



**HAL**  
open science

# Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés

Wassim El Osta

► **To cite this version:**

Wassim El Osta. Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles Bond Graph couplés. Génie des procédés. Ecole Centrale Lille; Université des Sciences et Technologies de Lille 2005. Français. <NNT: >. <tel-01737497>

**HAL Id: tel-01737497**

**<https://hal.science/tel-01737497v1>**

Submitted on 19 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



## **THESE**

délivrée conjointement par  
l'Université des Sciences et Technologies de Lille et l'Ecole Centrale de Lille

Présentée en vue de l'obtention du grade de

### **DOCTEUR DE L'UNIVERSITE**

Discipline : Productique, Automatique et Informatique Industrielle

Par

**Wassim EL OSTA**

## **SURVEILLABILITÉ STRUCTURELLE ET PLATITUDE POUR LE DIAGNOSTIC DES MODÈLES BOND GRAPH COUPLÉS**

**Thèse encadrée par Belkacem OULD BOUAMAMA et Christophe SUEUR**

Soutenue le 6 décembre 2005 devant la commission du jury

### **Jury :**

- M. Jean BUISSON.** Professeur à SUPELEC (Rapporteur)
- M. Mustapha OULADSINE.** Professeur à l'Université Paule Cézanne Aix Marseille (Rapporteur)
- M. Nacer M'SIRDI.** Professeur à l' Université Paule Cézanne Aix Marseille (Examineur)
- M. Gilles TRYSTRAM.** Professeur à l'ENSIA, Massy (Examineur)
- M. Belkacem OULD BOUAMAMA.** Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille (Coencadreur)
- M. Christophe SUEUR.** Professeur à l' Ecole Centrale de Lille (Coencadreur)



# Table des matières

CV.....	i
<b>Remerciements.....</b>	<b>1</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>3</b>

## Chapitre 1

### *Pré requis et positionnement*

<b>1.2. Analyse structurelle pour des systèmes de commande.....</b>	<b>8</b>
1.2.1. Rang Structurel.....	9
1.2.2. Commandabilité/ Observabilité Structurelle.....	10
1.2.2.1. Commandabilité Structurelle.....	10
1.2.2.2. Observabilité structurelle.....	12
<b>1.3. Définitions de base d'un système de surveillance.....</b>	<b>13</b>
1.3.1. Terminologies.....	13
1.3.2. Les différentes approches de la surveillance.....	15
1.3.2.1 Méthodes sans modèle.....	16
a) Phase d'analyse.....	16
b) Phase de choix d'un système de détection.....	17
c) Phase d'exploitation.....	17
1.3.2.2. Méthodes avec modèles.....	17
a) Approche par estimation de paramètres.....	18
b) Approche par estimation de l'état.....	18
c) Approche par espace de parité.....	18
1.3.2.3. Modèles hiérarchiques.....	19
<b>1.4. Surveillance des systèmes par bond graph.....</b>	<b>20</b>
1.4.1. L'approche qualitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph.....	21
1.4.2. L'approche quantitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph.....	21
1.4.2.1. Génération de RRAs à partir de modèles BGs.....	22
1.4.2.1.1. Méthode par substitution.....	23
1.4.2.1.2. Méthode par projection.....	23
1.4.2.1.3. Génération des RRAs par parcours des chemins causaux.....	24
1.4.3. Surveillabilité directe à partir du modèle bond-graph linéaire.....	24
1.4.3.1. Surveillabilité des capteurs.....	24
1.4.3.2. Surveillabilité des sources de contrôle.....	24

1.4.4. Surveillance des composants.....	25
1.4.5. Informatisation des procédures d'analyse structurelle pour la surveillance des systèmes physiques par bond graph .....	27
<b>1.5. Positionnement &amp; Apport Scientifique.....</b>	<b>28</b>
<b>1.6. Conclusion.....</b>	<b>29</b>

## Chapitre 2

### *Représentation des Modèles Bond Graphs Couplés*

<b>2.1. Introduction.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2. Représentation vectorielle des bond graphs multiénergies.....</b>	<b>31</b>
2.2.1. Représentation des bond graphs à énergies couplées .....	31
2.2.2. Structure d'un modèle bond graph couplé .....	33
<b>2.3. Systèmes multiénergies couplés en génie des procédés.....</b>	<b>36</b>
2.3.1. Variables de puissance en génie des procédés .....	36
2.3.2. Classification des systèmes thermofluides au sens des modules de la représentation vectorielle .....	38
2.3.3. Représentation vectorielle d'un bond graph thermofluide .....	41
<b>2.4. Génération de modèles BG non linéaires.....</b>	<b>42</b>
2.4.1. Eléments multiports de base en génie des procédés (Elément constitutifs) .....	42
2.4.1.1. Multiport R thermodynamique.....	43
2.4.1.1.1. Causalité conductance .....	43
2.4.1.1.2. Causalité résistance .....	47
2.4.1.1.3. Multiport Mixte R.....	47
2.4.1.2. Multiport RS.....	48
2.4.1.3. Multiport C thermodynamique : accumulateur d'énergie.....	49
2.4.1.3.1. Régime sous saturé (réservoir de stockage).....	50
2.4.1.3.2. Accumulateur de vapeur.....	53
2.4.1.4. Source thermofluide.....	60
2.4.1.5. Eléments Mécaniques.....	61
2.4.1.5.1. Pompes Externes .....	62
2.4.1.5.2. Pompe Branchée dans un circuit.....	62
2.4.2. La structure de jonction dans la représentation vectorielle .....	65
2.4.3. Bond graph à Multiliens/ lien et semi-lien multiénergie .....	65
2.4.4. Application : modèle BG non linéaire "découplé" d'un système à 3 réservoirs .....	69
<b>2.5. Génération de modèles linéarisés des processus thermofluides.....</b>	<b>70</b>
2.5.1. Méthodologie .....	70
2.5.2. Modèles Bond Graphs linéarisés des composants thermofluides.....	72
<b>2.6. Conclusion.....</b>	<b>74</b>

## Chapitre 3

### *Analyse structurelle des modèles bond graphs multiénergies linéarisés*

<b>3.1. Introduction.....</b>	<b>75</b>
<b>3.2. Représentation vectorielle du modèle BG linéarisé.....</b>	<b>76</b>

3.2.1. Généralisation .....	77
3.2.2. Cas des systèmes thermofluides .....	78
3.2.3. Quelques propriétés des matrices d'état du modèle linéarisé en génie des procédés .....	83
<b>3.3. Commandabilité/ Observabilité Structurale.....</b>	<b>85</b>
<b>3.4. Modèles de défauts de composants.....</b>	<b>90</b>
3.4.1. Défauts paramétriques .....	91
3.4.2. Défauts structurels.....	92
3.4.2.1. Fuite de débit .....	92
3.4.2.2. Perte De Chaleur.....	95
3.4.3. Représentation des modèles en régime défaillant par bond graph linéarisé .....	96
3.4.3.1. Défaut Paramétrique sur une Résistance simple R (1 port).....	96
3.4.3.2. Défaut Paramétrique sur un Multiport C.....	97
3.4.3.3. Cas des systèmes thermofluides.....	98
3.4.3.3.1. Sous modèle d'un défaut paramétrique R dans le BG linéarisé.....	98
3.4.3.3.2. Sous modèle d'un défaut paramétrique C dans le BG Linearisé (Déformation d'un accumulateur).....	100
3.4.3.3.3. Fuite d'un flux thermofluide (la forme linéarisée) .....	101
3.4.3.3.4. Perte de chaleur (la forme linéarisée) .....	101
<b>3.5. Surveillabilité des processus thermofluides .....</b>	<b>102</b>
3.5.1. Introduction .....	102
3.5.2. Modèles mathématiques .....	103
3.5.3. Cahier des charges.....	104
3.5.4. Surveillabilité des capteurs .....	105
3.5.5. Surveillabilité des sources à partir des systèmes thermofluides linéarisés .....	105
3.5.6. Surveillance des composants.....	110
<b>3.6. Conclusion.....</b>	<b>115</b>

## Chapitre 4

### ***La surveillance des procédés à énergies couplées : Approche Non Linéaire***

<b>4.1. Introduction.....</b>	<b>117</b>
<b>4.2. Surveillance des systèmes non linéaires en génie des procédés....</b> .....	<b>119</b>
<b>4.3. La platitude pour la surveillance des actionneurs en génie des procédés.....</b>	<b>126</b>
4.3.1. La platitude et la surveillance .....	127
4.3.2. La platitude et la surveillance .....	128
4.3.3. Application à un système thermofluide .....	133
<b>4.4. Conclusion.....</b>	<b>136</b>

## Chapitre 5

### ***Application***

<b>5.1. Introduction.....</b>	<b>139</b>
-------------------------------	------------

<b>5.2. Application au Site Pilote de Générateur de vapeur.....</b>	<b>140</b>
5.2.1. Description du processus.....	140
5.2.2. Bond graph de l'installation.....	141
5.2.3. Linéarisation du modèle Bond Graph couplé.....	144
5.2.3.1. <i>Modèles Bond Graphs linéarisés des composants thermofluides</i> ....	145
5.2.3.1.1. <i>Multiport R (Causalité Résistance)</i> .....	145
5.2.3.1.2. <i>Multiport C (le modèle linéarisé)</i> .....	145
5.2.3.1.3. <i>Source Thermofluide Linéarisé (LTS)</i> .....	146
5.2.3.1.4. <i>Éléments Mécanique (le modèle linéarisé)</i> .....	147
5.2.3.2. <i>Modèle Bond Graph linéarisé de l'installation</i> .....	149
5.2.3.3. <i>Vérification des modèles BGs linéarisés</i> .....	150
5.2.4. Analyse structurelle du modèle BG linéarisé.....	153
5.2.4.1. <i>Rang structurel</i> .....	153
5.2.4.2. <i>Commandabilité Structurelle</i> .....	154
5.2.4.3. <i>Observabilité Structurelle</i> .....	155
5.2.5. Surveillabilité des défauts additifs à partir du modèle BG linéarisé.....	156
5.2.5.1. <i>Surveillabilité des capteurs</i> .....	156
5.2.5.2. <i>Surveillabilité des actionneurs en utilisant les capteurs hydrauliques et thermiques</i> .....	156
5.2.5.3. <i>Surveillabilité des actionneurs avec uniquement des capteurs thermiques</i> .....	158
5.2.6. Surveillabilité des défauts multiplicatifs (composants) à partir du modèle BG linéarisé.....	158
5.2.6.1. <i>Description des défauts</i> .....	159
5.2.6.2. <i>Linéarisation du modèle Bond Graph en mode défaillant</i> .....	159
5.2.6.3. <i>Surveillance des composants du modèle BG linéarisé</i> .....	160
5.2.6.4. <i>Vérification par la Génération des RRAs et les Signatures des fautes</i> .....	161
5.2.7. La platitude pour la surveillance des actionneurs basée sur une approche bond graph.....	164
5.2.7.1. <i>Surveillabilité des actionneurs par approche bond graph</i> .....	164
5.2.7.2. <i>Vérification des résultats par la génération des RRAs</i> .....	165
<b>5.3. Création et Incorporation des Capsules sous Symbols 2000.....</b>	<b>168</b>
<b>5.4. Conclusion.....</b>	<b>175</b>

## Chapitre 6

### **Conclusions générales et Perspective**

.....	177
-------	-----

## ANNEXE A

### LES BOND GRAPHS, PRINCIPES, CONCEPTS ET LANGAGE

A.1. Niveaux de modélisation.....	181
A.2. Les transferts de puissance.....	182
A.3. Variables mises en jeu.....	183
A.4. Éléments BG.....	183
A.5. Causalité.....	185
A.6. Notions de chemin causal et de boucle causale.....	186

**ANNEXE B**  
LES SYSTÈMES EN GENIE DES PROCÉDES

<i>B.1. Equations d'état d'un BG thermofluide linéarisé .....</i>	<i>189</i>
<i>B.2. Forme des équations d'état non linéaires en génie des procédés.....</i>	<i>192</i>
<i>B.3. Ordre d'un système thermofluide.....</i>	<i>195</i>
<i>B.4. Système thermofluide et causalité dérivée .....</i>	<i>198</i>
<i>B.5. Modèle d'une pompe en génie des procédés .....</i>	<i>200</i>
<i>B.6. L'intérêt de la nouvelle représentation vectorielle pour la méthode de projection.....</i>	<i>201</i>

**ANNEXE C**

LE GV, SCHEMA TECHNOLOGIQUE ET MODELES BOND GRAPHS .....	207
--	-----

<b><i>Bibliographie</i></b> .....	215
-----------------------------------	-----

## WASSIM EL OSTA

Célibataire, 27 ans, Permis B  
47 Avenue Marcellin Berthelot  
(app 604, BL06) 92320 Chatillon  
Tel : +33 6 10 46 73 58  
elosta@ensta.fr,  
Wassim.El\_osta@ec-lille.fr,  
Wassim\_osta@hotmail.com



## FORMATIONS

---

- 2005-2006** *Mastère Spécialisé en Architecture Navale et Offshore à l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées (ENSTA)*
- 2002-2005** *Docteur en Automatique et Informatique Industrielle (Diagnostic des procédés industriels par une approche Bond Graph) de l'Ecole Centrale de Lille (ECL)*
- 2003-2004** *Diplôme en gestion de projet, formation à distance organisée par l'Université de Technologie Compiègne (UTC)*
- 2001-2002** *D.E.A en Automatique et Informatique Industrielle à l'Université de Science et de Technologie de Lille (USTL)*
- 1998-2001** *Ingénieur d'état en Mécanique (Construction des Machines et des Structures) de l'Université Libanaise (Major de la promotion)*
- 1996-1998** *Classe Préparatoire en Génie Mécanique au Liban (mention Bien)*

## EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

---

- **Enseignement** (2002-2005) *Chargé de TP d'Automatique à l'Ecole Centrale de Lille et à l'Institut Universitaire de Technologie « A »*
- **Navale** (2000-2001) *Assistant Ingénieur au sein du Coastal Engineering Office (Ingénierie navale, portuaire et expertise assermentée par le Bureau Veritas, Llyod's, NKK et la court de justice Libanaise) travail réalisé au Port de Beyrouth sur la conversion de deux navires de charge en Animaliers selon la réglementation du Département d'Agriculture Irlandaise).*
- **Aéronautique** (été 2000) *Stage réalisé sur la maintenance des avions au sein de la compagnie "Trans Mediterranean Airways" à l'aéroport de Beyrouth*
- **I.D.M factory S.A.L** (été 1999) *Management et animation d'une équipe sur une chaîne de production dans une usine de shampooing à Beyrouth*

## ACTIVITES & CONNAISSANCES DIVERSES

---

**11 Publications** dans des congrès nationaux et internationaux (IMACs, IFAC, IEEE, ...)

**Encadrement de stages universitaires**

**Doctoriales** (Septembre 2004) *Stage de préparation des doctorants à l'après-thèse, travail en équipe, fonctions de l'entreprise, gestion de projets, gestion de l'innovation, illustration par des visites d'entreprises, élaboration d'un projet d'innovation, USTL et SUAIO (Lille).*

**Membre de la RINA** *The Royal Institution of Naval Architects*

**Informatique** *Abaqus, Autocad, Rhinoceros, Circe Maat, Pascal, Matlab.*

**Langues** Français : Bilingue, Anglais : Courant, Arabe : langue maternelle

**Centres d'intérêt** : *Lecture, natation (Champion de Beyrouth en 1996), musculation, danse orientale et salsa*

## **Remerciements**

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont rassemblé leurs efforts et donné de leur temps pour l'aboutissement de cette thèse, ce qui n'aurait jamais été possible sans leur soutien.*

*Nous exprimons notre très profonde gratitude à Monsieur le professeur Belkacem OULD BOUAMAMA qui m'a profondément guidé à travers ses analyses critiques et ses commentaires attentionnés, en organisant les méthodes et en m'offrant de précieuses suggestions pour aboutir à mes fins. De par ses compétences et ses conseils, il a toujours su nous orienter et nous soutenir durant tout le stage. Sa grandeur d'âme et la qualité de ses rapports humains nous ont été d'un grand réconfort.*

*Bien entendu, je remercie vivement Monsieur le professeur Christophe SUEUR, qui a tout d'abord suscité mon intérêt en ce qui concerne les analyses structurelles en complément de ses multiples conseils ainsi que sa volonté de m'avoir aidé afin de résoudre les problèmes les plus délicats à travers son attitude posée, ce qui a adouci le chemin rugueux à mon égard.*

*Nous remercions vivement Monsieur Arun KUMAR SAMANTARY pour nous avoir aidé dans l'informatisation des capsules sous SYMBOLS 2000.*

*Hommage à Madame Geneviève DAUPHIN TANGUY, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et responsable de l'équipe Bond graph du LAGIS, pour nous avoir soutenu tout au long de ces trois années. Qu'elle trouve ici notre profonde amitié pour la bienveillance et la gentillesse qu'elle nous a toujours témoignées.*

*Nous sommes enfin très reconnaissant envers les membres du jury et plus précisément : Monsieur Jean BUISSON, Professeur à Supelec, d'avoir accepté de rapporter ma thèse. Monsieur Mustapha OULADSINE, Professeur à l'Université Paule Cézanne Aix Marseille et responsable de l'équipe Automatique des Systèmes Dynamiques Hybrides du LSIS, d'être un rapporteur de notre thèse.*

*Messieurs Nacer M'SIRDI, Professeur à l' Université Paule Cézanne Aix Marseille et Gilles TRYSTRAM, Professeur à l'ENSIA, d'avoir répondu favorablement à notre demande et d'avoir examiné notre thèse.*

*Leur renommée et leurs compétences dans la modélisation, l'automatique et la supervision nous permettent d'avoir un avis très critique sur la démarche de notre thèse et de la mettre en valeur.*

*Merci à ceux qui se sont déplacés, leur présence parmi nous à Lille nous est d'un grand soutien et constitue une grande preuve d'amitié.*

*A niveau personnel, nous remercions vivement Monsieur, Hani EL OSTA, mon père et mon guide spirituel. Nous sommes redevable envers notre famille grandissante (Maman Wafaa, Maman Hannoud, Hajj Mohamed, Ikhti Rana, Khayi Azzouz et sa femme Fatima, Khayi Rabih, Ahbabi Omar, Rola, Aya, Dima sans oublier Hobi Nour) pour avoir fait preuve d'une grande tolérance, dans la consécration de leur temps et de leurs innombrables encouragements. Ils m'ont guidé, soutenu lorsque la tâche s'est avérée pénible, et m'ont fait découvrir la patience qui m'a été très utile tout au long de la recherche.*

# ***Introduction Générale***

## **1. Cadre de la thèse**

Les travaux développés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS) ancien (LAIL), UMR CNRS 8146 au sein de l'équipe « Bond Graph » sous la direction conjointe des Professeurs Belkacem Ould Bouamama et Christophe Sueur, dans le cadre de l'opération transversale "Bond Graph et Surveillance" entre les équipes Bond Graph et SFSD (Sûreté de Fonctionnement des systèmes Dynamiques). Du point de vue scientifique, cette recherche représente une continuité d'un ensemble de travaux développés qui consiste à utiliser l'outil bond graph pour la conception intégrée des systèmes automatisés.

