes des autres. Il est donc aussi certain qu'il existe un ensemble indépendant de $RRAs$ relatifs aux sources.

4.6 Conclusion

Le modèle bond graph permet d'analyser d'une façon modulaire la surveillabilité des composants thermofluides. Il n'est pas nécessaire de reprendre les équations du processus du début pour améliorer ou simplifier le modèle en vue de générer les $RRAs$. L'utilisation de l'outil bond graph pour la génération des $RRAs$ pour un système complexe est systématique et générique. Le but principal de cette application est de montrer l'applicabilité de la méthodologie BG sans avoir à générer les $RRAs$ à partir d'un modèle bond graph multiénergie complexe. Toutefois des résultats expérimentaux sur le site ont montré la validité des $RRAs$ générés. En effet, malgré les hypothèses simplificatrices permettant d'obtenir le modèle du générateur de vapeur, le système de surveillance a montré la qualité de la modélisation. En effet, les

résidus sont, en fonctionnement non défaillant, pratiquement égaux à zéro. L'erreur de modélisation est donc minime. L'analyse structurelle s'applique parfaitement à ce type de modèle (fortement non linéaire). L'analyse des signatures de fautes en fonction des combinaisons d'attribution de capteurs a facilité la tâche de surveillance. L'adéquation entre le comportement prévisible des résidus et les essais a aussi été montrée. Si on considère que le modèle peut être linéarisé (ce qui représente un cas particulier peu courant en réalité), alors il est possible sans aucun calcul préalable de déterminer la surveillabilité des actionneurs directement sur le modèle graphique.

Conclusions générales et perspectives

1 Conclusions

Les travaux présentés dans cette thèse ont apporté une contribution à la problématique de placement de capteurs en vue de la détection et de la localisation des défaillances. La mise en oeuvre d'indicateurs de défaillances (résidus) sur un système de réservoirs a provoqué un problème combinatoire énorme surtout pour les systèmes complexes (en raison du couplage de plusieurs phénomènes), une technique a été établie pour y remédier.

Bien que des techniques de surveillance sans modèle analytique existent, seuls les méthodes de surveillance avec modèle permettent une précision et une efficacité suffisante pour ce type de procédé à risques. Encore faut-il que le modèle décrive de manière satisfaisante le système.

C'est dans cette optique qu'une modélisation par bond graph a été choisie. Celle-ci permet, de part sa modularité, d'intégrer un niveau de précision optimal vis-à-vis du compromis entre véracité (le modèle décrit-il fidèlement le système?) et efficacité (un modèle trop complexe devient inutilisable.). De plus, le caractère graphique de cet outil ouvre la porte à de nombreux résultats structurels issus de la théorie des graphes.

Une démarche systématique grâce à un choix judicieux des variables de puissance et une modélisation modulaire a permis de modéliser des systèmes complexes (chaudière avec différentes configurations, condenseur, pompe, ...). De plus ces modèles sont produits sous forme d'équations d'état plus adaptées pour la conception d'algorithmes de commande mais aussi pour la surveillance.

Nous avons développé une méthode générique et algorithmique de génération d'indicateurs de défauts sous forme symbolique prêts à être intégrés dans des systèmes de surveillance. Ces relations, générées au niveau de chaque composant, permettent de rendre compte d'une défaillance de capteur, d'actionneur ou de type physique (fuite, bouchage,...), tout en mesurant l'influence des autres composants. Un placement de capteur optimal permet de s'affranchir de cette influence. Ainsi, la localisation d'une défaillance au sein du système est circonscrite au composant incriminé, ce qui limite grandement les manipulations de maintenance.

Ces études ont été appliquées au site de génération de vapeur pilote que le *LAIL* possède. Cette application illustre bien la difficulté de modéliser de tels systèmes, mais, une fois cette modélisation effectuée, elle illustre aussi le caractère systématique de la génération des relations de redondance analytique, ce qui prête bien cette méthode à une informatisation.

Sous l'environnement de *C++Builder*, le logiciel *Symbols2000* spécifique aux bond graphs nous a permis de valider le modèle malgré sa complexité et nous a permis de simuler quelques défaillances en visualisant l'évolution des résidus correspondants.

2 Contributions et résultats de recherche

Pour le placement de capteurs en vue de la surveillabilité des composants des processus en génie des procédés par la méthodologie bond graph, les principales contributions sont les suivantes :

- Classification des processus thermofluides.
- Modélisation et représentation des systèmes thermodynamiques.
- La linéarisation des bond graphs couplés

Les outils de placement de capteurs développés sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes de détection, localisation et identification des défaillances. La contribution dans ce domaine concerne :

- Utilisation d'un seul outil pour la modélisation et la surveillance.
 - La surveillabilité des composants à partir des modèles bond graphs couplés linéarisés sans la détermination préalable des *RRAs*.
 - La déduction des résidus sans avoir à générer les *RRAs* des composants thermofluides.
- Ces résultats de recherche ont fait l'objet des publications suivantes :

2.1 Publications internationales

1. M. Khemliche, B. Ould Bouamama, A. Khellaf et M. Mostefaï. Component Supervision by Sensor Placement on Bond Graph Model, Wseas Transactions Journal on Circuits and Systems, Issue 1, Volume 4, January 2005.
2. I. Dif, M. Mostefaï and M. Khemliche. Process Monitoring Using Bond Graph Approach, Wseas Transactions Journal on Computers, Issue 2, Volume 4, February 2005.
3. M. Khemliche, H. Haffaf et B. Ould Bouamama. Sensor Placement for Diagnosability of Components, Submitted to JESA

2.2 Publications nationales

1. Identification floue de la machine asynchrone par la méthode de Strejc. Revue technologique, scientifique et linguistique. COST N°1octobre2002ENSETOran

2.3 Communications internationales

1. M. Khemliche, B. Ould Bouamama, A. Khellaf et M. Mostefaï. Component Supervision by Sensor Placement on Bond Graph Model, Conference on automation 01-03 March 2005, Buones Aires-Argentina.
2. I. Dif, M. Mostefaï and M. Khemliche. Process Monitoring Using Bond Graph Approach, Conference 14-16 February 2005, Salisbury-Austria.
3. M. Khemliche, B. Ould Bouamama. Optimal sensor placement using bond-graph model for FDI design. IFAC Symposium, Ontario-Canada June 2004.
4. The fuzzy identification of the asynchronous machine by using the method of Strejc : ACEMP 2001-Bursa Turkey
5. Design of a fuzzy controller of Ph by the genetic algorithm : ELECO'2001-Kusadasi Turkey
6. Design of a fuzzy logic controller (FLC) by the genetic algorithm (GA) : PCC-Osaka 2002 Japan
7. Modelling and identification of the asynchronous machine : ISCCSP 2004 Hammamet Tunisia
8. Modelling and analysis of the active suspension $\frac{1}{4}$ of vehicle with bond graph : ISCCSP 2004-Hammamet Tunisia
9. Détection et localisation des défauts par l'approche bond-graph : CIGE'04-Sétif Algérie
10. Modélisation bond-graph des phénomènes physico-chimiques. Application à une colonne de distillation : CIGE'04-Sétif Algérie

2.4 Communications nationales

1. Identification floue des systèmes complexes discrets : SNCS'2001-Djelfa
2. Réalisation d'un régulateur de Ph à base d'un contrôleur flou : SNCS'2001-Djelfa
3. Conception d'un contrôleur de Ph par les algorithmes génétiques : SNCS'2001-Djelfa
4. Modélisation Bond-graph d'une suspension quart de véhicule : Annaba 2003
5. Modélisation Bond-graph d'une suspension électromagnétique MagLev : CGE'03-EMP Alger
6. Surveillance d'une vanne pneumatique par le modèle Bond-graph : JSLAS'04-Sétif

7. Analyse de la surveillabilité des actionneurs intelligents par l'association modèle Bond-graph - modèle externe : DAT'2004-Reghaïa

3 Perspectives

- Dans le domaine applicatif

Les résultats de cette thèse sont appliqués pour la génération des modèles dynamiques des processus en génie des procédés. Les fonctionnalités du système développé peuvent être résumées comme suit.

Sur la base du Plan d'Instrumentation Détaillé, le modèle architectural est réalisé en connectant les différents composants en respectant des règles de connections basées sur une approche fonctionnelle. La base de données contient une classe de capteurs (détecteurs d'effort, i.e. température, pression,...et détecteurs de flux (débit)). A chaque composant est associé un modèle bond graph

Le modèle dynamique (sous forme d'équations d'état modélisant l'énergie thermique et hydraulique) ainsi que les *RRAs* sont alors générés sous forme symbolique. L'analyse structurelle du modèle global permet alors d'obtenir la surveillabilité du processus (donnée par le tableau de signature des fautes) sur la base de l'instrumentation utilisée. Ceci permet alors à l'opérateur d'une façon graphique de placer convenablement les capteurs pour satisfaire le cahier des charges fixés.