## **2. Objectifs de la thèse**

L'objectif de ce mémoire est de déduire les propriétés structurelles de surveillabilité (aptitude à détecter et isoler les défaillances) des procédés industriels complexes représentés par des modèles bond graph couplés non linéaires.

Pour atteindre cet objectif global, les parties suivantes ont été traitées :

- Représentation vectorielle de la structure d'un modèle bond graph multiénergie et génération formelle et générique de modèles bond graphs linéarisés,
- Surveillabilité des composants, actionneurs et capteurs d'un procédé décrit par des modèles couplés linéarisés
- Conditions de surveillabilité des fautes additives de modèles bond graphs non linéaire basée sur la théorie de la platitude
- Finalisation des algorithmes développés par l'informatisation des procédures de génération de modèles linéarisés et une application à un processus pilote de génération de vapeur.

## **3. Problématique et positionnement**

Les procédés industriels sont caractérisés par l'interconnexion de plusieurs composants mettant en œuvre des phénomènes de nature diverse. Les valeurs numériques des

paramètres ne sont pas toujours disponibles, les relations décrivant les processus peuvent être quelconques (algèbre-différentielles, sous forme de tables,...).

Lors de la conception d'un système automatisé, il est alors important de déduire les propriétés structurelles de surveillabilité, commandabilité, observabilité, sans avoir à connaître les valeurs numériques des paramètres.

L'approche classique consiste à écrire le modèle structurel  $S(F,X,\Theta)$ , où  $F$ ,  $X$  et  $\Theta$  représentent respectivement les contraintes, variables et paramètre du modèle, puis d'analyser le graphe bipartite et la matrice d'incidence associée pour enfin déduire les propriétés de surveillabilité. Cette démarche est complexe car la déduction du modèle, des contraintes et des variables n'est pas systématique pour les processus en génie des procédés.

L'intérêt de la démarche proposée dans cette thèse est d'utiliser une seule représentation, le bond graph et ses propriétés causales et comportementales pour :

- Définir d'une façon systématique les modèles structurels directement par analyse des phénomènes physiques sans écrire les équations,
- Déduire du graphe les propriétés de surveillabilité structurelle,
- Déduire les propriétés de platitude pour l'analyse de la surveillabilité des actionneurs.

Le présent travail est organisé comme suit:

Dans le premier chapitre de ce mémoire quelques définitions sur les concepts de la surveillance et la présentation de l'intérêt des bond graphs à la surveillance sont donnés. La première partie est consacrée à un état de l'art sur la surveillance des processus en génie des procédés par une approche classique et bond graph. La problématique de la surveillance des systèmes thermofluides par bond graph y est ensuite présentée afin de positionner notre travail.

Le deuxième chapitre présente d'abord la représentation vectorielle des pseudo bond graphs multiénergies. Le choix et l'analyse systématique des variables de puissance pour la modélisation par pseudo bond graphs des systèmes thermodynamiques ont été évoqués. Ainsi, afin d'appliquer les méthodes sur l'analyse des bond graphs linéaires (commandabilité, observabilité, surveillabilité), il est proposé dans ce chapitre une méthodologie originale de linéarisation des modèles bond graphs non linéaires rencontrés en génie des procédés. Le modèle global linéarisé peut ainsi être obtenu de façon générique en connectant d'une façon modulaire les modèles BG de chaque composant constituant le système global.

Dans la troisième partie, nous nous intéressons à la conception de modules d'analyse structurelle et de systèmes de surveillance pour les modèles bond graphs multiénergies linéarisés. Ce chapitre est donc consacré à la mise en place de méthodes permettant de définir les conditions de surveillabilité structurelle d'un système thermofluide modélisé par un bond graph multiénergie couplé linéarisé. Les procédures systématiques que nous mettons en œuvre pour la surveillance ne nécessitent pas la génération des Relations de Redondance Analytiques RRAs ou le calcul des indicateurs de fautes.

La diagnosabilité des fautes additives (actionneurs et capteurs) directement à partir du modèle bond graph non linéaire est traitée dans la quatrième partie. Quatre catégories de composants

(actionneurs hydrauliques, actionneurs thermiques, capteurs hydrauliques, capteurs thermiques) ont été distinguées. Pour la surveillabilité des actionneurs d'un système thermofluide, la platitude avec ses aspects surveillance est introduite. L'approche est illustrée par un système thermofluide de trois réservoirs considéré afin d'analyser l'isolabilité de ses actionneurs.

Cette recherche a été finalisée au chapitre 5 par l'informatisation des procédures de linéarisation de modèles bond graphs et une application des méthodes développées pour l'analyse de la surveillabilité d'une partie du site pilote de générateur de vapeur.

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

Enfin un rappel sur la modélisation par bond graphs est considéré en annexe A. L'annexe B est consacrée pour les systèmes en génie des procédés : l'écriture directe des équations d'état linéarisées, la forme des équations d'état non linéaires, l'ordre d'un système thermofluide, ... La nouvelle représentation vectorielle proposée au chapitre 2 a été ensuite exploitée pour la méthode de projection en surveillance. En annexe C sont présentés le schéma technologique ainsi que les modèles bond graphs du site pilote du Générateur de Vapeur (GV).

# Chapitre 1

## ***Pré requis et positionnement***

### **1.1. Introduction**

Afin de mieux introduire et positionner l'apport scientifique personnel de ce travail de recherche, ce chapitre est consacré à un rappel sur les représentations et les propriétés structurelles d'un modèle bond graph. Les notions de base pour la commande et pour la surveillance sont introduites dans ce chapitre. Dans un premier temps, la représentation vectorielle d'un modèle bond graph linéaire est considérée dans le cas monoénergie. Du point de vue commande, les propriétés structurelles (rang, commandabilité, observabilité) sont rappelées. Au niveau surveillance, les terminologies et les différentes méthodes de diagnostic sont définies.

L'outil bond graph, qui a prouvé son efficacité pour construire des modèles de connaissances de systèmes physiques pluridisciplinaires, est aussi un excellent support pour l'étude de la surveillance des modèles. Cependant, peu d'équipes utilisent les bond graphs pour les problèmes de diagnostic, on cite principalement Linkens à l'Université de Sheffield, Vergé (LAAM, CNAM de Paris) et Gawthrop à l'Université de Glasgow. Dans ces travaux, le modèle bond graph est souvent utilisé pour déterminer d'autres formes de représentation des systèmes permettant ainsi l'utilisation des méthodes classiques (schéma bloc *Marrison & Gawthrop (1991)*, *Lucas & Evard (1993)*), étude de l'observabilité pour décider ensuite le nombre, la position des capteurs et des actionneurs défaillants *Vergé & Jaume (1994)*. On peut aussi citer les travaux récents sur le diagnostic des systèmes à l'aide des bond graphs qualitatifs (J. Feenstra de l'Université de Twente Hollande, J. Mosterman de l'Institut de Robotique et de Mécatronique (RFA), ou C. Ghiaus de l'Université du Kansas (USA)).

La démarche de l'équipe Bond Graph du LAGIS consistant 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. Le problème est alors de savoir si des propriétés comme par exemple la commandabilité, l'observabilité ou encore la stabilité, sont ou ne sont pas des propriétés génériques par rapport aux paramètres d'un système, ou autrement dit si elles sont toujours vraies sauf pour des valeurs «particulières» des paramètres *Willems (1986)*. On désigne donc par « propriété structurelle » toute propriété d'un modèle qui ne dépend que du type des éléments qui composent ce modèle et de la manière dont ils sont interconnectés sans utiliser la valeur numérique de leurs paramètres. Cette approche a bien un rapport avec la réalité physique du problème. Les valeurs des paramètres du système (valeur d'une résistance, d'une capacité...)

ne sont jamais connues exactement, sauf pour les valeurs nulles qui expriment l'absence d'interaction. Cette étude paraît bien adaptée pour les modèles en génie des procédés où les valeurs numériques des paramètres ne sont en général pas connues (coefficients d'échange thermique, pertes de charge...).

Ce chapitre est organisé comme suit : après avoir introduit les propriétés structurelles pour les systèmes de commandes linéaires dans la deuxième section, les définitions de base d'un système de surveillance sont rappelées en troisième section. La quatrième section présente la surveillance des systèmes par bond graph. L'approche quantitative pour le diagnostic que nous exploitons dans cette thèse est développée par différentes méthodes (méthode par substitution, méthode par projection et par génération des RRAs). La surveillabilité des actionneurs, des capteurs ainsi que des composants physiques est exploitée. Pour les actionneurs, une méthode directe de diagnosabilité basée sur les propriétés causales est présentée. Une conclusion fait le sujet de la cinquième section.

## 1.2. Analyse structurelle pour des systèmes de commande

Après avoir rappelé quelques concepts et donné les terminologies liées au thème des propriétés structurelles en général, la commandabilité structurelle, l'observabilité structurelle et la surveillabilité seront traités à partir de la modélisation par bond graphs des systèmes linéaires *Sueur & Dauphin-Tanguy (1989)*, *Sueur & Dauphin-Tanguy (1991)*, *Tagina (1995)*. Dans un premier temps, rappelons la représentation vectorielle d'un modèle bond graph permettant d'établir les équations d'état et par conséquent de faire de l'analyse structurelle.

Le bond graph met en évidence à la fois la structure et le comportement du système étudié, il peut être considéré comme une structure de jonction reliée à quatre modules *Rosenberg & Karnopp (1983)*, *Borne et al. (1992)*, *Sueur (1990)* : sources, capteurs, modules dissipatifs et modules de stockage (voir l'annexe A pour des rappels sur la méthodologie bond graph). Cette représentation est connue sous la représentation vectorielle (figure 1.1).

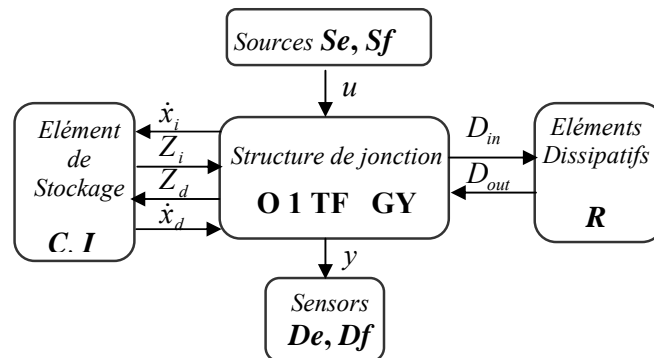


Figure 1.1. Représentation vectorielle d'un modèle BG.

$x$  est le vecteur d'état (composé des moments généralisés  $p$  sur les éléments  $I$  et déplacements généralisés  $q$  sur les éléments  $C$ ) scindé en  $x_i$  et  $x_d$  respectivement associés aux composants en causalité intégrale et dérivée,  $\dot{x}$  est la dérivée par rapport au temps du vecteur d'état (variables  $e$  sur les  $I$  et  $f$  sur les  $C$ ),  $Z$  représente le vecteur complémentaire de  $\dot{x}$  (les variables flux  $f$  sur les éléments  $I$  et les variables effort  $e$  sur les éléments  $C$ ) scindé en  $Z_i$  et  $Z_d$ ,  $u$  le vecteur d'entrée (sources),  $y$  vecteur de sortie (capteurs),  $D_{in}$  le vecteur entrée du champ dissipatif d'énergie " $R$ " et  $D_{out}$  le vecteur sortie du champ dissipatif d'énergie " $R$ ".

La matrice de structure de jonction  $S$  suivante est déduite de la représentation vectorielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \\ y \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Z_i \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \\ u \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$S$  possède  $(n_C + n_S)$  lignes, avec  $n_C$  et  $n_S$  respectivement le nombre de composants ( $I$ ,  $R$  ou  $C$ ), et le nombre de capteurs du système ( $De$  et  $Df$ ). Cette matrice ne dépend pas de la linéarité du système, elle est composée des coefficients 0, -1, +1,  $m$ ,  $r$ ,  $1/m$  et  $1/r$ .  $m$  et  $r$  sont les modules de transfert des éléments transformateur ( $TF$ ) et gyrateur ( $GY$ ).

### 1.2.1. Rang Structurel

La représentation structurelle consiste à décrire les phénomènes physiques à l'aide d'un modèle mathématique ou graphique, où les termes non nuls qui représentent les relations entre les différentes variables sont décrites sans préciser leur valeur numérique. Différentes méthodes, liées au type de représentation, ont été utilisées pour étudier les propriétés structurelles de systèmes dynamiques *Lin (1974)*, *Perelson & Oster (1976)*. A une matrice  $A$ , on peut associer sa matrice de structure  $[A]$ . Cette matrice est obtenue en remplaçant chaque élément de la matrice  $A$  par \*,  $L$ , 1, ... Ceci repose sur l'hypothèse que tous les éléments de la matrice sont indépendants.

Le rang d'une matrice de structure  $[A]$  est égal au rang maximal de la matrice  $A$ , pour des valeurs quelconques des éléments de la matrice. Le rang structurel d'une matrice  $A$  carrée, est égal au rang de la matrice de structure  $[A]$  associé à  $A$ ; il est noté  $\text{rang}_s [A]$ . Cette notion conduit à une majoration du rang réel.

L'exemple donné ci dessous illustre cette majoration. En effet, la matrice d'état d'un réseau électrique est donnée par :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_1} & \frac{R}{L_2} \\ \frac{R}{L_1} & -\frac{R}{L_2} \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} * & * \\ * & * \end{bmatrix}$$

On voit bien que  $\text{rang}_s[A]=2$  alors que le rang réel  $\text{rang}(A)=1$ .

#### *Propriétés Structurelles à Partir d'un Modèle BG*

La structure de jonction d'un modèle bond-graph contient les informations sur le type des éléments constituant le système et sur la façon dont ils sont interconnectés, quelle que soit la valeur numérique des paramètres. L'utilisation de cet outil pour caractériser des propriétés permet d'obtenir des résultats pratiquement toujours égaux aux résultats réels.

Dans le cadre d'une étude graphique du rang<sub>s</sub>[A], on rappelle que l'ordre du modèle  $n$  est égal au nombre d'éléments  $I$  et  $C$  qui admettent une causalité intégrale quand on affecte une causalité intégrale au bond graph.

**Définition 1.** (*Lien d'information*) Un lien d'information est un lien ne transportant pas de puissance, il est ainsi représenté par une flèche entière pour être distingué d'un lien BG (lien de puissance représenté par une demi-flèche).

**Hypothèse 1.** On ne considère que les modèles BGs ne comportant pas de liens d'information.

- Aucun élément en causalité dérivée n'est directement lié avec les entrées et les sorties dans le modèle initial.
- La structure de jonction linéaire est solvable, c'est à dire que les boucles disjointes et non disjointes sont solvables Rosenberg & Andry (1979).

**Théorème 1.** Sueur & Dauphin Tanguy (1991) Le rang<sub>s</sub>[A] noté  $q$  représente le nombre de valeurs propres non nulles de la matrice  $A$  du modèle et on peut écrire:

$$q = n - k \quad (1.2)$$

où  $k$  est égal au nombre de modes nuls et représente dans le cadre d'une étude graphique le nombre de  $I$  et  $C$  restant en causalité intégrale quand une causalité dérivée est appliquée au bond graph. Il est aussi défini comme le rang bond graph « rang-BG ».

## 1.2.2. Commandabilité/ Observabilité Structurelle

Un modèle  $(A, B)$  décrit par une équation d'état est commandable en état Ssi :

$$\text{Rang} [B, AB, \dots, A^{n-1}B] = n \quad (1.3)$$

Pour la commandabilité en sortie on pourra se rapporter par exemple à Rahmani et al. (1997).

Il est reconnu que la structure d'un système est un élément clef dans la recherche de loi de commande, il est ainsi intéressant de définir la commandabilité structurelle.

### 1.2.2.1. Commandabilité structurelle

Une classe de systèmes représentée par la matrice de structure  $[A B]$  est dite structurellement commandable s'il existe au moins une réalisation  $(A, B)$  commandable.

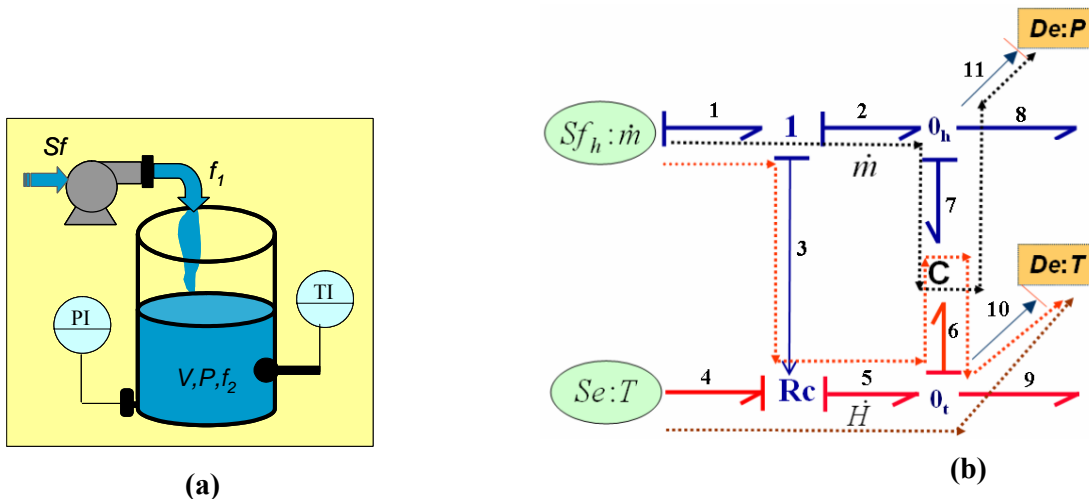
Pour pouvoir illustrer cette notion sur un modèle BG, définissons d'abord la notion de chemin causal.

**Définition 2.** (*Chemin causal*) Un chemin causal est une alternance de liens et d'éléments  $(R, C, I)$  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 3.** Rimaux (1995) (*Chemin causal généralisé*) Un chemin causal généralisé est un chemin causal qui peut traverser les liens de puissance et les liens d'information ou les deux. Le chemin causal généralisé est propre s'il ne contient que des liens de puissance. Il est impropre s'il contient au moins un lien d'information.

**Exemple 1.2.1.** Considérons le système thermofluide en régime sous saturé donné par sa représentation symbolique sur le schéma 1.2 (a). Comme nous allons voir au chapitre 2, le réservoir est modélisé par un 2-ports **C** et la pompe par une source thermofluide. Le modèle bond graph correspondant montré par la figure 1.2 (b) présente un lien d'information (lien 3), ce lien d'information représente le couplage des énergies hydraulique et thermique : en effet, le flux thermique ( $\dot{H}$ ) dépend du flux hydraulique ( $\dot{m}$ ). On est en présence de deux capteurs d'effort (un capteur de pression  $De: P$  et un capteur de température  $De: T$ ) et de deux actionneurs hydraulique  $Sf_h : \dot{m}$  et thermique  $Se : T$ .

- Le chemin causal  $Sf_h - De: T$  passe par un lien d'information et donc c'est un chemin causal généralisé : 1 - 3 - 5 - 6 - C - 6 - 10 -  $De: T$ .
- Le chemin causal  $Sf_h - De: P$  ne contient pas de lien d'information, c'est un chemin causal généralisé propre ou un chemin causal tout court : 1 - 2 - 7 - C - 7 - 11 -  $De: P$ .



**Figure 1.2.** Chemins causaux généralisés.

Le lien 3 montre que le flux d'enthalpie  $\dot{H}$  dépend du débit massique  $\dot{m}$  (lien 1). Si le modèle est commandable, ces chemins signifieront que la variable hydraulique « la pression » ainsi que la variable thermique « la température » du réservoir sont commandables par la source de flux débit  $Sf_h : \dot{m}$ .

Soit un modèle BG contenant  $m$  sources et  $p$  capteurs, on associe à ce modèle la matrice de structure  $[A B]$  où  $A$  et  $B$  sont calculées à partir du BG, le théorème suivant peut être énoncé :

**Théorème 2.** Sueur & Dauphin-Tanguy (1989) Un modèle BG linéaire caractérisé par la matrice de structure  $[A B]$  de dimension  $n.(n + m)$  est structurellement commandable Ssi:

- le modèle est atteignable, c à d tous les éléments dynamiques  $I$  et  $C$  en causalité intégrale dans le bond-graph en causalité intégrale préférentielle sont causalement connectés à au moins une source indépendante par des chemins causaux.
- le rang structurel de  $[A \ B]$  est égal à  $n$ .

On a vu précédemment comment déterminer le rang structurel de  $[A]$ . Une extension de cette procédure permet facilement de déterminer de manière purement graphique le rang structurel de  $[A \ B]$ .

### 1.2.2.2. Observabilité structurelle

Un modèle BG caractérisé par  $(C, A)$  est observable Ssi  $\text{rang}_{-s} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n$

La matrice de structure est  $\begin{bmatrix} C \\ A \end{bmatrix}$  ou  $\begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix}$  de dimension  $(n + p).n$ .

**Théorème 3.** *Sueur & Dauphin-Tanguy (1989) Un modèle BG caractérisé par la matrice de structure  $\begin{bmatrix} C \\ A \end{bmatrix}$  est structurellement observable si et seulement si les 2 conditions suivantes sont vérifiées :*

*-les états sont atteignables, c à d tous les éléments dynamiques  $I$  et  $C$  en causalité intégrale dans le bond-graph en causalité intégrale préférentielle sont causalement connectés à toutes les détecteurs indépendants par des chemins causaux.*

*-le rang structurel de  $\begin{bmatrix} C \\ A \end{bmatrix}$  est  $n$ .*

**Hypothèse 2.** *On considère que le modèle BG en causalité dérivée ne contient pas de boucle de causalité non solvable, c à d, des boucles causales de gain 1.*

**Théorème 4.** *Sueur & Dauphin-Tanguy (1991) (commandabilité/ observabilité structurelle) Un modèle bond-graph est **structurellement commandable** (respectivement **observable**) Ssi:*

**(a)** *le modèle est atteignable, c à d tous les éléments dynamiques  $C$  et  $I$  en causalité intégrale dans le bond graph en causalité intégrale préférentielle sont causalement connectés à au moins une source de commande indépendante (respectivement un capteur réel) par des chemins causaux,*

**(b)** *Tous les éléments  $I$  et  $C$  admettent une causalité dérivée lors de l'application de la causalité dérivée sur le modèle bond graph et dualisation si nécessaire des sources de commande indépendantes (respectivement les capteurs réels) afin de mettre les éléments  $C$  et  $I$  restant en causalité intégrale, en causalité dérivée.*

Ces propriétés structurelles ont été étendues pour les bond graphs à liens d'information *Rimaux (1995)*.

On retrouve ces notions structurelles sur les di-graphes *Lin (1974)*, *Schiels & Pearson (1976)*, *Lin (1986)*, *Mayeda (1981)*, *Davison (1977)*, *Schizas (1981)*, *Schizas & Evans (1981)* ou sur les graphes bi-partis *Assas (2002)*.

### **1.3. Définitions de base d'un système de surveillance**

Afin que les pannes puissent être traitées le plus rapidement possible, deux types d'information sont à fournir à l'opérateur de supervision. Le premier concerne le niveau *FDI (Fault Detection and Isolation)*, qui consiste à détecter et isoler les défaillances qui peuvent survenir sur l'installation afin de pouvoir diagnostiquer précisément l'origine de ces pannes *Staroswiecki (1992)*, *Staroswiecki (1994)*. Le deuxième niveau concerne la commande tolérante aux fautes *FTC (Fault Tolerant Control)*. Cette étape indique les moyens de continuer à conduire le processus en présence de défaillances. La mise en œuvre de cette étape permet la reconfiguration du système ou la mise en œuvre de lois de commande tolérantes aux fautes.

Afin d'éviter les terminologies différentes dans les applications industrielles de diagnostic, nous donnons dans ce paragraphe quelques définitions d'après ce qui ressort des tendances actuelles en matière de normalisation:

#### **1.3.1. Terminologies**

##### ***Processus Industriel***

La notion de processus recouvre des secteurs industriels très variés. Au sens très large, un processus assure la fabrication d'un produit ou fournit un service *Zwingelstein (1995)*. C'est un assemblage fonctionnel de composants technologiques associés les uns aux autres de façon à former une entité unique accomplissant ou pouvant accomplir une activité clairement définie (i.e. colonne de distillation, générateur de vapeur,...).

##### ***Composant Industriel***

Un composant est un organe technologique représentant une partie du processus industriel (pompe, vanne, conduite, ...).

##### ***P.I.D (Piping and Instrumentation Diagrams)***

Un *P.I.D* définit un Plan des Instruments Détaillés ou un diagramme d'acheminement et d'instrumentation. Il comprend les outils d'agencement général destinés au positionnement et à la localisation des équipements, à la création et la gestion des lignes d'acheminement et à la création et la gestion des boucles d'instrumentation et de contrôle. Ce diagramme est utilisé pour une description visuelle de l'architecture du processus. Il utilise (selon des normes ISO) des symboles pour représenter les composants technologiques et des lignes pour leur connexion. Les entrées et sorties peuvent représenter des flux d'énergies (des variables de puissance comme débit massique, pression,...) pour les composants technologiques et des flux d'information pour les capteurs et les correcteurs.

## **Défaut**

Le terme faute ou défaut est généralement défini comme une imperfection physique liée à la conception ou la mise en œuvre du dispositif. Un défaut peut rester caché pendant un certain temps avant de donner lieu à une défaillance *Iserman & Balle (1997)*.

### **Faute ou Défaillance**

La faute ou la défaillance concerne la modification suffisante et permanente des caractéristiques physiques d'un système ou d'un composant pour qu'une fonction requise ne puisse plus être assurée dans les conditions prévues *Rouchouse (1992), Iserman & Balle (1997)*. Les défaillances sont classées selon leur origine en :

**Défaillances capteur.** *Ecart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure.*

**Défaillances d'actionneur.** *Incohérence entre les commandes et la sortie (la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique).*

**Défaillances 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 partiel d'une conduite, ..).*

**Défaillances du contrôleur.** *Ecart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.*

## **Panne**

La panne est une interruption permanente de la capacité du système à réaliser une fonction requise sous des conditions de fonctionnement spécifiées.

## **Résidu**

Un résidu ou indicateur de faute exprime l'incohérence entre les informations disponibles et les informations théoriques fournies par un modèle (supposées décrire correctement le processus).

## **Fiabilité**

C'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission pendant une période donnée et dans des conditions données d'utilisation *Zwingelstein (1995), Rouchouse (1992)*.

## **Disponibilité**

C'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite *Zwingelstein (1995), Rouchouse (1992)*.

Selon ces définitions, en concevant un algorithme de surveillance il faut prendre en compte les objectifs et les performances attendues: que veut-on surveiller (quelle partie du processus) ? Quelles sont les défaillances concernées et comment les définir ?

### 1.3.2. Les différentes approches de la surveillance

Les travaux de recherche sur le diagnostic ont mobilisé ces dernières années une large communauté de chercheurs dans des domaines différents. Les premiers travaux sur le diagnostic proviennent des recherches dans le domaine médical par une application de systèmes experts en intelligence artificielle. *Shortliffe (1974)* expose un système de diagnostic de maladies du sang où la connaissance représente l'expertise qu'a pu acquérir le médecin sur les relations qui existent entre les symptômes observés et les causes de dysfonctionnement du système à diagnostiquer (le malade). De tels systèmes experts ont été plus tard exploités pour la supervision des hauts fourneaux de Sollac *Frydman et al. (2001)*.

Les algorithmes de surveillances sont tous basés sur le principe de la redondance des sources d'information (figure 1.3). La redondance est obtenue par comparaison des données réelles issues du processus et des données théoriques fournies par un type de modèle (connaissance a priori). La comparaison des données réelles (transmises par les capteurs) et celles théoriques (fournies par une connaissance a priori sur le système) permet de vérifier que l'information obtenue à un instant donné reste conforme à des normes de fonctionnement normal (ou dans des limites fixées de tolérance). Cette étape met obligatoirement en oeuvre des banques de données contenant tous les modes de fonctionnement. On distingue deux étapes, une phase de détection de l'alarme et une phase de décision afin d'une part de décider de l'existence ou non de l'alarme et de localiser la défaillance d'autre part.

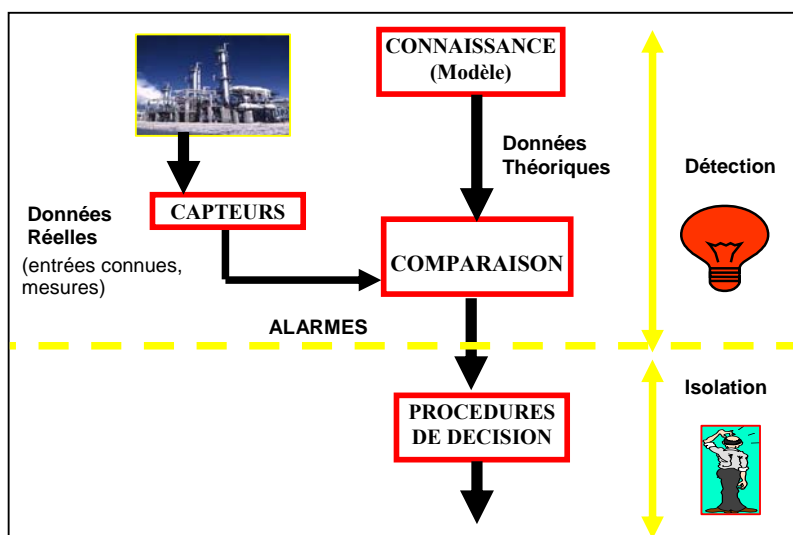


Figure 1.3. Les étapes de la procédure du diagnostic.

La détection consiste à décider entre deux hypothèses  $H_0$  (le système est en mode de fonctionnement normal) et  $H_1$  (le système est en mode de fonctionnement anormal ou défaillant). Elle est donc obtenue en testant la cohérence entre le fonctionnement réel avec ce qu'il devrait être sous l'hypothèse de fonctionnement normal (cela implique que l'on dispose d'un modèle du fonctionnement normal obtenu par apprentissage ou d'une manière analytique), et que l'on produit une alarme ou un résidu lorsque l'on détecte des différences.

La procédure de décision conduit à définir des seuils qui permettent d'accepter avec un risque raisonnable une non-détection ou une fausse alarme. Si le défaut est "tolérable", le système peut continuer à fonctionner. Si le défaut est conditionnellement tolérable (une pompe est défaillante mais il est possible d'utiliser une autre pompe installée en parallèle), alors le système continuera à fonctionner, mais dans un mode dégradé en attendant qu'une maintenance soit effectuée. Cette partie est traitée par les méthodes de tolérance aux fautes (FTC).

La localisation consiste à comparer le fonctionnement réel du système avec le fonctionnement de celui-ci sous certaines hypothèses de défaillances (ce qui implique de disposer des modèles correspondant à ces systèmes défaillants). Cette étape se déclenche quand la comparaison ne correspond pas à un état normal de fonctionnement caractérisé par un état de référence et que la procédure de décision a indiqué que c'est une vraie alarme. La défaillance est ainsi liée à un sous-ensemble de composants du système surveillé: capteurs, actionneurs, composants, etc. Une fois la faute localisée, il faut alors identifier les causes précises de cette anomalie. On fait alors appel à des signatures répertoriées par les experts et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements. Les maintenances permettant de restaurer les capacités du système de production peuvent être systématiques ou aléatoires, dans ce dernier cas on se base sur les méthodes d'optimisation et d'ordonnancement pour planifier les entretiens ou déterminer les taux de défaillance.

La stratégie de diagnostic et la forme sous laquelle la connaissance est disponible conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance. Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de la connaissance, on distingue deux types d'approches: les méthodes utilisant des modèles opératoires et celles utilisant des modèles de diagnostic (connues souvent sous les méthodes avec ou sans modèle).

### **1.3.2.1 Méthodes sans modèle**

Décrit par un certain nombre de réalisations, les méthodes sans modèle comme l'indique leur nom, ne disposent pas de modèle opératoire. Autrement dit, on ne dispose pas de modèle décrivant le comportement normal et les comportements défaillants du système. Les méthodes utilisées font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de formes *Dubuisson (1990)*, *Denoeux (1997)*, *Boudaoud & Masson (2000)* ou à l'intelligence artificielle *Gentil (1996)*.

La méthode sans modèle est utilisée dans le cas de systèmes complexes traitant des données très variées (analogique, numérique..) ou imprécises (bruit de mesure). L'objectif de la reconnaissance des formes consiste à classer automatiquement des formes dans des modes (classes) connues a priori. Par conséquent, ces techniques doivent connaître a priori tous les états de fonctionnement (normal et en faute).