Pour l'implémentation de ces procédures, une boîte à outil est développée dans le logiciel *SYMBOLS2000*.

- Dans le domaine théorique

L'idée sous-jacente aux différents résultats exposés dans cette thèse est fondée sur l'intégration à l'aide d'un langage unifié (les bond graphs), de concepts issus de la physique (modélisation), de la théorie de graphes, de l'analyse structurelle et de l'analyse fonctionnelle. Il ne s'agit pas évidemment d'introduire sans raison des extensions en juxtaposant des éléments de divers domaines. Les outils développés dans ce rapport font apparaître plusieurs limites qui ouvrent des thèmes de recherche à développer:

- Les incertitudes paramétriques (constantes ou variables) peuvent être prises en compte dans la modélisation bond graph en caractérisant chaque élément bond graph X ($R, C, I, \dots$) de sa valeur nominale X_n et d'incertitude ΔX . Des travaux dans le domaine de la modélisation des modèles linéaires incertains où les incertitudes concernent les paramètres des éléments passifs (R, C, I) ont déjà été développés dans la cadre d'une thèse encadrée par le prof. G. Dauphin-Tanguy. Ces incertitudes peuvent être prises en compte dans

l'étape de décision dans le traitement des résidus (en aval du module de génération des *RRAs*).

- Les modèles développés concernent des processus thermofluides (deux énergies, thermique et hydraulique), une extension à des processus chimiques est en cours de développement. Dans ces modèles les phénomènes de transformations chimiques (caractérisés par la paire de pseudo variables de puissance: potentiel chimique (ou affinité chimique) et le flux molaire proche et loin de l'équilibre seront développées. Le développement de ces modèles ouvriront une autre voie de recherche: le diagnostic dans le domaine de la sûreté et de la protection de l'environnement des processus chimiques avec une approche à base de modèle. En effet, l'apparition de réactions secondaires dans des processus chimiques peut être considérée comme un modèle défaillant donc source d'apparition de la pollution ou de catastrophe technologique suite à la production de produits explosifs par exemple.
- Dans la procédure de placement de capteurs à partir des résidus sans génération de *RRAs*, l'étude de l'existence de chemins entre un élément de X (ensemble des variables inconnues) et un élément de Y (ensemble des variables connues) traduit les propriétés de surveillabilité structurelle du système en fournissant les séquences de calcul. Dans les processus en génie des procédés, il existe plusieurs possibilités de dépendances causales donc de calculabilité d'une variable à partir de la relation de structure (à cause du couplage des énergies), l'élimination du problème combinatoire par l'introduction de cet algorithme.

Annexes

1 Logiciel SYMBOLS 2000

La modélisation Bond Graph se trouve facilitée par l'existence du logiciel spécifique *Symbols2000* permettant la saisie graphique du modèle, son analyse causale et sa simulation.

1.1 BondPad

BondPad est le premier module qu'un utilisateur rencontre. La tâche entière de la modélisation des systèmes est accomplie dans ce module. BondPad est une plate-forme simple pour exécuter les activités suivantes :

Quand l'utilisateur ouvre *BONDPAD*, la fenêtre principale apparaît avec trois sous fenêtres comme le montre la figure 1 :

La fenêtre gauche contient les outils de dessin et de modification du modèle bond graph.

La fenêtre inférieure est la fenêtre d'expression qui affiche les équations sous une forme symbolique et permet à l'utilisateur de faire entrer des équations.

La fenêtre supérieure droite est vide au début.

L'utilisateur peut ouvrir un nouveau document pour dessiner un nouveau modèle en cliquant sur le bouton " *New* " qui se trouve sur la barre d'outils, l'utilisateur peut aussi ouvrir un modèle bond graph existant pour le modifier ou l'éditer et ceci en cliquant sur le bouton " *Open* " qui se trouve sur la barre d'outils aussi.

La fenêtre gauche contient trois onglets pour les outils, les capsules et l'information. L'onglet " visualisation d'information " dans la fenêtre objet fournit une information détaillée sur *Bondpad*. Si l'on clique sur l'onglet " Outils ", plusieurs outils de dessin et d'édition sont affichés sous forme de liste. Si l'on clique sur l'onglet " *Capsule* ", des capsules listées sous plusieurs groupes s'affichent. On peut même sélectionner et incorporer des capsules dans le modèle.

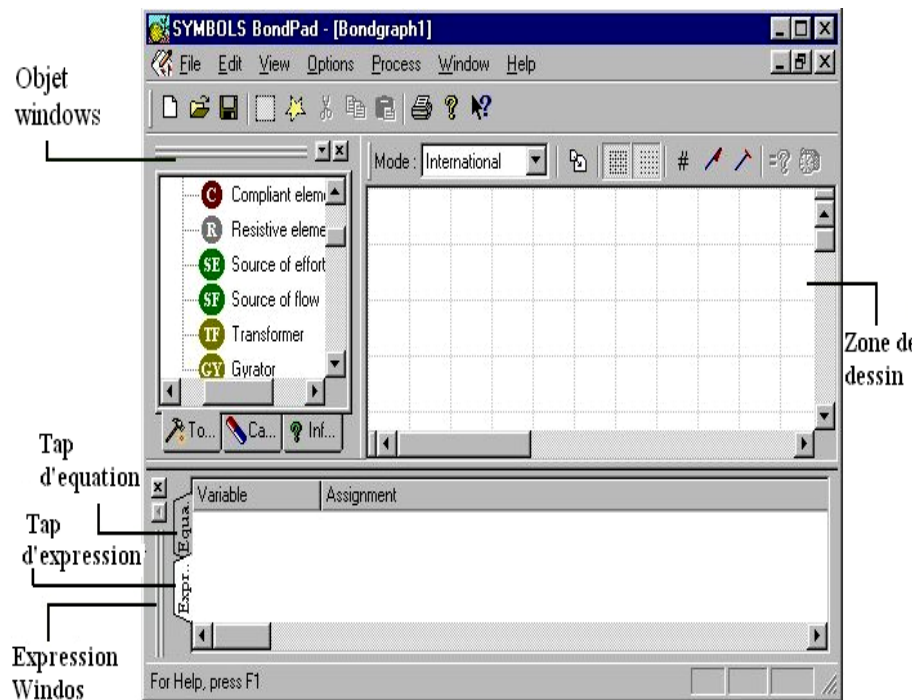


FIG. 1 – Fenêtre BondPad

1.2 Exemple 1 : Modélisation et Simulation

Considérons le circuit de la figure 2 :

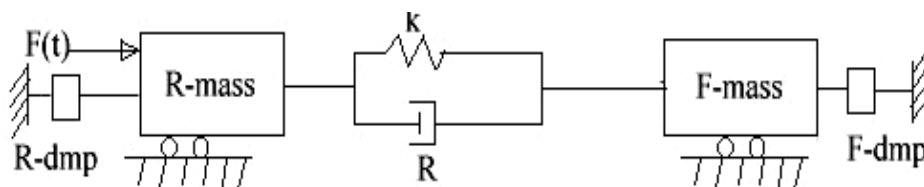


FIG. 2 – Système mécanique à modéliser

1.2.1 Modèle sous BondPad

Le modèle sous *Bondpad* et les équations correspondantes au modèle bond graph telles qu'elles apparaissent dans la fenêtre " *Expression* " sont donnés par la figure 3 :

1.2.2 Possibilités de Symbols-2000 Bondpad

1-Dessin d'un modèle Bond graph.

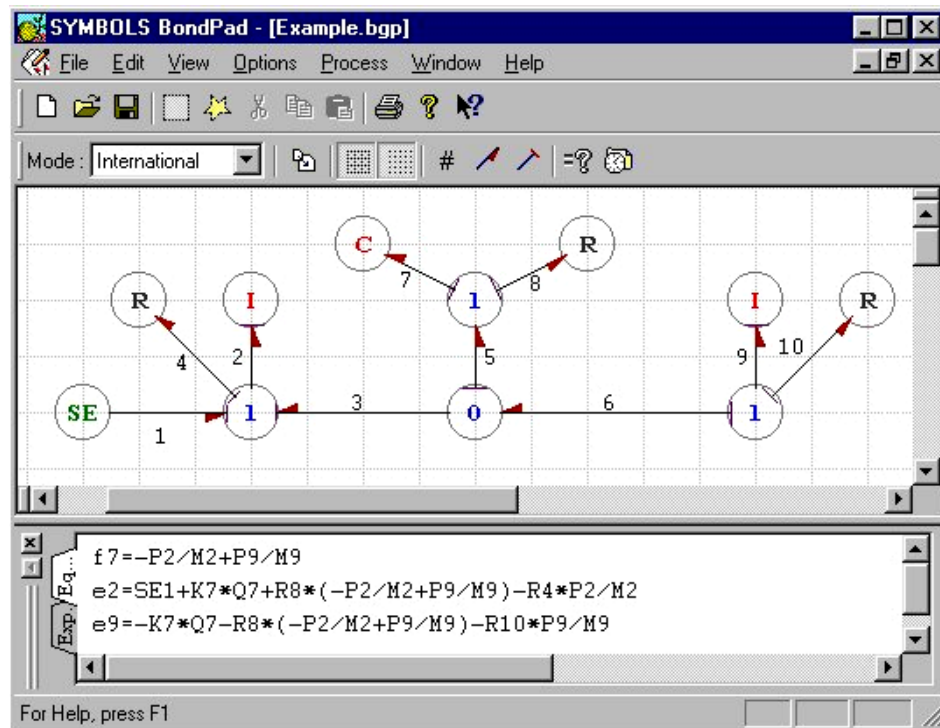


FIG. 3 – Dessin du modèle et compilation

2-Augmentation d'un modèle par énumération des bonds, assignation de la direction de puissance, causalité, modulo 2 d'éléments port, activation de bonds.