La conception d'un système de diagnostic sans modèle se déroule en trois phases :

#### **a) Phase d'analyse.**

Cette phase consiste à rassembler toutes les informations existantes sur le processus: les données des différents capteurs, les modèles des dispositifs, l'historique, l'expérience

accumulée. A partir de cette phase doit sortir une définition précise des paramètres à observer ou qui représentent les modes de fonctionnement. Une suite d'observations du même mode ne se trouve pas en un seul point, mais occupe une zone de l'espace des observations. Ceci est dû au bruit inhérent au niveau des différentes mesures.

Il s'agit donc d'associer à chaque forme observée un mode ou une classe. Après avoir représenté les modes par des paramètres significatifs, on essaye d'avoir le maximum de données sur chacun des modes observables; c'est la phase d'apprentissage.

#### ***b) Phase de choix d'un système de détection.***

Les frontières entre les classes sont définies dans cette phase. Un système de décision capable de décider de l'appartenance ou non d'une nouvelle observation à une des classes existantes est créé. De nombreuses solutions servant à définir le système de décision peuvent être retenues *Dubuisson (1990)*. On cite d'une manière non exhaustive les méthodes de discrimination paramétrique avec rejet (supposent la connaissance totale des lois de probabilité régissant les observations et appliquées sous l'hypothèse gaussienne avec estimation des paramètres), les méthodes de discrimination non paramétrique (les lois de probabilité dans chaque classe sont inconnues mais peuvent être estimées par la méthode de *Parzen* ou celle des plus proches voisins), les méthodes se reposant sur le concept de distance (paramétrique ou non) et les méthodes recherchant les équations de frontières (délicate et largement heuristique).

#### ***c) Phase d'exploitation.***

C'est la phase d'implémentation du système de diagnostic afin de proposer une décision pour toute nouvelle observation effectuée. Le système doit adapter sa règle de décision en fonction des nouvelles classes détectées.

### **1.3.2.2. Méthodes avec modèles**

Cette deuxième famille (où se situe d'ailleurs notre contribution) se base sur l'existence de redondance matérielle ou analytique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système. Le principe de redondance consiste à déterminer la valeur des variables par différentes manières et à analyser si les résultats coïncident. La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs afin de mesurer la même variable *Evan & Willcox (1970)*, *Patton (1993)*, *Chow (1980)*. Ces capteurs indiquent en fonctionnement normal la même valeur aux bruits et imprécisions de mesure près. Une duplication des capteurs est nécessaire pour la détection de pannes simples. Cependant la localisation de la défaillance exige un minimum de trois capteurs, on procédera alors à un vote majoritaire. Cette méthode a été largement utilisée dans l'industrie car elle est facile à appliquer et est très fiable, cependant elle est très lourde et coûteuse. De plus elle n'est pas toujours applicable pour des raisons architecturales et matérielles et son champ d'application est limité aux seules défaillances capteurs.

Contrairement à la redondance matérielle, la redondance analytique consiste à trouver des relations entre les variables connues du système (entrées et sorties). Bon nombre de travaux leur sont consacrés, citons les synthèses trouvées dans *Iserman (1984)*, *Frank (1990)*, *Ragot & Maquin (1994)* et le livre pédagogique *Maquin & Ragot (2000)* pour les systèmes linéaires.

Dans ce cas, la génération des résidus peut être réalisée par différentes approches :

- Approche par estimation de paramètres (estimation paramétrique)
- Approche par estimation de l'état (observateur)
- Approche par espace de parité

**a) Approche par estimation de paramètres.**

Les signaux d'entrée et de sorties du système sont utilisés pour estimer les différentes valeurs des paramètres du modèle analytique. Les paramètres du système sont estimés en utilisant des procédures d'identification. Les écarts entre les valeurs estimées et les valeurs de référence constituent les résidus. Lorsque les valeurs nominales ne sont pas connues, une autre approche consiste à les remplacer par des valeurs estimées précédemment. Dans ce cas, l'écart des résidus par rapport à zéro est le résultat des variations de paramètres. Ces écarts sont ensuite analysés par la théorie de décision *Iserman (1984), Iserman & Freyermuth (1991), Basseville et al. (1987), Delemaire et al. (1994)*.

**b) Approche par estimation de l'état.**

C'est l'approche duale à l'estimation des paramètres. Les techniques d'estimation d'état utilisent des données de base brute pour estimer l'état du système  $x(t)$  et par voie de conséquence ses sorties  $y(t)$ . Celles-ci sont comparées aux sorties réelles : tout écart entre la valeur mesurée de la sortie et sa valeur réelle constitue un résidu.

Il existe deux classes d'approches, la première estime d'abord le vecteur d'état (observateur de Luenberger *Luenberger (1971), Frank (1987), Frank (1988)*, filtre de Kalman *Willsky (1976)* puis en déduit l'estimation des sorties par application de l'équation de mesure. L'autre approche utilise des observateurs qui estiment directement les sorties, ou plus généralement toute combinaison des variables d'état dont on connaît le comportement théorique en fonctionnement normal *Beard (1971), Magni & Moyon (1991)*.

**c) Approche par espace de parité.**

Cette approche conduit à une réécriture des équations d'état et de mesure, dans laquelle seules des variables connues (commandes et sorties) sont autorisées à figurer. Dans le cas linéaire, ces équations sont connues par les équations de parité et relations de redondance analytique (*RRAs*) dans le cas le plus général.

Un système est caractérisé par un ensemble de contraintes  $\Phi$  appliquées à ensemble de variables  $V$ .  $V$  représente l'ensemble des variables connues  $K$  et inconnues  $W$  ( $V = K \cup W$ ). La structure conduit à un "digraphe" dont la matrice d'incidence binaire représente les liens entre les variables (connues et inconnues) et les contraintes. Il est montré dans *Declerck (1991)*, que tous les systèmes peuvent être décomposés structurellement par une décomposition canonique en trois sous systèmes : un sous système sous déterminé ayant les contraintes  $\Phi$  et les variables  $V$  avec ( $\dim(V) > \dim(\Phi)$ ), un sous système juste déterminé ( $\dim(V) = \dim(\Phi)$ ) et un sous système sur déterminé ( $\dim(V) < \dim(\Phi)$ ). Ce dernier contient un sous système structurellement juste déterminé et quelques contraintes supplémentaires  $R$  sur les variables de ce sous-système. Ces contraintes, une fois leurs variables estimées en fonction des variables connues forment les propriétés d'invariance du système en état normal (les *RRAs*) sous la forme :

$$\varphi(u(t, t-p), y(t, t-p)) = 0 \quad (1.4)$$

$u$  et  $y$  représentent les commandes et les sorties connues sur une fenêtre temporelle  $[t, t - p]$ . Comme cette égalité n'est jamais vérifiée (le système n'étant jamais dans des conditions de fonctionnement idéal), le vecteur des résidus aura la forme :

$$r = \varphi(u(t, t - p), y(t, t - p)) \quad (1.5)$$

On rappelle qu'un résidu sera cohérent avec le modèle du système s'il est nul ou inférieur à un certain seuil choisi  $\varepsilon$ . Ce test appliqué sur l'ensemble des résidus  $r_i$  conduit à un vecteur binaire cohérent  $C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]$ .  $c_i$  est obtenu comme suit:

$$c_i = 1 \text{ si } r_i > \varepsilon \text{ sinon } c_i = 0$$

Une matrice  $S$  des signatures de pannes est une matrice binaire. Soient  $R$  l'ensemble des RRAs et  $K$  l'ensemble des composants à surveiller, la matrice  $S$  est définie par la relation suivante :

$$\begin{aligned} S: R \times K &\rightarrow \{0, 1\} \\ (r \times k) &\rightarrow S\{r, k\} \end{aligned}$$

avec  $S\{r, k\} = 1$  si et seulement si  $k$  apparaît dans la relation de redondance  $r$ ,  
 $S\{r, k\} = 0$  autrement.

Un « 1 » dans la matrice  $S$  signifie que le résidu associé est directement influencé par la variable connue associée à ce 1, un « 0 » signifie au contraire que la variable donnée n'agit pas sur la structure.

Le mot binaire  $S(OK) = (0, \dots, 0)$  peut être considéré comme la signature booléenne du système en fonctionnement normal. Un mot binaire formé par une colonne de la matrice  $S$  représente la signature de la panne affectant la variable associée à cette colonne. Une défaillance est détectée quand le vecteur binaire cohérent  $C$  devient différent de  $S(OK)$ , la localisation, quant à elle, revient à comparer le vecteur binaire cohérent  $C$  avec les signatures des pannes. Dans le cas d'existence de plusieurs signatures théoriques égales au vecteur de cohérence, il n'est pas possible de localiser la défaillance, on dit de ces défaillances qu'elles sont non localisables *Staroswiecki (1997), Ragot et al. (1997), Magni & Mouyon (1994) Patton & Chen (1991), Kaboré et al. (1999)*. La précision de la localisation dépend fortement du nombre et de la position du capteur au sein du système.

### 1.3.2.3. Modèles hiérarchiques

Dans ce cas, on décrit le processus de diagnostic par une approche fonctionnelle présentée sous forme d'une décomposition structurelle. La modélisation fonctionnelle *Millot (1988), Chittaro et al. (1993), Feliot (1997)* comme l'indique son nom se base sur la fonction du composant (i.e. stocker pour la fonction d'un réservoir,...). La modélisation téléologique, quant à elle, exprime la finalité du composant (la fonction téléologique d'une chaudière est la production de la vapeur). Cette fonction sert un dessein, un projet, un but. Un réservoir peut avoir plusieurs fonctions téléologiques (en fonction de son utilisation et de l'interprétation de l'opérateur) par contre le type de transformation de l'énergie est indépendante de sa fonction.

Cette démarche entraîne une ambiguïté en raison de la subjectivité de la notion de fonction : il existe autant de fonctions que d'opérateurs.

Toutefois quelques travaux *Chittaro et al., (1993), Modarres (1993)* associent des fonctions génériques issues des bond graphs afin de rendre la fonction plus objectives en introduisant les notions d'effort et de flux et les éléments bond graphs ( $R$ ,  $C$  et  $I$ ). Les modèles externes (utilisant la notion de services et de missions associées aux bonds graphs) trouvent aussi un intérêt dans cette approche *Ould Bouamama et al. (2002a)*.

#### 1.4. Surveillance des systèmes par bond graph

D'un point de vue, d'une représentation par une approche bond graph, un système de surveillance peut être illustré par la figure 1.4.

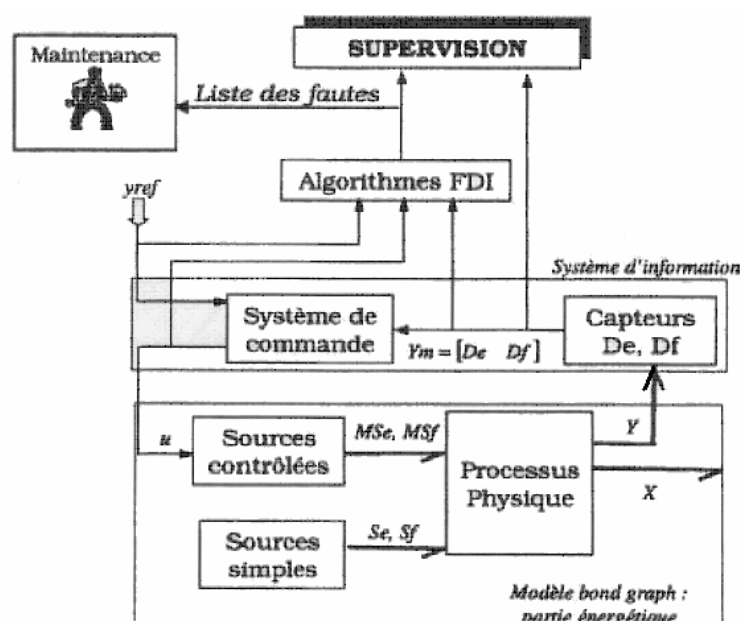


Figure 1.4. Représentation bond graph d'un système de surveillance.

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

Le modèle bond graph représente la partie énergétique du système. Le processus est modélisé généralement par les éléments bond graphs usuels ( $R$ ,  $C$ ,  $I$ , et les jonctions). Les actionneurs (pompe, source thermique, ...) sont modélisés par des sources (d'effort ou/et de flux). Les sources peuvent être simples ( $Se, Sf$ ) ou modulées ( $MSe, MSf$ ), c'est à dire commandées par un signal externe fourni par un contrôleur ou un opérateur. Les capteurs et le système de commande forment le système d'information. Dans le premier système (énergétique), la puissance échangée est représentée par une demi-flèche (un lien de puissance) traduite par les variables d'effort et de flux. Dans le second système (système d'information) la puissance échangée est négligeable, elle est alors représentée

par un lien d'information (flèche) qui est le même utilisé dans les blocs diagrammes classiques.

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

Dans les sections suivantes les différentes approches de FDI par bond graph sont présentées. On distingue principalement deux approches bond graph pour la surveillance des processus: l'approche quantitative et l'approche qualitative.

#### **1.4.1. L'approche qualitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph**

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

Ces modèles qualitatifs sont construits sans aucune considération des paramètres du système. Ils se basent sur des valeurs qualitatives (à la place des valeurs numériques) définies par l'ensemble  $\{[1] [+][0] [-] [-1] [?]\}$  représentant la qualité de la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Les opérateurs sont ainsi qualitatifs, ils peuvent être définis en utilisant les opérateurs des nombres réels :  $\{+, -, \times, \div, =\}$  *Ghiaus (1999)*, *Wang & Linkens (1996)*. On résout alors un système d'équations qualitatives pour déterminer l'origine des défaillances. D'autres études utilisent les graphes causaux temporels pour isoler les pannes en tenant compte de la dynamique (et de son ordre) d'occurrence de la faute *Philippus (2001)*. D'autres auteurs utilisent une analyse qualitative des équations d'état linéaires pour déterminer les causes possibles d'une défaillance *Kohda et al. (1993)*.

L'avantage que présente cette approche est qu'elle ne nécessite pas une connaissance profonde de la structure du système ni des grandeurs numériques des paramètres. Toutefois cette approche devient complexe pour les processus multiénergie et présente d'autres inconvénients comme la non détection des défaillances des capteurs et la difficulté de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures des déviations. *Ghiaus (1999)*.

#### **1.4.2. L'approche quantitative pour le diagnostic en utilisant le bond graph**

Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus et celui du modèle numérique. Contrairement à l'approche qualitative, l'approche quantitative se base sur des lois physiques et nécessite donc une connaissance profonde sur la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Les modèles quelque soient leurs formes (fonction de transfert, équations d'état, ...) sont obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) *Haves et al. (1996)* ou sur la base d'une identification statistique des paramètres *Lee et al. (1996)*, *Frank (1990)*. Depuis 1995 on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance.

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

#### 1.4.2.1. Génération de *RRAs* à partir de modèles *BGs*

Dans le cas linéaire, quelques relations obtenues à partir de la représentation vectorielle d'un modèle bond graph (section 1.2) peuvent être énoncées :

$$\begin{aligned} D_{out} &= LD_{in} \\ Z_i &= H(1/s)\dot{x}_i \\ Z_d &= H'(s)\dot{x}_d \end{aligned} \quad (1.6)$$

$L$ ,  $H'(s)$  et  $H(1/s)$  sont des matrices carrées,  $s$  et  $1/s$  sont les opérateurs de Laplace pour la dérivation et l'intégration par rapport au temps. Dans cette représentation le vecteur  $\dot{x}$  doit être interprété comme un vecteur contenant des variables d'efforts et de flux et non la dérivée temporelle du vecteur  $x$ . Dans le cas d'éléments 1-port, ces matrices sont diagonales et inversibles. Quand le système comporte des éléments multiports, ces matrices ne sont plus diagonales et généralement non inversibles.

Une nouvelle matrice  $M$  est définie à partir de la matrice de structure de jonction  $S$  et les lois d'entrées-sorties de tous les composants. Cette matrice constituant un modèle polynomial du système est définie comme suit :

$$M = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & -I_1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & -I_2 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & 0 & 0 & 0 & -I_4 \\ I_1 & 0 & 0 & 0 & -H(1/s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & -H'(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & -L & 0 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Soit  $V$  le vecteur qui regroupe les différentes variables du bond graph et défini de telle sorte que le produit  $M.V$  est nul :

$$V = [Z_i^t \quad \dot{x}_d^t \quad D_{out}^t \quad u^t \quad \dot{x}_i^t \quad Z_d^t \quad D_{in}^t \quad y^t]^t$$

La structure est l'expression de la présence ou de l'absence de relations entre les variables. L'existence de relations est caractérisée par un terme non nul dans la matrice  $M$ . Ainsi cette matrice représente un ensemble de  $(2n_c + n_s)$  équations déterminant les  $2n_c$  inconnues.

#### 1.4.2.1.1. Méthode par substitution.

La matrice  $M$  peut être scindée en deux sous matrices  $M_C$  et  $M_W$  correspondant respectivement aux variables connues  $C$  et inconnues  $W$ .

$$M_W = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & -I_1 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & -I_2 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & -I_3 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & 0 & 0 & 0 \\ I_1 & 0 & 0 & -H(1/s) & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & -H'(s) & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & -L \end{bmatrix} \quad M_C = \begin{bmatrix} S_{14} & 0 \\ S_{24} & 0 \\ S_{34} & 0 \\ S_{44} & -I_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

De cette façon on a :

$$M_C \cdot C + M_W \cdot W = 0 \quad (1.9)$$

L'approche par substitution consiste à extraire une sous matrice  $M_{wi}$  inversible (on note par  $M_{wr}$  le reste de la matrice) et de l'utiliser pour la détermination de l'ensemble des variables inconnues. Un ensemble de relations de redondance analytique est obtenu à partir de l'ensemble des lignes restantes :

$$[-M_{wr}(M_{wi})^{-1}M_{ci} + M_{cr}] \cdot C = 0 \quad (1.10)$$

Le choix de la sous matrice  $M_{wi}$  n'est pas unique et conduit chaque fois à une forme particulière des relations de redondance.

Cette méthode se complique en non linéaire ( il y a des contraintes sur la détermination d'une variable à partir d'une fonction (*le couplage*) à cause de la non linéarité des composants *Cassar et al. (1994)*). En fait, la causalité des composants non linéaires est dictée par la fonction régissant le comportement du composant.

#### 1.4.2.1.2. Méthode par projection.

A partir de la matrice  $M$ , on cherche une matrice polynomiale  $N$  telle que  $N \cdot M_W = 0$ . Il est donc possible de générer  $n_s$  relations de redondance indépendantes décrites par :  $N \cdot M_C \cdot C = 0$ .

Le système est sur-déterminé si  $n_s \geq 1$  (*la sur-détermination représente la dimension du sous-espace vectoriel orthogonal à  $M_W$* ). Cette matrice n'est pas unique puisque toute matrice obtenue par combinaison linéaire des lignes de  $N$  répond à la question. Ce résultat a été démontré dans *Gertler et Luo (1989)* en utilisant une approche par espace d'état. En non linéaire ce produit est celui des opérateurs  $N \circ M_W = 0$  ( $\circ$  opérateur composition) et donc difficile à réaliser.

**Remarque 1.4.1.** *Le problème de recherche d'une matrice polynomiale  $N$  orthogonale à une matrice  $M_W$  a été étudié dans *Staroswiecki et al. (1990)*. La méthode proposée pour la construction de  $N$  repose sur un algorithme itératif alors que l'approche exposée ici donne*

directement la matrice de projection grâce à la forme particulière du modèle mathématique associé à un bond graph; on peut ainsi choisir une sous matrice de manière à optimiser des critères associés à la qualité de la procédure de surveillance: des propriétés directionnelles Gertler & Monajemy (1993), Gertler & Singer (1990) des propriétés de robustesse Patton (1993), des propriétés de sensibilité Staroswiecki et al. (1993). L'expression de la matrice de transfert est un cas particulier de la méthode de projection. L'approche par substitution est un cas particulier de l'approche par projection Cocquempot (1993).

#### 1.4.2.1.3. Génération des RRAs par parcours des chemins causaux

Tagina (1995) propose une méthode pour générer des RRAs à partir du modèle bond graph linéaire monoénergie en suivant les chemins causaux. Au niveau de la structure de jonction (jonctions 0, 1, TF et GY), plusieurs relations entre les différents flux et effort peuvent être établies. A partir de la somme algébrique des flux sur une jonction 0 (par exemple) et en exprimant les variables qui y figurent en fonction des variables connues, on aboutit à des relations de redondance analytique. Le but est d'étudier tous les chemins causaux relatifs à la jonction considérée jusqu'aux sources et aux capteurs. La méthode est intéressante car elle génère autant de relations que de jonctions. Le point de départ peut être aussi les éléments ( $R$ ,  $C$ ,  $I$ ). Cette méthode ne nécessite pas le calcul du déterminant du bond graph, ainsi que des gains des différentes boucles causales. Cette méthode a été étendue par Busson (2002) puis sur les modèles couplés puis développée et appliquée pour la conception en ligne de systèmes de supervision Ould Bouamama et al. (2005a).

### 1.4.3. Surveillabilité directe à partir du modèle bond-graph linéaire

Le but de ce paragraphe est de rappeler une méthode pour distinguer les variables surveillables des variables non surveillables à partir d'un bond graph sans générer les relations de redondance analytique RRAs ou les signatures des fautes.

#### 1.4.3.1. Surveillabilité des capteurs

Si le nombre de capteurs est supérieur à 1 alors toutes les sorties des capteurs sont surveillables Tagina et al. (1995a), Tagina et al. (1995b). En effet, on aura autant de relations de redondance analytique indépendantes que de capteurs.

#### 1.4.3.2. Surveillabilité des sources de contrôle

Etant donnés  $P$  capteurs  $D_i$  ( $i = 1 \dots P$ ) et  $n$  sources de contrôle  $S_j$  ( $j = 1 \dots n$ ), la matrice de transfert  $M(s)$  est :

$$M(s) = [m_{ij}] \quad (i = 1 \dots P, j = 1 \dots n)$$

La faute affectant la source  $S_k$  est surveillable (détectable et isolable) Ssi : le vecteur  $[m_{1k} \dots m_{pk}]$  est non nul et n'est proportionnel à aucun vecteur colonne  $[m_{1i} \dots m_{pi}]$  de la matrice de transfert  $M(s)$  ( $i \neq k$ ) Tagina (1995).

Une interprétation bond graph peut être donnée :

Deux sources de contrôle  $S_j$  et  $S_k$  ne sont pas surveillables Ssi :

1. le chemin causal liant la source  $S_j$  à n'importe quel capteur  $D_i$  contient le chemin causal parcouru pour aller de la source  $S_k$  au même capteur  $D_i$  (ou inversement)
2. les éléments du chemin  $S_k-D_i$  ne figurant pas dans  $S_j-D_i$  n'apparaissent dans aucune boucle causale quand on enlève le chemin  $S_j-D_i$  du bond graph.

Ces propositions données pour des modèles bond graphs monoénergies et avec des monoports *Tagina (1995)* sont étendues dans ce travail aux systèmes thermodynamiques multiports linéarisés.

**Exemple 1.4.1.** Considérons le système thermofluide en régime sous saturé donné par sa représentation symbolique sur le schéma 1.2 (a), on s'intéresse à la surveillabilité des deux actionneurs hydraulique  $Sf_h : \dot{m}$  et thermique  $Se : T$ . On suppose que les multiports  $\mathbf{R}_C$  et  $\mathbf{C}$  sont linéaires, la proposition précédente peut alors être appliquée. Les différents chemins causaux liants les sources et les capteurs sont :

- $Sf_h - De: T : 1 - 3 - 5 - 6 - C - 6 - 10 - De: T$ .
- $Sf_h - De: P : 1 - 2 - 7 - C - 7 - 11 - De: P$ .
- $Se - De: T : 4 - 5 - 6 - C - 6 - 10 - De: T$ .
- $Se - De: P : \phi$  (ensemble vide).

En utilisant les deux capteurs hydraulique ( $De: P$ ) et thermique ( $De: T$ ), les deux sources  $Sf_h : \dot{m}$  et  $Se : T$  deviennent surveillables : le chemin causal liant la source  $Se$  au capteur de pression ( $De: P$ ) ne contient pas le chemin causal liant la source  $Sf_h$  au même capteur.

Cependant, l'utilisation du théorème précédent ne permet pas de déduire sur la surveillabilité des deux sources de contrôle affectées simultanément par des défaillances. Pour les défaillances multiples ou simultanées, un théorème basé sur l'inversibilité d'un modèle BG est proposé au chapitre 3.

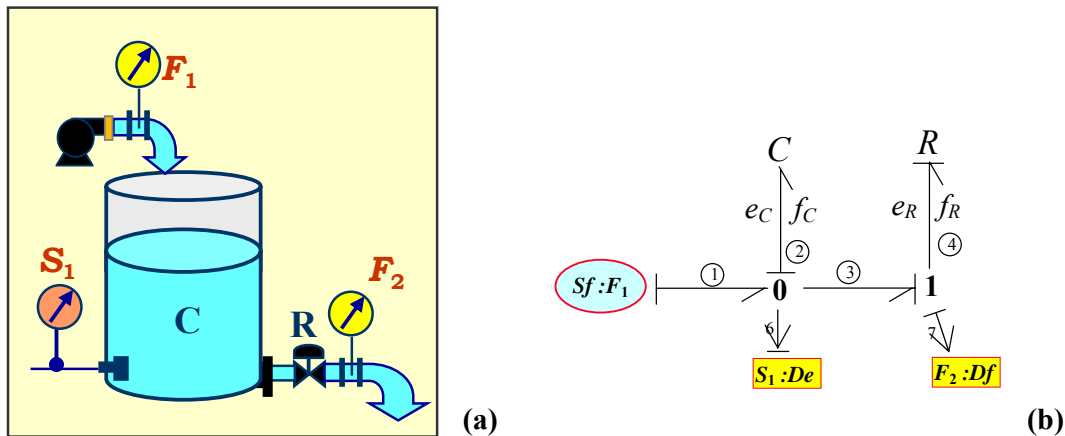
#### 1.4.4. Surveillance des composants

Deux méthodes existent pour pouvoir surveiller les composants pour des systèmes linéaires modélisés par bond graph. La méthode repose sur l'estimation des paramètres. L'estimation peut utiliser aussi bien un support matériel qu'un support logiciel (bond graph bicausal). Le but est d'estimer la valeur du paramètre caractérisant le composant. Pour ce faire on utilise la relation constitutive au niveau du composant. Il existe principalement deux méthodes. La première se base sur la mesure directe de l'entrée et de la sortie de ce composant. Elle utilise un support essentiellement matériel, composé de deux capteurs (un de flux et un d'effort) pour chaque composant à surveiller. On compare ensuite les valeurs mesurées avec les valeurs déduites de la caractéristique du composant. Le composant présentant un écart est défaillant. Cette méthode est fiable et facile à appliquer mais par contre très encombrante et très coûteuse. La seconde méthode, basée essentiellement sur un support logiciel, utilise la notion de bond graph bicausal pour exprimer les variables généralisées du composant en fonction des variables connues du système. Le bond graph bicausal permet de se servir du reste du modèle pour déterminer les valeurs d'effort et de flux, sans avoir à passer

par la caractéristique du composant *Gawthrop (1995)*. Parfois, pour éviter des boucles de causalité, qui posent des problèmes de parcours de chemins ainsi que des problèmes de simulation, il faut opter pour un regroupement des composants pour constituer un "macro-composant" ou une "impédance" composée *Moseik et al. (1996), Moseik (2000)*. Dans ce cas, une analyse préalable permet de savoir s'il faut utiliser le modèle tel qu'il est ou bien le modifier. L'un des problèmes les plus fréquemment rencontrés est la causalité des composants. En effet, cette causalité peut engendrer des situations difficiles à résoudre sans faire appel à des calculs plus complexes, tels que la factorisation. Dans ce cas la solution est de regrouper les composants incriminés.

Actuellement les méthodes de détection des défaillances au niveau des composants qui exploitent la notion de relation de redondance analytique et la construction des signatures des différentes pannes probables sont complexes. De plus, seuls les défauts paramétriques (modifiant la valeur d'un (des) paramètre(s)) peuvent être considérées.

**Exemple 1.4.2.** Considérons le système hydraulique donné par sa représentation symbolique sur le schéma 1.5 (a) et son modèle BG (schéma 1.5 (b)). Dans cet exemple on distingue deux détecteurs :  $S_1$  un détecteur d'effort  $De$  permettant la mesure de la pression (liée à la masse stockée dans le réservoir  $C$ ),  $F_2$  un détecteur de flux  $Df$  mesurant le débit au niveau de la vanne  $R$ . La source  $Sf : F_1$  représente le débit délivré par la pompe. Les capteurs sont supposés être idéaux et sont modélisés par des liens d'information indiquant qu'aucune puissance n'est transférée. On considère dans ce modèle la pression relative (*pression absolue - pression atmosphérique*), la source de pression atmosphérique n'est donc pas représentée sur le modèle BG.



**Figure 1.5.** Schéma de l'installation (a), le modèle BG (b).

En régime laminaire, le modèle BG est linéaire. L'écriture des équations constitutives au niveau des jonctions nous donne :

$$\text{jonction 0 : } Sf - f_R - f_C = 0$$

$$\text{jonction 1 : } e_R - e_C = 0$$

La pression au niveau du réservoir est mesurée par le capteur d'effort  $S_1$ . En parcourant les chemins causaux pour éliminer les variables inconnues présentes dans les équations de structure ci-dessus, les résidus suivants sont déduits :

$$r_1 = F_1 - \frac{1}{R} \cdot S_1 - C \cdot \frac{dS_1}{dt} \approx 0$$

$$r_2 = R \cdot F_2 - S_1 \approx 0$$

Les lignes de la matrice booléenne de signature des fautes sont associées à l'ensemble des résidus  $r_i$  ( $i = 1,2$ ) et les colonnes aux variables des éventuelles fautes  $f_j$  ( $j = 1..5$ ).  $S_{ij} = 1(0)$  si le résidu  $i$  est sensible (non sensible) à la faute  $j$ , on obtient le tableau de signature 1.1.

$F_1$  et  $C$  ont la même signature  $S(F_1) = S(C) = (1, 0)^t$  et par conséquent une faute au niveau de la pompe et une faute paramétrique au niveau du réservoir (déformation du réservoir par exemple) ne sont pas surveillables. Par contre, deux fautes paramétriques au niveau de la vanne (vanne bloquée) et au niveau du réservoir sont surveillables ( $S(R) \neq S(C)$ ).

	$f_1: F_1$	$f_2: S_1$	$f_3: C$	$f_4: R$	$f_5: F_2$
$r_1$	1	1	1	1	0
$r_2$	0	1	0	1	1

**Tableau 1.1.** Matrice de signatures des fautes.

Toutefois, quelques travaux *Busson (2002)* permettent de distinguer les défaillances physiques de type " fuite de matière " ou d'énergie en se basant sur les RRAs déduites des équations de balance des jonctions " 0 ".

**Proposition 1.** *Les résidus déduits de la relation de structure de la jonction de type 0 hydraulique (respectivement thermique) seront sensibles à tout type de défaillance de type fuite de matière (respectivement thermique) Busson (2002)*

**Proposition 2.** *Les résidus déduits de la relation de structure de la jonction de type 1 hydraulique (respectivement thermique) seront sensibles aux défaillances de type bouchage de matière (respectivement thermique ou calorifugeage) Busson (2002)*

Notre but est de trouver une méthode qui permet la détection des défaillances au niveau des composants à partir d'un modèle bond graph et ceci d'une façon directe, i.e, sans la génération des signatures des pannes ni de RRAs.

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

La complexité des systèmes physiques rend nécessaire l'automatisation des procédures d'analyse structurelle.

Les propriétés structurelles et causales du modèle BG permettant une déduction systématique des modèles ont été utilisées pour la génération automatique des RRAs. Dans *Moseik (2000)* les Procédures graphiques pour l'analyse structurelle de systèmes physiques modélisés par bond graph sont présentées. Dans ce cas, les problèmes liés aux boucles algébriques et à la génération des RRAs à partir du bond graph ont été traités *Moseik et al. (1996)*. Le travail

développé dans *Haffaf (2000)* concerne la contribution à la résolution des problèmes combinatoires dans un bond-graph par la théorie des matroïdes. Ce travail permet l'amélioration de l'outil d'analyse à l'aide des techniques d'optimisation et de la théorie de matroïdes (issue de la généralisation de la théorie des graphes et de l'algèbre linéaire). Il résout le problème combinatoire inhérent au calcul des chemins causaux, plus précisément à l'ensemble de chemins entre tout couple d'éléments.

Enfin des travaux originaux ont été développés ces dernières années au sein de l'opération transversale "BG et surveillance" sur la génération des RRAs et la conception des systèmes de supervision à l'aide de l'outil BG. Un outil logiciel "Mod Build" a été développé, il teste à des procédés chimiques et pétrochimiques dans le cadre du projet Européen CHEM\* *Ould Bouamama et al. (2005a et b)*.

## **1.5. Positionnement & Apport Scientifique**

Cette thèse traite les process complexes à risque pour leur analyse et l'étude de leur surveillabilité. Les méthodes de surveillance développées font parties des méthodes à base de modèles. En égard aux travaux existants, la contribution de cette thèse concernant la représentation vectorielle, la modélisation des processus thermofluides, l'analyse et la surveillance des procédés énergétiques se situe à plusieurs niveaux :

- Proposition d'une représentation vectorielle pour les processus en génie des procédés,
- Modélisation des systèmes thermodynamiques, le modèle BG à surveiller est établi en reliant d'une façon modulaire le modèle BG générique de chaque composant,
- Génération systématique du modèle dynamique linéarisé d'une installation donnée directement à partir de son PID,
- Analyse structurelle des bond graphs à énergies couplées linéarisés. Des résultats intéressants sur les propriétés de commandabilité et d'observabilité sont établis.
- Surveillabilité des composants technologiques directement à partir du bond graph multiénergie linéarisé et sans avoir à générer les relations de redondance analytiques. Trois types d'éléments sont distingués : les actionneurs, les composants et les capteurs. Des techniques de surveillance sont proposées pour les défauts simples, d'autres concernent les défaillances multiples simultanées.
- Modélisation bond graph de défauts de composants. Alors que les défauts paramétriques ne change pas le modèle bond graph du process, les défauts structurels sont modélisés et le nouveau modèle bond graph du process est exploité pour l'étude de la surveillabilité.
- Directement à partir du bond graph non linéaire, il est montré comment une architecture d'instrumentation convenable nous permet de surveiller deux composants technologiques de nature différente (actionneurs, composants et capteurs).
- La platitude est introduite pour la surveillance des actionneurs. L'approche proposée permet la diagnosabilité des fautes simples et simultanées.