3-Validation du Bond graph. L'intégrité de Bond graph est validée après la création du modèle.

4-Création des observateurs non intégrés sous forme de détecteurs.

5- Génération d'équations et affichage dans une palette simple.

6-Création des expressions.

7-Génération du code programme.

8-Création des modèles de sous-ensemble comme capsules et incorporation des capsules dans un modèle de Bond graph.

9-Diagnostic de défauts.

10-Addition facile de gestionnaires.

11-Analyse automatique d'expressions.

12-Préparation de modèles pour les modules du simulateur et de la commande.

13-Exportation des modèles à l'environnement *Matlab/Simulink*.

1.2.3 Aperçu du simulateur de SYMBOLS2000

On va présenter la procédure générale de simulation sous l'environnement du développement intégré du simulateur. La fenêtre du simulateur est montrée sur la figure 4 :



FIG. 4 – Fenêtre de simulation

Le point d'entrée du simulateur est le " fichier de définition de module " (*fichier.sym*) généré à partir du *Bondpad*. Ce fichier doit être compilé à l'aide de la commande " *Compile* " du menu " fichier " pour créer un fichier d'expérimentation du simulateur ". Après sélection du fichier.sym, la fenêtre de compilation de la figure 5 apparaît.

Si l'on clique sur le bouton " *Create* ", un ensemble de fichiers d'entête (.h), de fichiers source (.cpp), de fichiers de définition (.def) et de fichiers batch (.bat) seront créés. Une fois la compilation démarrée, l'état de compilation, les messages d'erreurs et d'avertissement sont affichés dans la fenêtre de la figure 6.

1.2.4 Fenêtre du graphe en ligne

Cette fenêtre affiche automatiquement la réponse mesurée selon les variables de traçage indiquées pendant les étapes de simulation, elle est donnée par la figure 7.

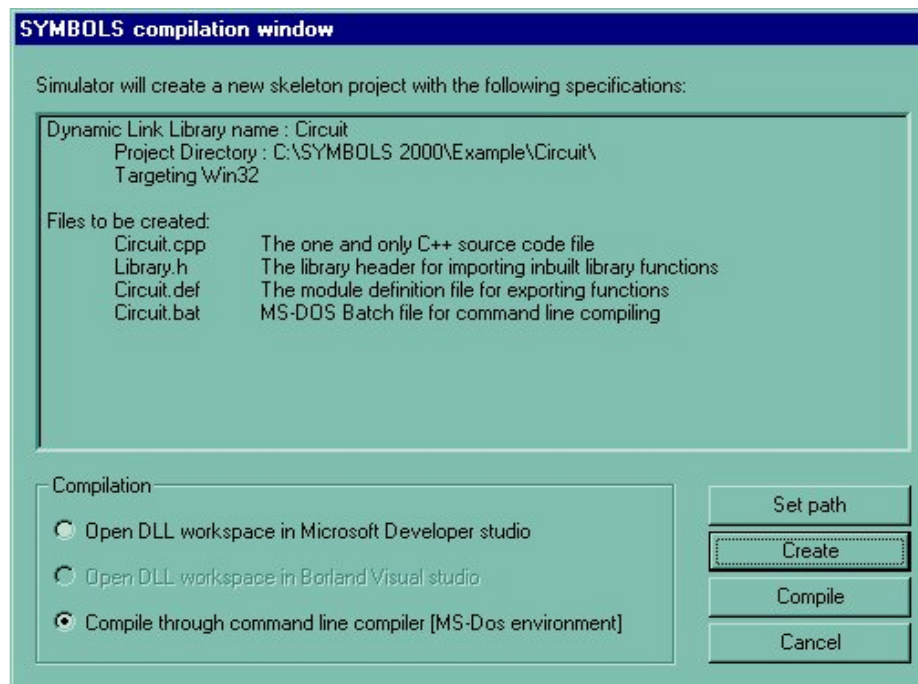


FIG. 5 – Fenêtre de compilation

1.3 Exemple 2 : Diagnostic et Simulation

1.3.1 Modèle d'une vanne pneumatique sur Symbols2000

La figure 8 représente le modèle bond graph d'une vanne pneumatique implanté sur le logiciel *Symbols2000*.

Simulation du modèle figure 9

1.3.2 Modèle bond graph pour contrôler l'écoulement du fluide (figure 10) :

1.3.3 Modèle bond graph pour contrôler la position de la tige (figure 11) :

La simulation pour mesurer l'écoulement de fluide est donnée par la figure 12 :

La simulation après la création d'une faute sur la commande de la vanne $R : Rvn$ (figure 13).

Le pic sur la courbe indique la faute sur $R : Rvn$.

1.3.4 Simulation de la position de la tige (figure 14) .

On remarque que la courbe est variée exponentiellement.

Après la création d'une faute sur le ressort on trouve le résultat de la figure 15 :

On remarque qu'il y a un pic au moment de l'application de la faute.

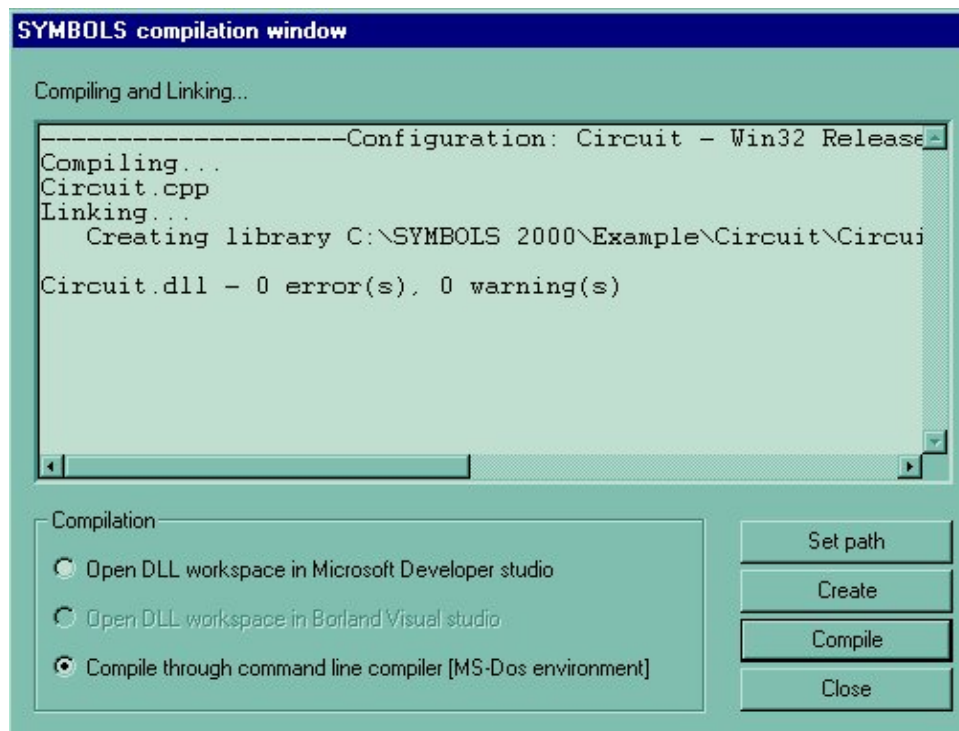


FIG. 6 – Réponse aux erreurs de logique et de syntaxe

2 Fonctions thermodynamiques[78]

1. Enthalpie spécifique de la vapeur en fonction de la pression:

$$h_v(P) = -0,74P^2 - 17,21P_3 + 2680 \quad (1)$$

2. Enthalpie spécifique du liquide en fonction de la pression:

$$h_l(P) = -0,0243P^4 + 0,8487P^3 - 11,9P^2 - 99,97P + 347 \quad (2)$$

3. Volume spécifique de la vapeur en fonction de la pression:

$$\begin{aligned} \nu_v(P) = & -5,3 * 10^{-5}P^5 + 0,00207P^4 - 0,032P^3 \\ & + 0,2498P^2 - 1,03P + 2,166 \end{aligned} \quad (3)$$

4. Volume spécifique du liquide en fonction de la pression:

$$\nu_l(P) = -3,59 * 10^{-7}P^3 + 1,2456 * 10^{-5}P^2 + 1,039 * 10^{-3} \quad (4)$$

5. Température en fonction de la pression:

$$f_T(P) = T = 0,459.P^2 + 12,7243.P + 99,005 \quad (5)$$

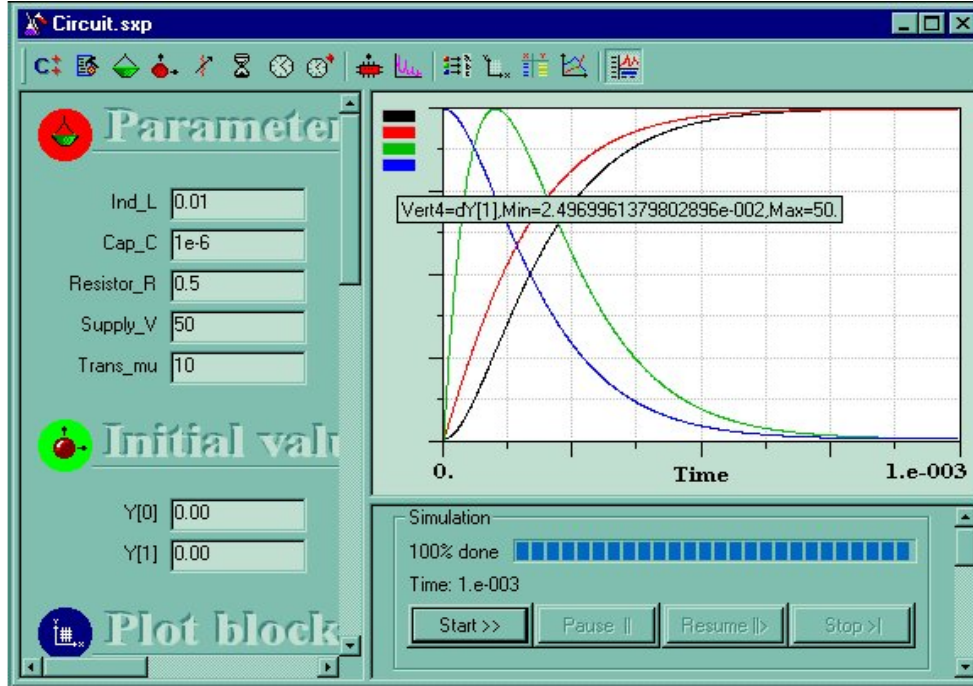


FIG. 7 – Attribution des données et simulation du modèle

6 Dérivée partielle de la densité de vapeur à saturation en fonction de la température:

$$\begin{aligned}
 dRho = \left(\frac{\partial \rho_3}{\partial T} \right)_{T=T_{SAT}} &= 5 * 9,18 * 10^{-12} T^4 \\
 &+ 1,59159 * 10^{-9} T^3 \\
 &+ 3 * 2,6823812 * 10^{-7} T^2 \\
 &+ 2 * 5,672779398 * 10^{-6} T \\
 &+ 1,9036631098 * 10^{-4}
 \end{aligned} \tag{6}$$

7 Chaleur latente de la vapeur en fonction de la température:

$$\begin{aligned}
 L_V(T) &= -3,4 * 10^{-11} . T^4 + 4,421 * 10^{-11} . T^3 \\
 &- 1,54503768 * 10^{-6} . T^2 - 2,21405632169 * 10^{-3} . T \\
 &+ 2,49715620119075 * 10^6
 \end{aligned} \tag{7}$$

8 Enthalpie du liquide en fonction de la température:

$$h_L(T) = 4,337 . T - 1,2025 * 10^3 \tag{8}$$

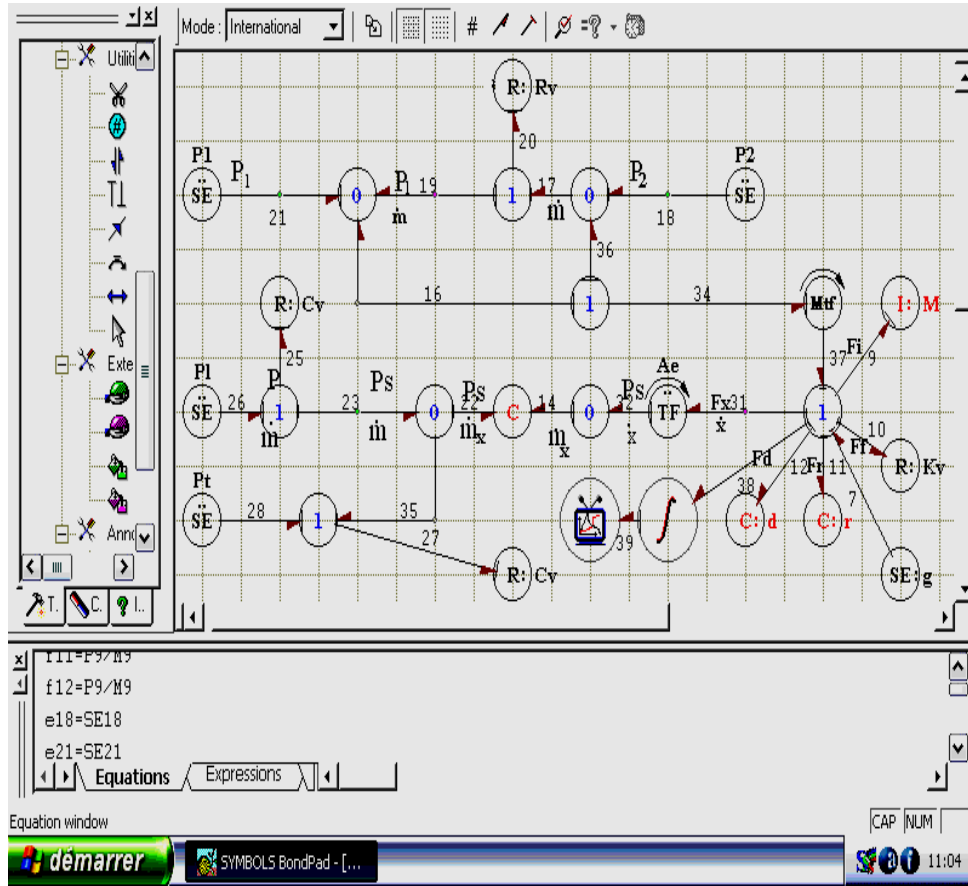
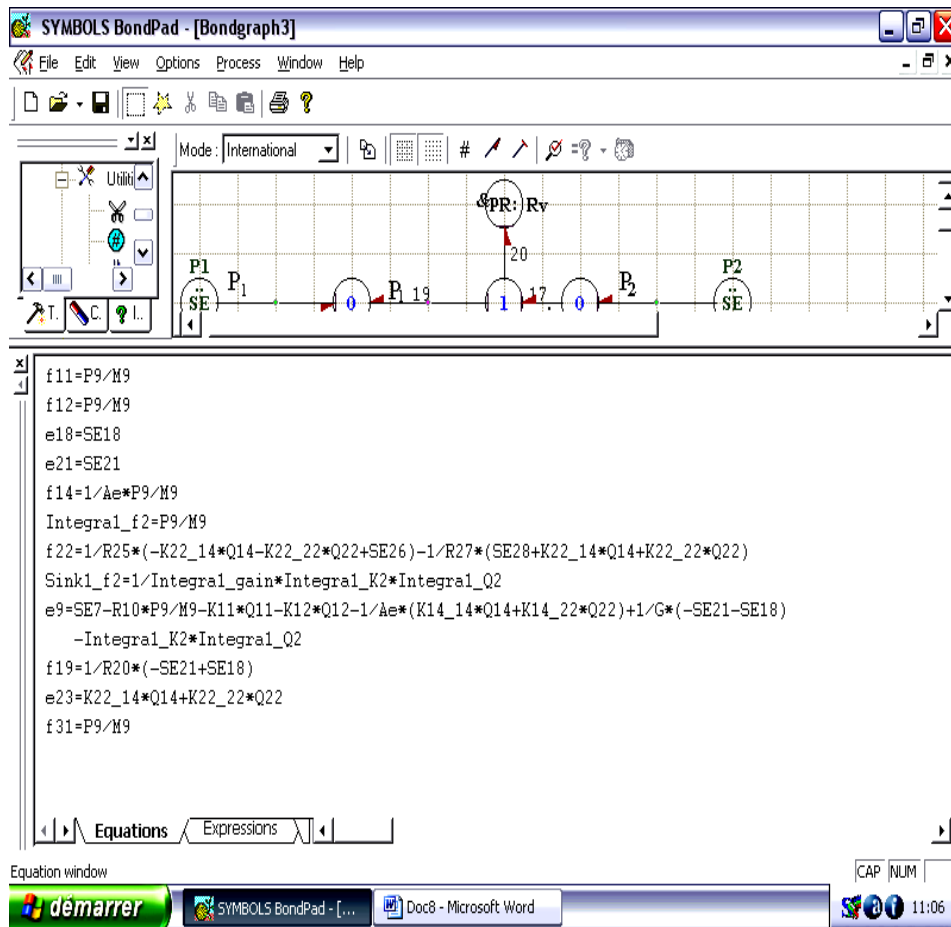


FIG. 8 – Modèle Bond graph de la vanne

9 Enthalpie de la vapeur en fonction de la température:

$$h_V(T) = 1,1248T + 2267,5 \quad (9)$$

Unités utilisées: Enthalpie spécifique h en kJ/kg , Température en $^{\circ}C$, Pression P en bar , Volume spécifique en m^3/kg .