---

\* CHEM GIRD - CT - 200100466

## 1.6. Conclusion

Le critère principal de classification des méthodes de surveillance est basé sur le type de la connaissance, on a distingué deux types d'approches : les méthodes avec ou sans modèle. Utilisant l'outil bond graph, nous avons rappelé l'approche qualitative et l'approche quantitative pour la surveillance des systèmes physiques. Par une approche bond graph, la méthode quantitative de surveillance à base de modèle que nous mettons en évidence est axée sur la notion de redondance analytique ou sur des propriétés structurelles et causales.

Suivant l'approche quantitative, sont rappelées les conditions de surveillabilité des actionneurs, des composants physiques et des capteurs proposées dans la littérature. Pour les modèles linéaires, où les propriétés structurelles et causales peuvent être facilement exploitées, la diagnosabilité des fautes additives (actionneurs et capteurs) est directe. Toutefois, la diagnosabilité des composants nécessite la génération des RRAs. Ces techniques restent problématiques dans le cas de modèles non linéaires.

Les modèles bond graph couplés d'une certaine classe de systèmes thermofluides peuvent être linéarisés, permettant ainsi d'appliquer les méthodes d'analyse pour la commande et la surveillance développées pour les systèmes linéaires. Le chapitre suivant est consacré à la modélisation des procédés décrits par des bond graphs multiénergie et leur linéarisation.

## Chapitre 2

### ***Représentation des modèles bond graphs couplés***

#### **2.1. Introduction**

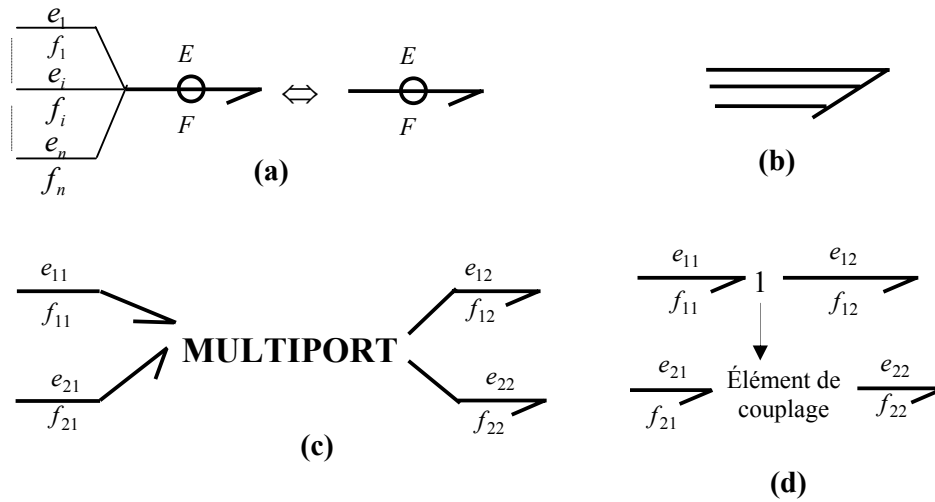
Le présent chapitre propose une représentation vectorielle des bond graphs multiénergies mettant en évidence la structure et le comportement des différents composants. Le modèle bond graph étant aussi un outil d'analyse, afin d'appliquer les propriétés structurelles déduites du bond graph linéaire (commandabilité, observabilité, surveillabilité), nous avons étendu les méthodes de linéarisation des bond graph multiport monoénergie aux bond graph couplés présents dans le processus thermofluides de nature complexe. Il a été montré que le triplet (A, B, C) du modèle linéarisé tangent obtenu par une approche classique est équivalent à celui obtenu en linéarisant les composants du bond graph non linéaire. Nous avons alors exploité cette propriété pour la linéarisation des modèles complexes (au sens du couplage des deux phénomènes hydraulique et thermique) des processus thermofluides à partir uniquement des bond graphs linéarisés de chaque composant. Le modèle global linéarisé est alors obtenu en connectant chaque composant à partir des Plans d'Instrumentation Détaillé (PID) du procédé. Une implémentation informatique de cette procédure pour l'étude des propriétés structurelles sur ces modèles a été développée au chapitre 5.

#### **2.2. Représentation vectorielle des bond graphs multiénergies**

##### **2.2.1. Représentation des bond graphs à énergies couplées**

Les bond graphs monoénergie 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, fluidiques et chimiques. Ces trois domaines sont couplés. Les systèmes thermofluides par exemple introduisent une complexité supplémentaire dans leur modélisation, puisque le flux d'énergie thermique (débit d'enthalpie) est lié au débit de la masse du fluide transporté d'une position à une autre sans effet de dissipation. L'outil bond graph est bien adapté à ce type de phénomènes puisque le couplage et l'influence des

différentes puissances seront mis en évidence d'une façon explicite grâce à sa structure graphique.



**Figure 2.1.** Représentation des bond graphs à énergies couplées.

Les puissances associées à ces domaines d'énergies couplées sont représentées d'une manière compacte par un lien comportant un anneau ou par un multi-lien (figures 2.1 (a) et 2.1 (b)). Pour bien distinguer les différentes énergies, on modélise les bond graphs multiénergies par un multiport ou par deux liens distincts (représentant les deux puissances découplées) couplés par un lien d'information (figures 2.1 (c) et 2.1 (d)).

Les indices 1, 2, ... n désignent les énergies modélisées (par exemple thermique, hydraulique et chimique) et les lettres « e » et « f » l'effort et le flux.

L'effort et le flux peuvent alors être présentés sous forme vectorielle :

$$E = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_n], \quad F = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]$$

Dans notre cas, les phénomènes hydrauliques et thermiques sont couplés. Les variables d'effort et de flux sont alors dépendants. Elles peuvent être représentées sous forme vectorielle :  $E = [P, T]$  et  $F = [\dot{m}, \dot{H}]$ . La modélisation présente une complexité supplémentaire puisque le flux d'énergie thermique (l'énergie convectée  $\dot{H}$ ) est lié à la masse du fluide transporté d'une position à une autre (débit hydraulique  $\dot{m}$ ).

L'équation de couplage est donc :

$$\dot{H} = \dot{m}h = \dot{m}c_p T$$

$h$  restant constante pendant le transport du fluide.

## 2.2.2. Structure d'un modèle bond graph couplé

Comme un bond graph simple (monoénergie), le bond graph multiénergie met en évidence à la fois sa structure "vectorielle" et le comportement du système représenté par un ensemble d'éléments. Dans cette section, une généralisation de la représentation vectorielle d'un bond graph simple est proposée afin d'inclure le cas des systèmes multiénergies et les pseudo bond graphs. La nouvelle représentation matricielle déduite relie ainsi les pseudo variables (ou les vrais variables) de flux et d'effort des domaines énergétiques considérés.

En général, les éléments dans les systèmes multiénergies se présentent sous forme de multiports. Trois des quatre modules défini par *Rosenberg & Karnopp (1983)* (sources, module dissipatif et module de stockage) sont reliés par des vecteurs à la structure de jonction vectorielle  $S_{ij}$  (figure 2.2). Par contre, le quatrième module est relié scalairement à la structure de jonction vectorielle puisque les capteurs sont définis dans un seul domaine d'énergie à la fois. Cette représentation sera appelée représentation vectorielle multiénergie.

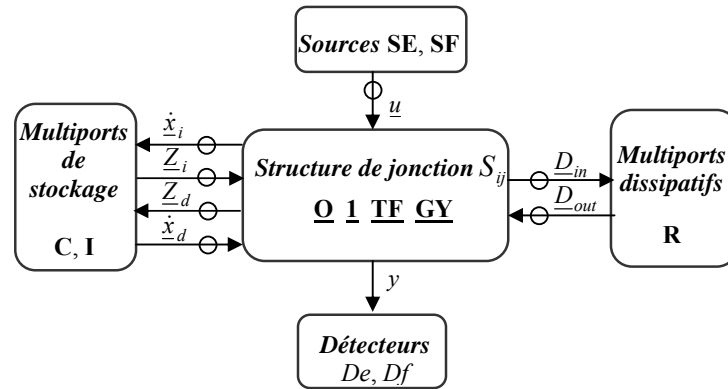


Figure 2.2. Représentation vectorielle d'un BG multiénergie.

Les anneaux sur les liens représentent le couplage des énergies. Généralement les modèles BGs monoénergies sont composés des éléments simple  $R$ ,  $C$ ,  $I$  et des éléments multiports  $TF$  et  $GY$ . Pour les BGs multiénergies, des multiports  $R$ ,  $C$  et  $I$  apparaissent en plus, ils sont liés à la structure des jonctions de chacune des énergies par un lien à la fois. Dans ces conditions, on définit :

- $N$  le nombre d'énergie du modèle multiénergie.
- **O**, **I**, **TF** et **GY** les jonctions vectorielles (mettant en œuvre plusieurs énergies) liant la structure de jonction aux différents multiports  $R$ ,  $C$ ,  $I$  et aux sources multiénergies  $SE$  et  $SF$ . Ces jonctions sont conservatives de puissance comme les éléments de jonctions simples.
- $\underline{x} = (x^{1t} \quad x^{2t} \quad \dots \quad x^{Nt})^t$  ( $t$  étant la fonction transposée) est le vecteur d'état multiénergie **couplé** en vrai ou en pseudo bond graph (les variables d'état ne sont pas forcément indépendantes) formé par les concaténations des  $N$  vecteurs d'état  $x^j$  scindé en  $x_i$  et  $x_d$  respectivement associés aux multiports en causalité intégrale et dérivée.
- $x^j$  est composé des moments généralisés  $p^j$  sur les multiports **I** et déplacements généralisés  $q^j$  sur les multiports **C**.

- $\dot{\underline{x}}$  est la dérivée par rapport au temps du vecteur d'état (variables  $e^j$  sur les multiports **I** et  $f^j$  sur les **C**).
- $\underline{Z}$  représente le complémentaire de  $\dot{\underline{x}}$  (variables  $f^j$  sur les **I** et  $e^j$  sur les **C**) scindé en  $Z_i$  et  $Z_d$ .
- $\underline{u} = (u^{1t} \ u^{2t} \ \dots \ u^{Nt})^t$  le vecteur d'entrée multiénergie (sources), **SE** et **SF** les sources d'effort et de flux multiénergies.
- $y$  vecteur de sortie (capteurs).
- On a  $\underline{D}_{in} = (D_{in}^{1t} \ D_{in}^{2t} \ \dots \ D_{in}^{Nt})^t$  et  $\underline{D}_{out} = (D_{out}^{1t} \ D_{out}^{2t} \ \dots \ D_{out}^{Nt})^t$  avec  $D_{in}^{jt}$  et  $D_{out}^{jt}$  les vecteurs regroupant les efforts  $e^j$  et les flux  $f^j$  pour les multiports dissipatifs **R**.

Considérons à titre illustratif le cas d'une source thermofluide (élément actif au sens des bond graphs) et le multiport **R** comme élément passif. Une source thermofluide  $ST_f$  est une source de flux multiénergie **SF** avec  $\underline{u} = (\dot{m}_{in} \ \dot{H}_{in})^t$ .  $\dot{m}_{in}$  et  $\dot{H}_{in}$  sont respectivement le débit hydraulique délivré par l'actionneur thermofluide et le flux d'enthalpie convecté par ce fluide. Pour un multiport thermofluide **R** en causalité conductance, on a  $\underline{D}_{in} = (\Delta P \ T_1)^t$  et  $\underline{D}_{out} = (\dot{m} \ \dot{H})^t$ .  $\Delta P$  est la perte de charge dans la restriction modélisée par le multiport,  $T_1$  la température du fluide à l'entrée du multiport,  $\dot{m}$  le débit hydraulique transféré et  $\dot{H}$  le débit d'enthalpie correspondant.

La matrice de structure multiénergie  $S^M$  (ou  $\underline{S}$ ) suivante est déduite de la représentation vectorielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{x}}_i \\ \underline{Z}_d \\ \underline{D}_{in} \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}_{11} & \underline{S}_{12} & \underline{S}_{13} & \underline{S}_{14} \\ \underline{S}_{21} & \underline{S}_{22} & \underline{S}_{23} & \underline{S}_{24} \\ \underline{S}_{31} & \underline{S}_{32} & \underline{S}_{33} & \underline{S}_{34} \\ \underline{S}_{41} & \underline{S}_{42} & \underline{S}_{43} & \underline{S}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_i \\ \dot{\underline{x}}_d \\ \underline{D}_{out} \\ \underline{u} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$\underline{S}$  possède  $(\sum_{i=1}^{n_M} P_{Mi} + n_S)$  lignes.  $P_{Mi}$ ,  $n_M$  et  $n_S$  sont respectivement le nombre de ports du multiport  $i$ ,  $n_M$  le nombre de multiports passifs (**I**, **R** ou **C**), et le nombre de capteurs du système ( $De$  et  $Df$ ). Cette matrice ne dépend pas de la linéarité du système, elle est composée des coefficients 0, -1, +1,  $m$ ,  $r$ ,  $1/m$ ,  $1/r$ .  $r$  et  $m$  sont les modules des éléments transformateur (**TF**) et gyrateur (**GY**).

Dans le cas linéaire ou linéarisé, quelques relations peuvent être énoncées :

$$\begin{aligned} \underline{D}_{out} &= L \underline{D}_{in} \\ \underline{Z}_i &= H(1/s) \dot{\underline{x}}_i \\ \underline{Z}_d &= H'(s) \dot{\underline{x}}_d \end{aligned}$$

$L$ ,  $H'(s)$  et  $H(1/s)$  sont des matrices carrées,  $s$  et  $1/s$  sont les opérateurs de Laplace pour la dérivation et l'intégration par rapport au temps. En absence d'élément multiport, ces matrices

deviennent diagonales. Dans le cas contraire, ces matrices sont souvent non inversibles. Considérons par exemple un système thermofluide en régime sous saturé, on suppose que le modèle bond graph linéarisé comporte un multiport  $\mathbf{R}$ , la matrice  $L$  correspondante est triangulaire inférieure par bloc :

$$L = \begin{pmatrix} L_H & 0 \\ L_{HT} & L_T \end{pmatrix}$$

Les indices  $H$  et  $T$  désignent respectivement l'énergie hydraulique et l'énergie thermique. Cette forme triangulaire exprime l'indépendance de l'énergie hydraulique de l'énergie thermique.

En général,  $L$ ,  $H$  et  $H'$  peuvent être décomposées de la sorte :

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1} & \dots & M_{NN} \end{pmatrix}$$

**Propriété 1.** *Il est toujours possible d'écrire la matrice de structure sous la forme diagonale par bloc. Ceci revient à dire que l'énergie  $i$  ne peut influencer sur l'énergie  $j$  qu'à travers les multiports ( $i, j \in \{1 \dots N\} / i \neq j$ ).*

Preuve.

Deux cas peuvent être considérés :

1. Une seule énergie est mise en jeu au niveau des **TF** et des **GY**

Dans ce cas l'énergie  $i$  ne peut influencer sur l'énergie  $j$  qu'à travers les multiports ( $i, j \in \{1 \dots N\} / i \neq j$ ). Les matrices de structure  $\underline{S}_{ij}$  sont ainsi de la forme :

$$\underline{S}_{ij} = \begin{pmatrix} S_{ij}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{ij}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{ij}^N \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

où  $S_{ij}^1, S_{ij}^2, \dots, S_{ij}^N$  sont les sous matrices de la matrice de structure si on ne considère respectivement que l'énergie 1, 2, ...,  $N$ .

D'après l'équation (2.1), une permutation particulière des lignes et des colonnes de la matrice  $\underline{S}$  conduit à :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i^1 \\ Z_d^1 \\ D_{in}^1 \\ y^1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{x}_i^N \\ Z_d^N \\ D_{in}^N \\ y^N \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & S^N \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Z_i^1 \\ \dot{x}_d^1 \\ D_{out}^1 \\ u^1 \\ \vdots \\ \vdots \\ Z_i^N \\ \dot{x}_d^N \\ D_{out}^N \\ u^N \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

avec  $S^1, S^2, \dots, S^N$  les matrices de structure des différentes énergies.

A partir de l'équation (2.3) on déduit que quelque soit l'énergie considérée  $j$ , on peut déterminer la matrice de structure correspondante  $S^j$  et ceci indépendamment du couplage avec les autres énergies:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i^j \\ Z_d^j \\ D_{in}^j \\ y^j \end{bmatrix} = S^j \begin{bmatrix} Z_i^j \\ \dot{x}_d^j \\ D_{out}^j \\ u^j \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2. En présence d'au moins un **TF** ou un **GY** représentant un couplage d'énergie

Les **TF** et les **GY** peuvent être représentés comme des éléments multiports conservatifs d'énergie et donc peuvent être enlevés de la structure de jonction. De cette façon, le couplage d'énergie n'apparaît qu'au niveau des composants et la démonstration du cas précédent reste valide.

Dans le but de déterminer la représentation vectorielle pour les systèmes thermofluides, la section suivante considère une classification de ces process. Les variables de puissances sont ensuite définis.