FIG. 9 – *Modèle mathématique*

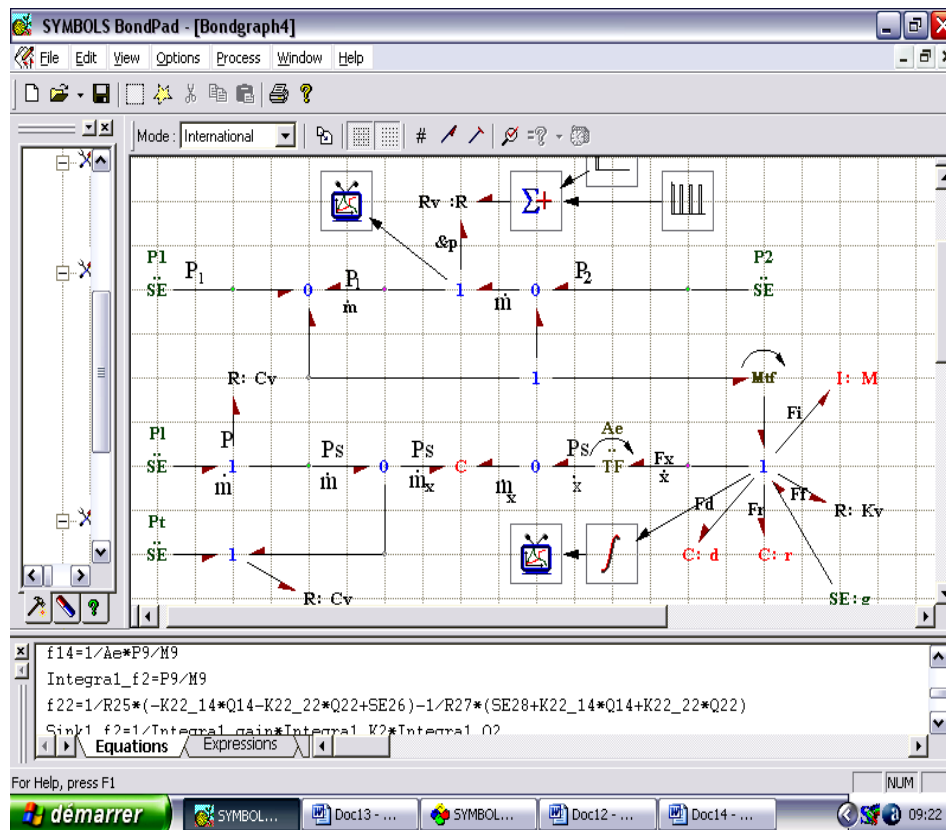
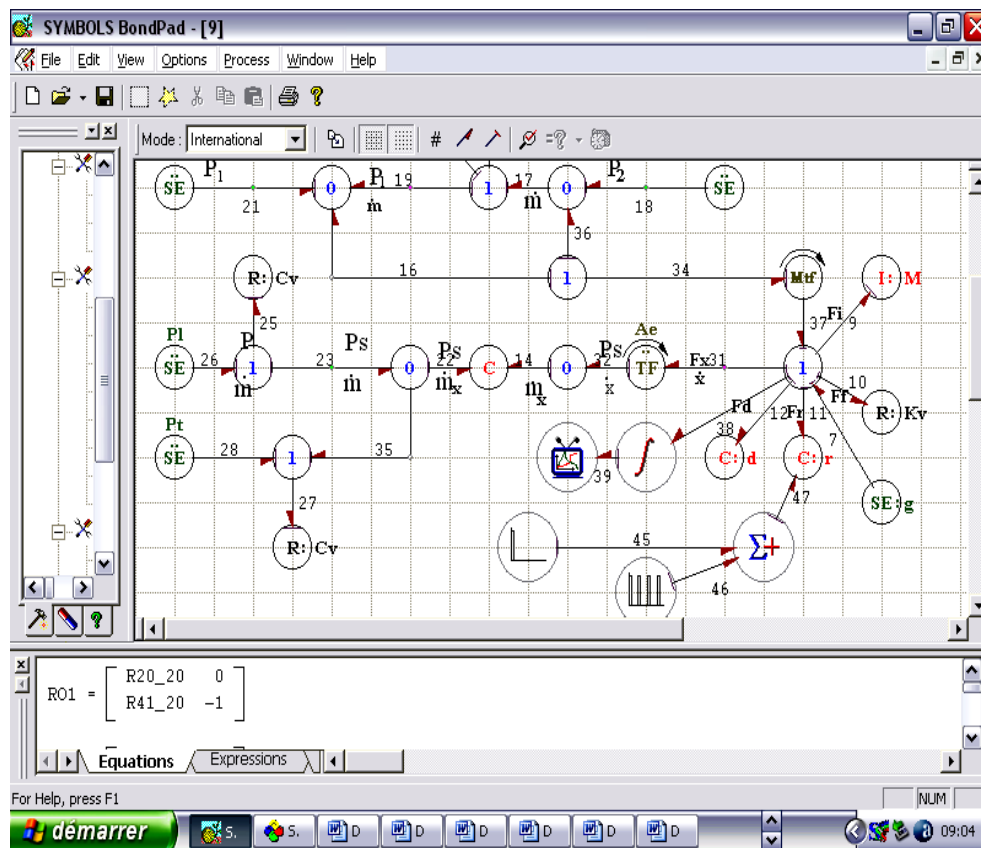
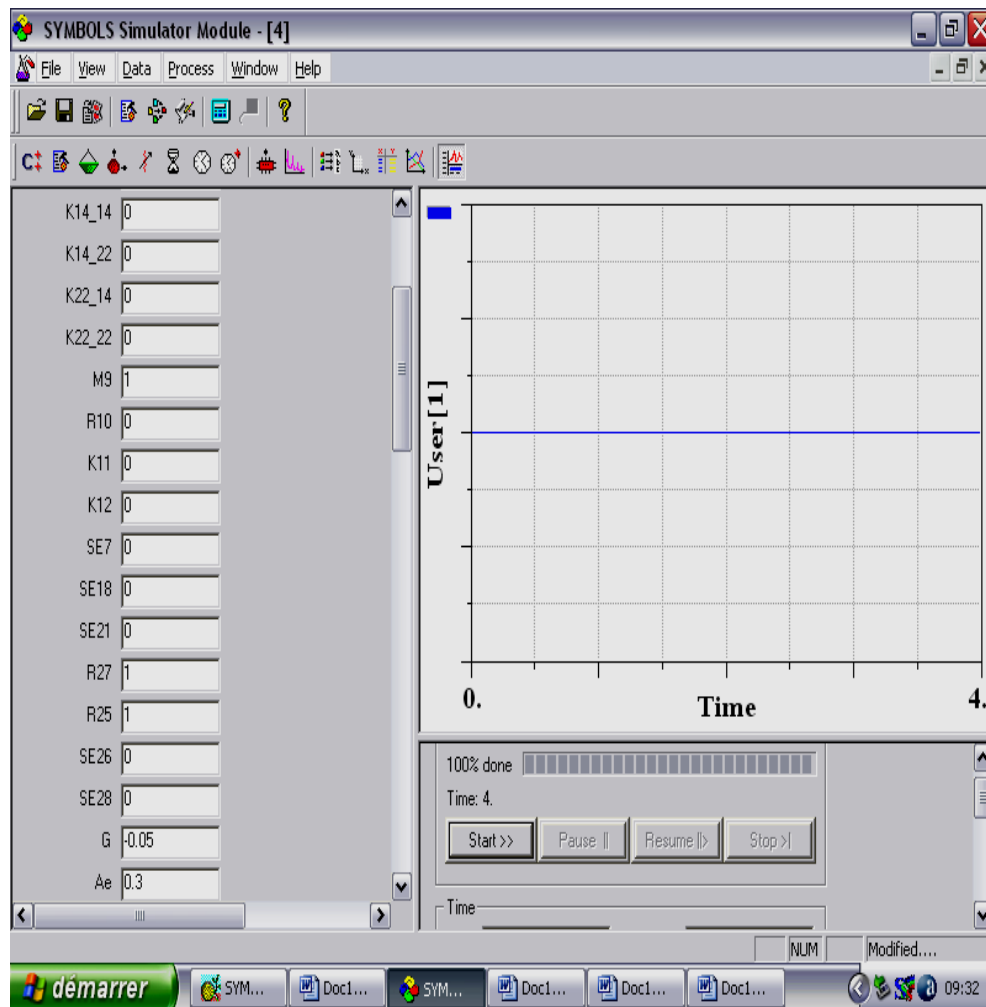


FIG. 10 – Contrôle de l'écoulement du fluide

FIG. 11 – *Contrôle de la position de la tige*

FIG. 12 – *Ecoulement sans défaillance*

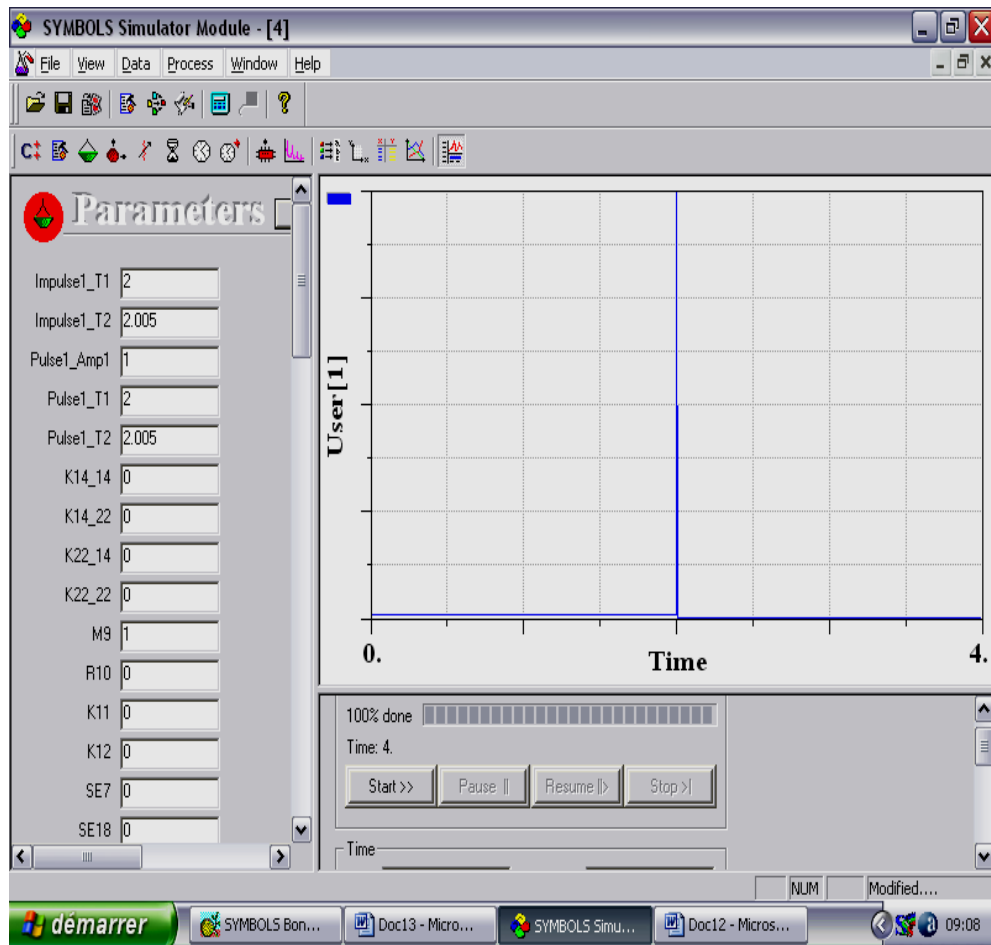


FIG. 13 – Défaillance de la vanne

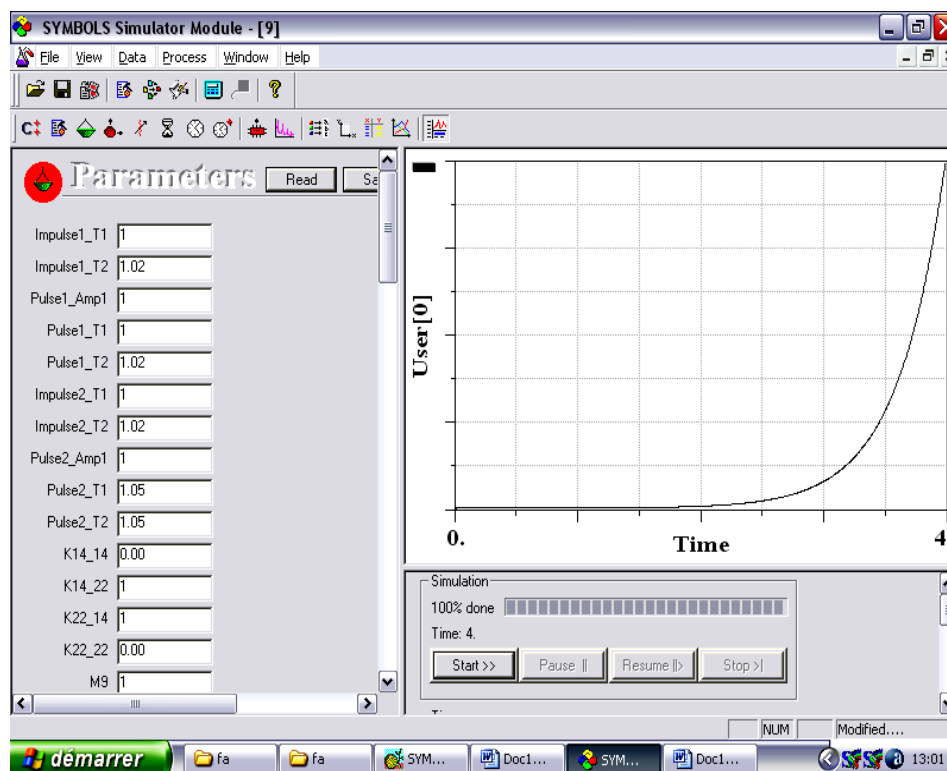


FIG. 14 – Affectation des paramètres et simulation de la position du ressort de la tige