## 2.3. Systèmes multiénergies couplés en génie des procédés

### 2.3.1. Variables de puissance en génie des procédés

L'outil bond graph permet de modéliser parfaitement les systèmes mécaniques et électriques. Pour ces systèmes, les variables d'effort et de flux sont respectivement tension-force et intensité du courant-vitesse. Ces systèmes sont décrits par un vrai bond graph dont le produit effort flux est la puissance instantanée sur un lien un port du composant du système.

Dans les systèmes thermodynamiques et plus globalement en génie des procédés et énergétique, l'utilisation de vrais bond graphs introduit des variables d'effort et de flux thermique et chimique (température, potentiel chimique, flux d'entropie, flux molaire) qui sont de nature complexe et inadaptée aux problèmes de simulation, non accessibles aux

mesures, car ils n'obéissent pas à des lois de conservation simples (l'entropie par exemple n'est pas conservée). On introduit alors pour leur modélisation un pseudo bond graph développé initialement par Karnopp (1979) pour lequel le produit des variables d'effort et de flux n'a plus la dimension d'une puissance. Toutefois, il faut noter que les propriétés classiques (causales, structurelles, mise en équations,...) déduites d'un vrai bond graph restent valables pour un pseudo bond graph.

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 (terme plus général que tension) en bond graph. C'est le cas de la température, de la pression, des concentrations ou du potentiel chimique. D'autres variables tels que le volume, la masse, la charge électrique, l'énergie interne, l'entropie,... sont des variables extensives. Les variables extensives correspondent aux variables de déplacement (l'intégrale du flux) en bond graph.

Dans les systèmes électriques et mécaniques, un seul domaine physique est impliqué et deux variables duales sont impliquées : tension-courant ou force-vitesse. En thermodynamique trois domaines physiques sont impliqués : le thermique, le fluide et le matériel ou chimique. Un fluide en écoulement par exemple) est caractérisé par un ensemble de variables, qui est pour les efforts : la pression  $P$  et la température  $T$ , et pour le flux, le débit volumique (ou massique), le flux d'entropie et le flux de quantité de mouvement. D'autres variables peuvent aussi intervenir telles que le flux de chaleur  $\dot{Q}$ , le flux d'énergie interne  $\dot{U}$  ou le flux d'enthalpie  $\dot{H}$ . Sur le tableau 2.1 sont représentées les variables de puissance et d'énergie en pseudo bond graph utilisées en génie des procédés. En thermique, le produit des variables effort flux ( $T-\dot{Q}$ ) n'a pas la dimension d'une puissance, la puissance correspond plutôt à la variable du flux ( $\dot{Q}$ ).

Domaine	Effort ( $e$ )	Flux ( $f$ )	Déplacement ( $q$ )	Impulsion ( $p$ )
Chimique	Concentration $C$ [ $mole/m^3$ ]	Flux molaire $\dot{n}$ [ $mole/s$ ]	Nombre de moles $n$ [-]	-
Hydraulique	Pression $P$ [ $N/m^2$ ]	Débit massique $\dot{m}$ [ $kg/s$ ]	Masse $m$ [ $kg$ ]	Impulsion de la pression $p_p$ [ $(N.s)/m^2$ ]
<u>Thermique</u> 1. Conduction	Température $T$	Flux thermique $\dot{Q}$ [ $J/s$ ]	Quantité de chaleur $Q$ [ $J$ ]	-
2. Convection	Température $T$ [ $K$ ] ou enthalpie massique $h$ [ $J/kg$ ]	Flux d'enthalpie $\dot{H}$ [ $J/s$ ]	Energie interne $U$ [ $J$ ]	-

**Tableau 2.1.** Variables généralisées pseudo bond graph.

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. Pour la convection, la température  $T$  (ou l'enthalpie spécifique  $h$ ) et la pression  $P$  sont choisies comme variables d'effort. Le flux hydraulique  $\dot{m}$  et le flux d'enthalpie  $\dot{H}$  sont utilisés comme variables de flux. Le choix n'est pas trivial, il dépend de la nature des phénomènes physiques considérés Ould Bouamama et al. (1997), Thoma & Ould Bouamama (2000). Pour distinguer les

différents types de puissance, nous dénotons dans la suite par  $\dot{H}$  le flux d'enthalpie véhiculé par convection en watt ( $W$ ) et par  $\dot{Q}$  le flux thermique transféré par conduction ( $W$ ).

### 2.3.2. Classification des systèmes thermofluides au sens des modules de la représentation vectorielle

Dans le but d'aborder la représentation vectorielle des processus thermofluides, il nous paraît nécessaire de proposer une classification de ce type de procédés. D'un point de vue architectural, n'importe quel processus thermofluide peut être considéré comme un ensemble de composants interconnectés. D'un point de vue bond graph, chaque composant est associé à un ensemble d'éléments bond graphs ( $R$ ,  $C$ ,  $I$ ). Au sens des modules de la représentation vectorielle, quatre principaux types d'éléments peuvent être considérés : les éléments de stockage d'énergie cinétique ( $I$ ) ou potentielle (de matière) ( $C$ ), les éléments résistifs ( $R$ ), les sources d'énergie (sources thermofluides ou sources thermiques) et les détecteurs (hydrauliques et thermiques).

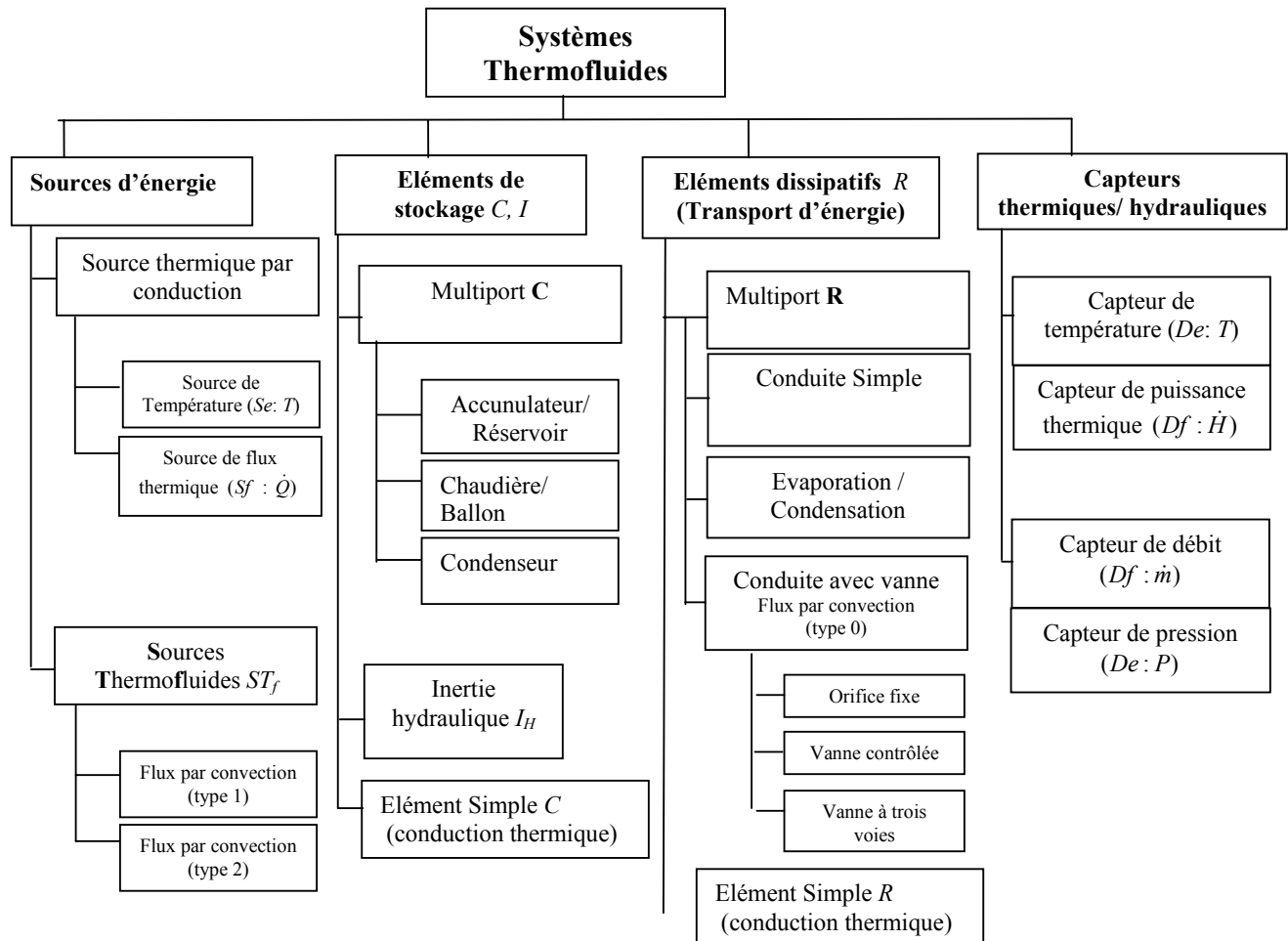


Figure 2.3. Classification des systèmes thermofluides.

Du point de vue de la modélisation, la modélisation fonctionnelle est subjective : le modèle dépend fortement du concepteur. Afin de définir une classification objective et d'éviter de ce

fait toute ambiguïté, les processus seront classés comme des processeurs en tenant compte du type de la transformation physique réalisée *Paynter (1961)*, *Thoma (1975)*, et non de la fonction téléologique *Feliot (1997)*. D'après *Lemoigne (1989)*, un processus est considéré comme l'ensemble des entités processées dans le système de l'environnement, i.e., l'ensemble des transformations dans le temps de la matière, de l'énergie ou de l'information.

Du point de vue énergétique, on distingue trois types de processus : les processus d'Accumulation (A) liés au stockage d'énergie, les processus de type (C) Conversion liés aux phénomènes résistifs (dissipatifs) ou de transformation et les processus de transport d'énergie (processus de type T). Ces classes définies dans *Feliot (1997)* ont été utilisées par *Busson (2002)* pour la classification des processus thermofluides.

Comme le but est d'obtenir la représentation vectorielle des systèmes thermofluides, une classification doit être proposée sur la base des quatre modules définis par *Rosenberg & Karnopp (1983)* (sources, modules dissipatifs, modules de stockage et capteurs). C'est dans ce cadre, qu'une classification non exhaustive est donnée (figure 2.3). Les quatre classes de composants thermofluides définies sont:

- Les éléments de stockage multiports sont les processus d'accumulation donc des chaudières, réservoirs, condenseurs, etc... Ils sont tous le siège d'un phénomène de stockage d'énergie hydraulique et thermique. En théorie bond graph, ces processus de stockage sont associés à un multiport **C** appelé accumulateur, car ils lient les efforts à l'accumulation des flux. Le modèle dynamique est donné par la loi constitutive liant le vecteur d'effort  $e$  et le vecteur de déplacement généralisé  $q$ . Comme éléments de stockage simples, on trouve l'élément simple **C** qui modélise la capacité thermique de la paroi dans un phénomène de conduction thermique et l'inertie hydraulique du fluide circulant à travers une vanne.
- Les processus résistifs seront associés à des multiports dans le cas de modélisation d'une conduite, vanne, des phénomènes de dissipation, évaporation, condensation, etc... ou à des éléments simples **R** dans le cas d'une conduction thermique. Ils sont décrits par des équations algébriques liant l'effort et le flux (ou par une équation différentielle si l'inertie du fluide est considérée).
- On distingue les capteurs d'effort hydraulique (détecteurs de niveau ou de pression) et les capteurs de débit. Au niveau thermique, on trouve les capteurs de température et les capteurs de puissance thermique.
- Deux types de sources d'énergie peuvent être distingués : les sources thermiques par conduction et les sources de *flux par convection* (connues sous les sources thermofluides). Les types d'actionneurs industriels pour ces sources sont les éléments de chauffage pour les sources thermiques par conduction et les pompes pour les sources thermofluides.

#### *Type des flux par convection dans les systèmes thermofluides*

Le flux thermique par conduction  $Sf_T = \dot{Q}$  n'intervient qu'au niveau thermique. Par contre, le flux par convection  $(\dot{m}_i, \dot{H}_i)$  intervient aux deux niveaux d'énergie. Il peut être classifié selon le type d'énergie qu'il actionne. On le définit alors comme suit :

**Définition 4.** Le flux par convection de **type 0** est un flux entrant dans un (ou sortant d'un) accumulateur à travers une vanne (Processus de Transport d'énergie). Il est caractérisé par deux fonctions non linéaires  $f$  et  $g$  tel que :

$$\dot{m}_i = f(x)$$

$$\dot{H}_i = g(x)$$

où  $x$  est le vecteur d'état.

**Définition 5.** Le flux par convection de **type 1** est un flux alimentant un accumulateur par une pompe non branchée au circuit thermofluide : elle est considérée comme une source d'énergie extérieure dont le flux (l'effort) est indépendant de l'effort (du flux) du système alimenté. Il est caractérisé par deux sources de flux hydraulique et thermique dépendantes :

$$\dot{m}_i = Sf_H$$

$$\dot{H}_i = Sf_T$$

**Définition 6.** Le flux par convection de **type 2** est un flux arrivant à (ou quittant) un accumulateur par une pompe branchée au circuit thermofluide. Selon que la pompe est considérée comme une source de commande ou pas, deux cas peuvent être distingués :

**Cas 1 : La Pompe est considérée comme une Source de Commande** (source d'énergie constante)

$$\dot{m}_i = Sf_H$$

$$\dot{H}_i = g(x)$$

avec  $g$  une fonction non linéaire.

**Cas 2 : La Pompe n'est pas considérée comme une Source de Commande** (Processus de Transport d'énergie)

$$\dot{m}_i = f(x)$$

$$\dot{H}_i = g(x)$$

avec  $f$  et  $g$  deux fonctions non linéaires.

**Remarque 2.3.1.** Le même composant peut produire un comportement différent en fonction de sa position dans le procédé. A titre d'exemple, une pompe isolée à l'entrée d'un accumulateur assure un flux de convection de type 1, alors qu'une pompe insérée dans un circuit d'alimentation en eau avec une conduite sera considérée comme un flux de convection de type 2. En effet, leur fonction peut paraître identique, mais du point de vue comportemental, la source d'effort (ou de flux) délivrée par une pompe isolée est indépendante, alors que dans le deuxième cas (pompe connectée à une conduite), elle va dépendre de la réaction des composants connectés en amont et aval.

### 2.3.3. Représentation vectorielle d'un bond graph thermofluide

Après avoir proposé une classification des systèmes thermofluides et défini les variables de puissances, ce paragraphe considère la représentation vectorielle des bond graphs thermofluides. La représentation vectorielle multiénergie générale de la section 2.2 devient alors pour un processus thermofluide (figure 2.4).

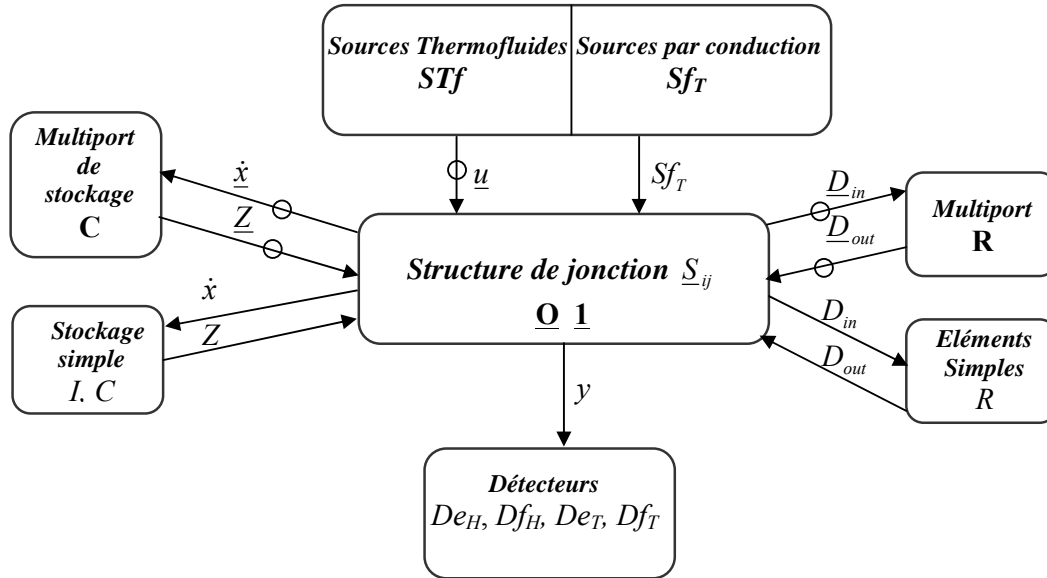


Figure 2.4. Représentation vectorielle d'un modèle BG thermofluide.

La présence de deux énergies (énergie hydraulique et thermique) est signalée par la présence des liens vectoriels. Trois types de non-linéarités sont distingués: celles de la structure, celles des composants et celles causées par les deux types. La non-linéarité rencontrée dans les modèles en génie des procédés est liée aux composants. Rappelons qu'on trouve comme composants passifs: les multiports de stockage **C**, les multiports dissipatifs **R**, l'élément simple **C** (capacité thermique des parois), l'élément simple **R** (phénomène de conduction). L'inertie quant à elle ne se trouve que sous forme d'élément simple **I** au niveau hydraulique. Contrairement à la représentation précédente, on distingue ici les multiports et les éléments simples.  $De_H$  est un détecteur de niveau ou de pression,  $Df_H$  est celui du débit hydraulique,  $De_T$  mesure la température et  $Df_T$  est un détecteur de flux thermique (puissance thermique en pseudo BG).