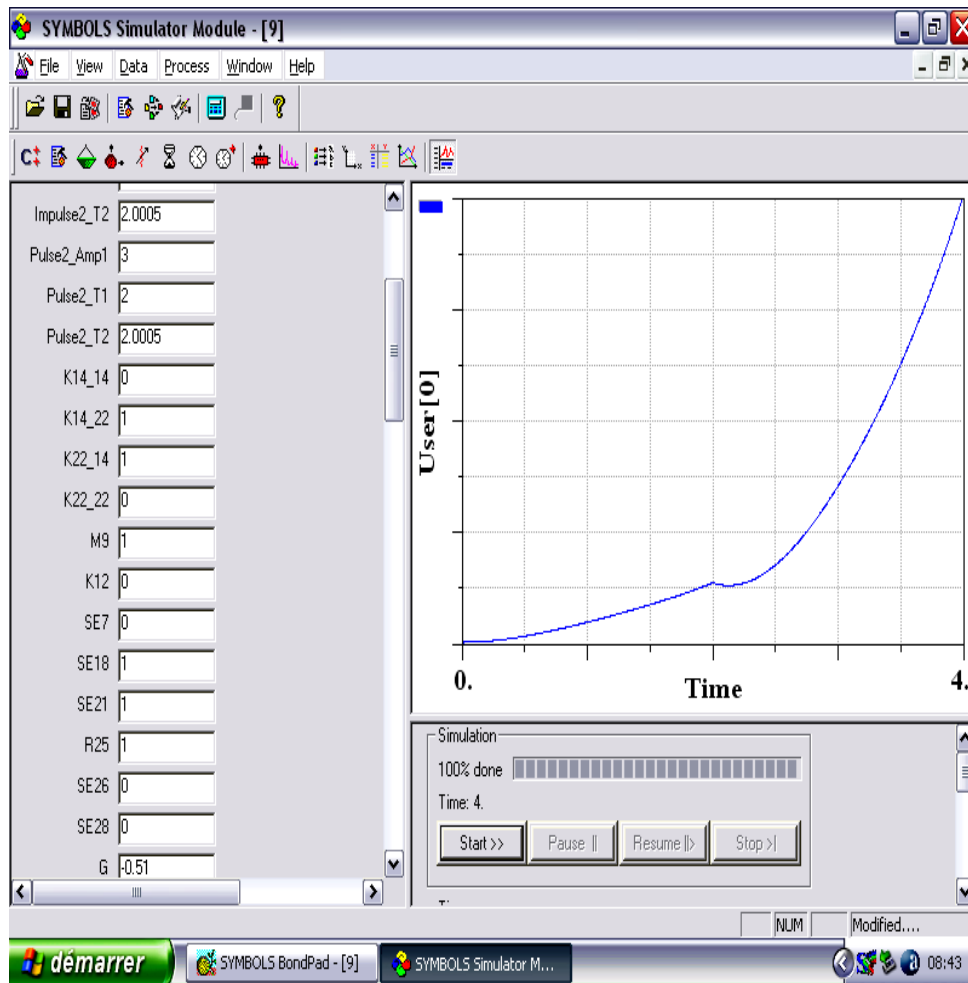


FIG. 15 – Défaillance sur le ressort

Bibliographie

- [1] Aitouche, A., et al. “Multiples Sensor Faults Detection of Steam Condensers,” *Computers and Chemical Engineering*, 585–588 (1999).
- [2] Anderson, J.H. and K.W. Kwan. “A Mathematical Model of a 200 Mw Boiler,” *International Journal of Control*, 12:977–998 (1970).
- [3] Åström, K.J. and R.D. Bell. “Drum-Boiler Dynamics,” *Automatica*, 36:363–378 (2000).
- [4] Basseville, M., et al. “Optimal Sensor Location for Detecting Changes in Dynamical Behaviour,” *IEEE transactions on Automatic Control*, AC-32, N°12 : 1067 – 1075 (December 1987).
- [5] Borne, P., et al. “Modélisation et Identification Des Processus,” Edition Technip, Paris (1992).
- [6] Bredveld, P., et al. “Bibliography of Bond Graph Theory and Applications,” *Journal of Franklin Institute*, 328 (1991).
- [7] Brown, F.T. “Direct Application of the Loop Rule to Bond Graphs,” *Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control*, 253–261 (1972).
- [8] Brunet, J., et al. “Détection et Diagnostic de Pannes. Approches Par Modélisation,” Paris (France), série diagnostic et maintenance édition (1990).
- [9] Busson, F. “Les Bond Graphs Multiénergies Pour la Modélisation et la Surveillance En Génie Des Procédés,” Thèse de Doctorat de l’Université en Automatique et Informatique Industrielle - LAIL de Lille, France. (20 Décembre 2002).
- [10] Carpentier, T. “Placement de Capteurs Pour la Surveillance Des Processus Complexes,” Thèse de Doctorat de l’Université, USTL, LILLE, France (11 Mai 1999).
- [11] Cherifi, E. “Analyse Fonctionnelle et Structurale Des Systèmes Homme-Machine Pour la Supervision,” Thèse de PhD, Université de Valenciennes, France (1998).
- [12] Chittaro, L.G., et al. “Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning About Physical System: A Case Study in Diagnosis,” *IEEE Trans. on Syst. Man and Cybernetics*, 23 (1993).
- [13] Cho, E.Y. and A.C. Willsky. “Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection System,” *IEEE, Trans. A. C.*, 29(7) (1984).

-
- [14] Corana, A., et al. "Minimizing Multimodal Functions of Continuous Variables with the Simulated Annealing Algorithm," *ACM Trans Math Software*. 13, 262–280 (1987).
 - [15] Dauphin-Tanguy, G. "Les Bond Graphs," Paris, France (2000).
 - [16] Donald-Chmielewski, J., et al. "On the Theory of Optimal Sensor Placement," *AICHE Journal*, Vol. 48, n°5 : 1001 – 1012 (May 2002).
 - [17] Dubuisson, B. "Diagnostic et Reconnaissance Des Formes," *Hermes, Paris, France* (1990).
 - [18] et D. Jaume, M. Vergé. "Fault Detection and Bond Graph Modeling," *IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Espoo, Finland*, 748–753 (June 1994).
 - [19] Frank, P.M. "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy. A Survey and some New Results.," *Automatica*, 26 (3):459–474 (1990).
 - [20] Frauchi, C. and D. Gallieni. "Pre-Test Optimisation by Genetic Algorithm.," *Proceedings of the 19th International Seminar on Modal Analysis, LEUVEN, Belgium*. (1994).
 - [21] Gentil, S. "Intelligence Artificielle Pour la Surveillance Des Procédés Continus," *Acte de l'école d'été d'automatique de Grenoble, France. Tome 1* (2-6 Septembre 1996).
 - [22] Ghiaus, C. "Fault Diagnosis of Air Conditioning Systems Based on Qualitative Bond Graph," *Energy and buildings*, 30:221–232 (1999).
 - [23] Goldberg, D.E. "Genetic Algorithms in Search, Machine Learning and Optimisation," *New York: Addison Wesley* (1989).
 - [24] Greifeneder, J. and F.E. Cellier. "Modelling Multi-Phase Systems Using Bond Graphs," *Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modelling and Simulation ICBGM'2001, Phoenix, Arizona*, 285–291 (2001).
 - [25] Haves, P., et al. "Condition Monitoring in HVAC Sub-Systems Using First Principles Models," *ASHRAE Transactions (Part 1)*, 519–527 (1996).
 - [26] Hoblos, G. "Contribution À L'analyse de la Tolérance Aux Fautes Des Systèmes D'instrumentation," *Thèse de doctorat de l'université en automatique et informatique industrielle USTL, LILLE, France*. (20 Mars 2001).
 - [27] Holland, J.H. "Adaptation in Natural and Artificial Systems," *MIT Press* (1975).
 - [28] Immonen, P.J. "Classification And Placement of Measurements Through LP/MIP Algorithms.," *IFAC/IMACS Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS'94, ESPOO, Finland*. (June 13-15, 1994).
 - [29] Iserman, R. "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods," *A Survey Automatica*, 20(4):387–404 (1984).

-
- [30] Karnopp, D.C. "State Variables and Pseudo-Bond Graphs for Compressible Thermo-Fluid Systems," *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 101(3):201–204 (September 1979).
 - [31] Karnopp, D.C. and S. Azerbaijani. "Pseudo Bond Graphs for Generalised Comportmental Models in Engineering and Physiology," *Journal of Franklin Institute.*, 312:95–108 (1981).
 - [32] Karnopp, D.C., et al. "System Dynamics: A Unified Approach," *John Wiley and Sons, Inc* (1990).
 - [33] Kohda, T., et al. "Identification of System Failure Causes Using Bond Graph Models," *International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 5:269–274 (1993).
 - [34] Kubrulsy, C.S. and H. Malebranche. "Sensors and Controllers Location in Distributed Systems-a Survey," *Automatica*, 21:117–128 (1985).
 - [35] Lamiri, S. "Modélisation de Procédés de Génération de Vapeur En Dimension Finie et Infinie," *Thèse de doctorat, USTL de Lille1, Villeneuve d'ascq (France)* (Novembre 2000).
 - [36] Lamiri, S., et al. "Modélisation D'un Générateur de Vapeur Par Équations À Paramètres Distribués," *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 35(3):239–263 (2001).
 - [37] Lee, W., et al. "Fault Detection in an Air-Handling Unit Using Residual and Recursive Parameter Identification Methods," *ASHRAE Transactions (Part 1)*, 528–539 (1996).
 - [38] Linkens, D. and A. Wang. "Fault Diagnosis Based on a Qualitative Bond Graph Model, with Enphasis on Fault Localisation," *International Conference on Control'94*, 2:1329–1334 (1994).
 - [39] Linkens, D. and A. Wang. "Qualitative Bond Graph Reasoning in Control Engineering in Fault Diagnosis," *ICBGM'95, Proceedings of the 1995 Western Multiconference*, 189–194 (1995).
 - [40] Lucas, B. and J. M. Evrard. "An Improved Diagnosis Method Using a Mixed Model," *TOOLDIAG'93 Conference on Fault Diagnosis, Toulouse, France*, 1071–1079 (December 1993).
 - [41] Luong, M. "Conception de L'architecture D'un Système D'instrumentation Sous Contraintes de Diagnostic, de Fiabilité et de Disponibilité," *Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, NANCY, France.* (1996).
 - [42] Luong, M., et al. "Observability, Redundancy, Reliability and Integrated Design of Measurement System.," *2nd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications, SICICA '94, BUDAPEST, Hungary.* (June 8-10, 1994).
 - [43] Luong, M., et al. "Obsevability, Reliability and Sensor Positionning.," *AICHE Spring National Meeting, HOUSTON, USA.* (March 19-23, 1995).

-
- [44] Madeline, B. "Algorithmes Évolutionnaires et Résolution de Problèmes de Satisfac-tion de Contraintes En Domaines Finis.," *Thèse de doctorat de l'université de Nice-Sophia An-tipolis. Ecole doctorale STIC. Département d'Informatique, NICE, France.* (18 décembre 2002).
 - [45] Maquin, D. "Observabilité, Diagnostic et Validation de Données Des Procédés Indus-triels," *Thèse de l'université de Nancy1, NANCY, France* (Novembre 1987).
 - [46] Maquin, D., et al. "Observability and Data Validation of Bilinear System.," *1er congrès IFAC AIPAC'89, 2:II.139–II.144, NANCY, France* (3-5 Juillet 1989).
 - [47] Maquin, D., et al. "Observability Analysis and Sensor Placement," *IFAC/IMPACS Sym-posium on fault detection, supervision and safety for technical processes, SAFEPRO-CESS'94, ESPOO, Finland, (13-15 July 1994).*
 - [48] Maquin, D., et al. "Some Ideas About the Design of Measurement Systems.," *European Control Conference, ECC'95, ROME, Italy* (September 5-8, 1995).
 - [49] Maquin, D. and J. Ragot. "Diagnostic Des Systèmes Linéaires," *Hermes, Paris, France, hermes édition* (2000).
 - [50] Marrison, N. A. and P. J. Gwatrop. "Fault Detection, Location and Identification in Dynamic Systems," *European Control Conference, ECC'91, Grenoble, France* (2-5 July 1991).
 - [51] Meyer, M. and M. Enjalbert. "Aide Au Positionnement de Capteurs sur Des Procédés Complexes.," *Entropie, N°179 : 31 – –39(1993).*
 - [52] Meyer, M., et al. "Optimal Sensor Location on a Complex Plant: Branch and Bound and Simulated Annealing Comparison," *4th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, ESCAPE'94, DUBLIN, Eire., 175–182 (28-30 March 1994).*
 - [53] Meyer, M., et al. "Optimal Sensor Location on a Complex Plant, Using a Graph Oriented Approach.," *Computers Chemical Engineering, 18:S535–540 (1994).*
 - [54] Millot, P. "Supervision Des Procédés Automatisés et Ergonomie," *Edition Hermes, PA-RIS, France (1988).*
 - [55] Moksnes, P.O. "Modelling Two-Phase Thermo-Fluid Systems Using Bond Graph," *Dr. ing. thesis, University of Sciences an Technology, Department of Marine Engineering, Norway (1997).*
 - [56] Mosiek, D. "Procédures Graphiques Pour L'analyse Structurelle de Systèmes Physiques Modélisés Par Bond Graphs," *Thèse de Doctorat de l'Université en Automatique et Informatique Industrielle - USTL, LILLE, France. (12 octobre 1999).*
 - [57] Mosiek, D., et al. "Determination of Computational Method for the Generation of Ana-lytical Redundancy Relations Using a Bond Graph Approach," *ESS"5 Erlangen. (Octobre 1995).*

-
- [58] Mukharjee, A. and R. Karmakar. “Modelling and Simulation of Engineering Systems Through Bond Graphs,” Alpha Science International (Pangbourne, UK, 2000).
 - [59] Ordys, A., et al. “Modelling and Simulation of Power Generation Plants,” Springer-Verlag, Germany (1994).
 - [60] Ould-Bouamama, B., et al. “Analysis of Structural Properties of Thermodynamic Systems.,” 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, BUDAPEST, Hungary., 2:1068–1073 (14-16 June 2000).
 - [61] Ould-Bouamama, B. and G. Dauphin-Tanguy. “Bond Graph Model of a Steam Generator Process and its Environment,” The 10th European Simulation Multiconference ESM’96, Budapest, Hungary, 238–242 (1996).
 - [62] Ould-Bouamama, B., et al. “Model Builder Using Functional and Bond Graph Tools for FDI Design,” Submitted to Control Engineering Practice Journal (2002).
 - [63] Ould-Bouamama, B., et al. “Multi-Modelling of an Industrial Steam Generator,” Control engineering practice, 8:1249–1260 (2000).
 - [64] Ould-Bouamama, B. and J. U. Thoma. “Les Bond Graphs. Systèmes Automatisés.,” Paris, France Hermes Edition (2000).
 - [65] Ould-Bouamama, B., et al. “Bond Graph Modelisation of Steam Condensers,” IEEE, International Conference on Systems Man, and Cybernetics: Computational Cybernetics and Simulation, Orlando, USA, 3:2490–2494 (1997).
 - [66] Philippus, A. “Temporal Causal Graph (2001),” (2001).
 - [67] Profos, P. “Dynamics of Pressure and Combustion Control in Steam Generators,” Sulzer Technical Review, 37(4):1–15 (1955).
 - [68] Ragot, J., et al. “Analysis of Generalized Bilinear Systems. Application to Diagnosis,” IMACS Symposium MCTS Modelling and Control of Technological Systems., 2:528–535, LILLE, France, 1991
 - [69] Ragot, J., et al. “Validation de Données et Diagnostic,” Editions Hermes (1990).
 - [70] Rahmani, A., et al. “Pole Assignment for Systems Modelled by Bond Graph,” Journal of the Franklin Institute, 331B (3):299–314 (1994).
 - [71] Rimaux, S. “Etude Des Propriétés Structurelles de Certaines Classes de Systèmes Physiques Non Linéaires Modélisés Par Bond Graph,” Thèse de Doctorat, Université de Lille, France (1995).
 - [72] Shah, P.C. and F.E. Udawadia. “A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems.,” Appl Mech, 45:188–196 (1978).
 - [73] Staroswiecki, M. “Analytical Redundancy in Non Linear Interconnected Systems by Means of Structural Analysis,” AIPAC’98, IFAC, 23–27 (1989).
 - [74] Staroswiecki, M. and J. P. Cassar. “Approche Structurelle Pour la Conception Des

- Systèmes de Surveillance*,” Ecôle d’été d’automatique, GRENOBLE, France,, Tome 1 (2-6 Septembre 1996).
- [75] Sueur, C. and G. Dauphin-Tanguy. “Bond-Graph Approach for Structural Analysis of MIMO Linear Systems.,” *Journal of Franklin Institute*, 328 n°1 : 55 – –70(1991).
- [76] Tagina, M. “Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes,” *Thèse de Doctorat de l’Université en Automatique et Informatique Industrielle, Ecole Centrale, LILLE, France.* (07 Nov 1995).
- [77] Thoma, J. U. and B. Ould-Bouamama. “Modélisation et Simulation Des Processus Thermiques et Chimiques. Application Des Bonds Graphs En Génie Des Procédés.,” *Ouvrages sur les Bond Graphs* (1998).
- [78] Thoma, J. U. and B. Ould-Bouamama. “Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach,” *Springer Verlag.* (2000).
- [79] Thoma, J.U. “Problèmes Thermodynamiques Des Machines Hydrauliques,” *Energie Fluide*, 1:61–66 (1975).
- [80] Thoma, J.U. “Simulation by Bond Graphs. Introduction to a Graphical Method,” *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg* (1990).
- [81] TONG, L. S. “Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow,” *Wiley edition* (1966).
- [82] Turbatte, H.C. “Conception D’architectures D’instrumentation Sous Contrainte D’observabilité et de Fiabilité. Application À Des Plate-Formes Pétrolières.,” *Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, NANCY, France.* (Octobre 1992).
- [83] Tylee, L. “Pseudo Bond Graph Representation of PWR Pressurised Dynamic,” *Trans. ASME J. Daic. Sys. Measure Control*, 105:255–261 (1983).
- [84] Wang, A. and D. Linkens. “Intelligent Supervisory Control,” *World scientific series in robotics and intelligent systems*, 14 (1996).
- [85] Watanabe, K., et al. “Determination of Optimal Measuring Sites for Fault Detection of Non Linear System,” *International Journal of System Science*., 16:1345–1364 (November 1985).
- [86] Worden, K. and A. Burrows. “Optimal Sensor Placement for Fault Detection,” *Engineering Structures*, 23:885–901 (2001).
- [87] Worden, K., et al. “A Combined Neural and Genetic Approach to Sensor Placement,” *Proceedings of the 15th International Modal Analysis conference, NASHVILLE, Tennessee* (1995).
- [88] Worden, K. and G. Tomlinson. “Damage Location and Quantification Using Neural Networks.,” *Edwards JH, Kerr J, Stanley P, Editors. Engineering integrity assessment* (1994).

- [89] Yao, L., et al. “Sensor Placement for on-Orbit Modal Identification Via a Genetic Algorithm,” *AIAA Journal*, 31:1167–1169 (1993).