Il est à noter qu'une Source Thermofluide **STf** est composée de deux sources hydraulique et thermique, elle est représentée par un lien vectoriel. Par contre, une source thermique par conduction n'intervient qu'au niveau thermique (représentée par un lien scalaire). Les détecteurs sont définis sur un seul domaine d'énergie d'où la représentation scalaire des liens qui les relie à la structure de jonctions. L'ordre du modèle d'un système thermofluide est égale à la dimension de son vecteur d'état (propriété B.5), ceci dit tous les éléments dynamiques (simples ou multiports) admettent une causalité intégrale lorsqu'on affecte la causalité intégrale préférentielle. Ceci est marqué par l'absence des vecteurs  $\dot{x}_d$  et  $\underline{Z}_d$ .  $(\dot{x}, \underline{Z})$  représente le couple vecteur d'état et le vecteur complémentaire associés aux éléments dynamiques en causalité intégrale. Pour avoir une représentation vectorielle habituelle où une seule énergie intervient à la fois, nous procédons par un découplage des deux énergies, on obtient alors le schéma 2.5.

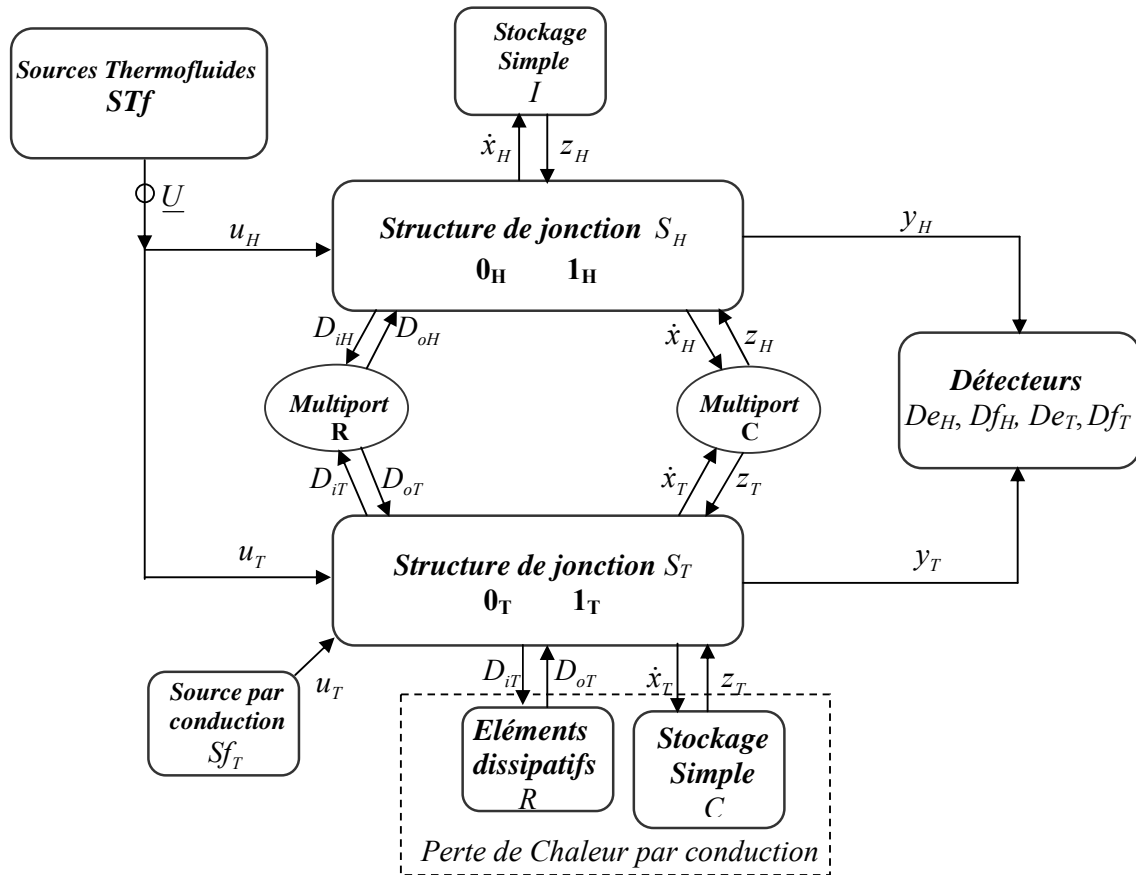


Figure 2.5. Représentation vectorielle éclatée d'un modèle BG.

Notons que ces représentations (figures 2.4 et 2.5) sont valables pour les deux régimes saturés et sous saturés. En effet, ces deux régimes sont distingués au niveau de la modélisation des multiports de couplage **R** et **C**. Les méthodes de surveillance, notamment la méthode de projection (dépendant de la dimension de la matrice de structure associée au bond graph), trouvent un intérêt avec cette représentation *El Osta et al. (2005d)*, voir l'annexe B.

## 2.4. Génération de modèles BG non linéaires

Pour pouvoir générer le modèle BG non linéaire d'un processus à partir de la représentation vectorielle, les éléments constitutifs non linéaires sont modélisés par des éléments bond graphs. La structure de jonction vectorielle et les multi-liens bond graphs (liens de puissance dans un modèle bond graph multiénergie) sont ensuite considérés. De cette façon, le modèle BG global peut être déduit d'une façon générique et directe par une approche graphique.

### 2.4.1. Éléments multiports de base en génie des procédés (Élément constitutifs)

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

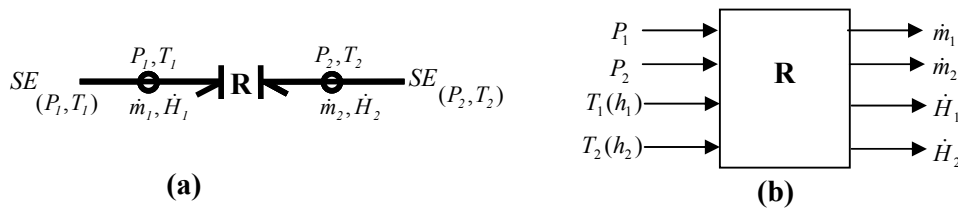
- L'écoulement est régulier,
- Le fluide est newtonien (i.e. fluide à viscosité constante),
- Les énergies cinétiques et gravitationnelles (dues à l'altitude) sont négligées.

### 2.4.1.1. Multiport $R$ thermodynamique

Les phénomènes de dissipation d'énergie sont modélisés par un élément deux-ports  $R$  qui met en œuvre des lois matricielles. Les principaux phénomènes modélisés par le multiport  $R$  sont le changement de phase de la vapeur (l'évaporation et la condensation de la vapeur), la convection d'un fluide à travers une restriction hydraulique (conduite, vanne, filtre, ...), etc... Les causalités peuvent être quelconques, mais dans le cas général, les efforts amont et aval sont imposés, et on détermine les flux hydraulique  $f_H$  et thermique  $f_T$ .

#### 2.4.1.1.1. Causalité conductance

La causalité conductance est naturelle dans un élément résistif de type convection dans une conduite ou conduction thermique dans un échangeur. En effet, c'est le flux massique transféré qui est la conséquence d'une différence entre les efforts amonts et avals (gradient de pression, température, potentiel chimique...). Dans notre cas, nous avons quatre entrées et quatre sorties choisies en fonction des causalités affectées à cet élément : les efforts amont et aval sont imposés, et on détermine les flux thermiques  $\dot{H}$  et hydraulique  $\dot{m}$ . Un modèle bond graph et un schéma bloc de simulation du multiport  $R$  en causalité conductance sont représentés sur la figure 2.6. Les liens bond graphs sont entourés par des anneaux pour représenter le couplage des énergies *Thoma & Ould Bouamama (2000)*.  $SE$  représente les sources d'effort imposées par l'environnement (la température et la pression) :  $SE = [P \ T]^t$ .



**Figure 2.6.** (a) *Modèle Bond Graph d'un multiport résistance en causalité conductance*,  
(b) *Schéma Block de Simulation*

En général, le 2-Ports  $R$  en causalité conductance met en œuvre des lois matricielles :

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{H}_1 \\ \dot{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{R1}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{R2}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{R3}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{R4}(P_1, P_2, T_1, T_2) \end{bmatrix}$$

où les indices 1 et 2 correspondent respectivement aux positions amont et aval de la résistance.

Les quatre relations sont non linéaires et dépendent du phénomène physique modélisé (saturé, sous saturé (régime considéré)... ) *Ould Bouamama et al. (2000)*. La continuité sur la restriction conduit à l'égalité du débit massique et du débit d'enthalpie, comme exprimé par

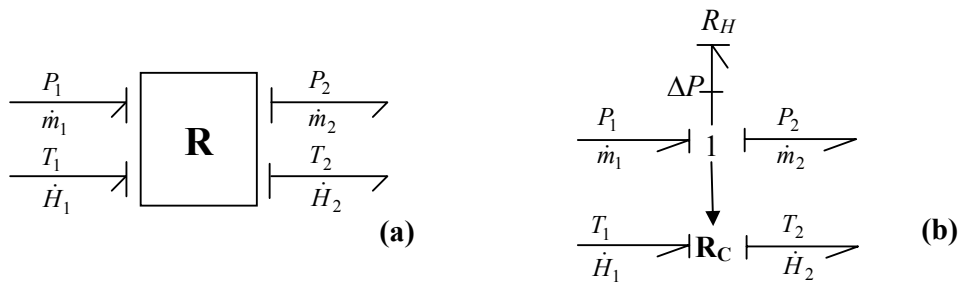
l'équation (2.5).  $T_1$  est la température à l'entrée de la restriction et  $C_p$  la chaleur spécifique à pression constante. Dans le cas isothermique, la continuité sur la restriction conduit à l'égalité du débit massique et du débit d'enthalpie, on a :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad \dot{H}_1 = \dot{H}_2 = \dot{H} = \dot{m}C_p T_1 \quad T_1 = T_2 \quad (2.5)$$

Les relations constitutives peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{m} \\ \dot{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{Rh}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{RT}(P_1, P_2, T_1, T_2) \end{bmatrix}$$

Dans la littérature le multiport  $\mathbf{R}$  se modélise par la figure 2.7 (a) *Karnopp et al. (1990)* et 2.7 (b) *Ould Bouamama et al. (1997)*.

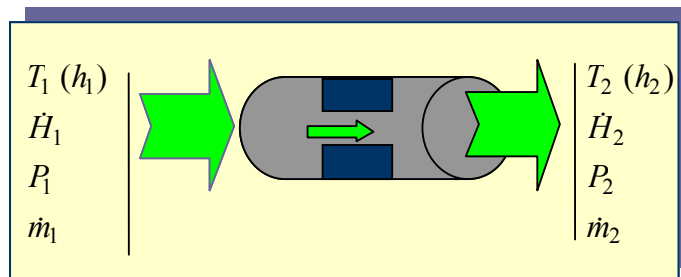


**Figure 2.7.** Modèle non linéaire d'un Multiport  $\mathbf{R}$ .

$R_H$  est une résistance hydraulique modélisant la perte de charge et  $\mathbf{R}_C$  est une résistance de couplage. Ces représentations ne peuvent pas être utilisées directement pour l'analyse structurelle et causale. C'est pourquoi une nouvelle représentation des modèles BG (bien adaptée pour l'analyse causale) est proposée en dessous.

Examinons à titre d'exemples quelques composants thermofluides les plus usités dans l'industrie :

### Conduite thermofluide



**Figure 2.8.** Représentation symbolique d'une convection thermofluide.

Le schéma d'une convection thermofluide à travers une conduite est donné par la figure 2.8.

### I. Cas d'une conduite bien calorifugée et en régime sous saturé

Le fluide est supposé sous saturé (monophasique) et la conduite bien calorifugée. Dans ces conditions, le débit massique ne dépend que de l'effort hydraulique, comme exprimé par la relation (2.7). Ici, les variables d'effort sont la perte de charge dans la restriction ( $\Delta P$ ) et la température ( $T_1$ ) du fluide à l'entrée du multiport.

$$\dot{m} = \dot{m}(\Delta P) = k\sqrt{\Delta P} \quad (2.6)$$

$$\dot{H} = \dot{H}(\Delta P, T_1) = \dot{m}C_p T_1 \quad (2.7)$$

$$T_1 = T_2 = T \quad (2.8)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2.9)$$

Le modèle BG est donné par la figure 2.9. Puisque les flux entrées sorties sont égaux une jonction-1 est placée au niveau hydraulique afin d'obtenir la valeur de  $\Delta P$  en découplant le modèle bond graph multiénergie. Sur le schéma 2.9 (a),  $R_h$  est une résistance hydraulique modélisant la perte de charge. Alors que nous considérons qu'il n'y a pas de perte thermique par conduction (la conduite étant bien isolée),  $R_C$  est une résistance de couplage (utilisée pour représenter le couplage de l'énergie hydraulique avec l'énergie thermique). En effet, le multiport  $\mathbf{R}_C$  utilisé dans la littérature *Karnopp et al. (1990)* pour modéliser le couplage peut être remplacé par un élément simple  $R_C$  (figure 2.9 (a)). En remplaçant  $R_h$  et  $R_C$  par un multiport  $\mathbf{R}$ , le schéma 2.9 (b) est obtenu *El Osta et al. (2003a)*. Puisque seulement la valeur de la température en amont de la restriction  $T_1$  est nécessaire, le détecteur fictif ( $Df^*: \dot{H}$ ) placé sur une jonction 1 thermique et la source modulée ( $MSf^*: \dot{H}$ ) sont utilisés (voir les figures 2.9 (a) et 2.9 (b)). Il est aussi possible d'utiliser un capteur fictif de température ( $De^*: T_1$ ) placé sur une jonction 0 thermique et une source d'effort modulée ( $MSe^*: T_1$ ) comme le montrent les figures 2.9 (c) et 2.9 (d).

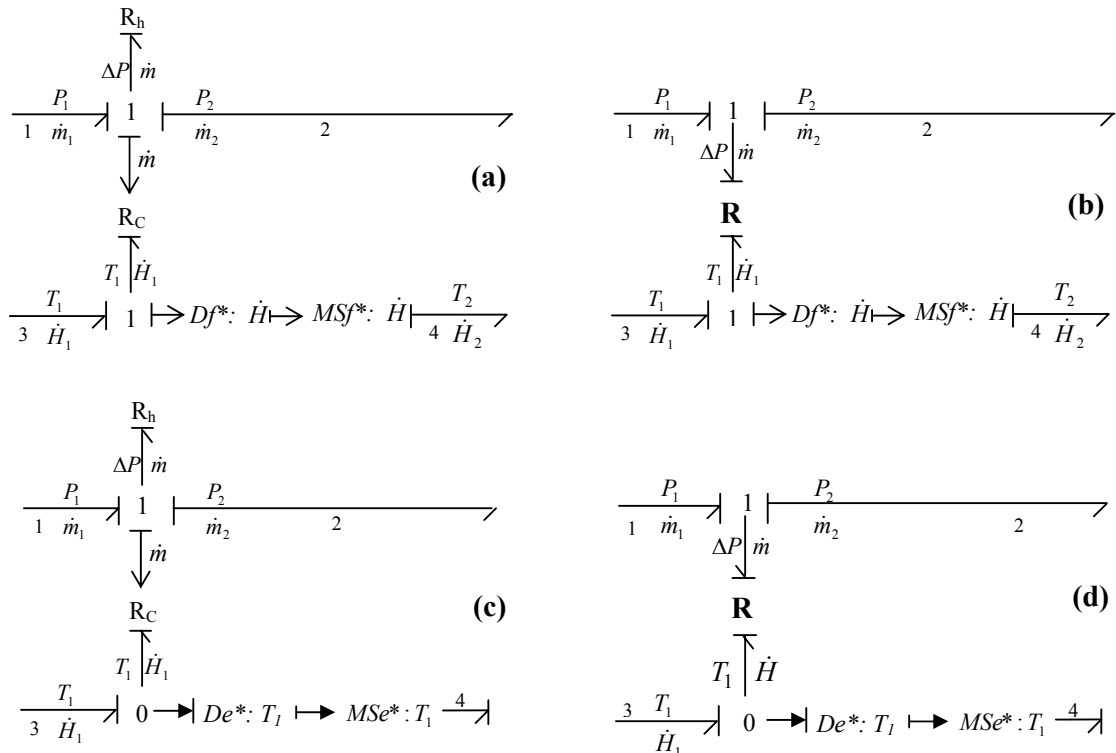


Figure 2.9. Modèle non linéaire éclaté d'une conduite.

Les deux dernières représentations présentent un inconvénient par rapport aux deux précédentes qui assurent une conservation de la puissance thermique. Nous supposons que les capteurs sont idéaux (pas de puissance transférée), ils sont alors modélisés par des liens d'information.

*Modèle non linéaire découplé du Multiport **R***

Considérons le multiport **R** en régime saturé donné par la figure 2.6 (a). Le fluide est saturé : la vapeur et le liquide sont en équilibre. Ainsi, la pression et la température sont dépendantes :

$$T_1 = f_1(P_1) \tag{2.10}$$

$$T_2 = f_2(P_2) \tag{2.11}$$

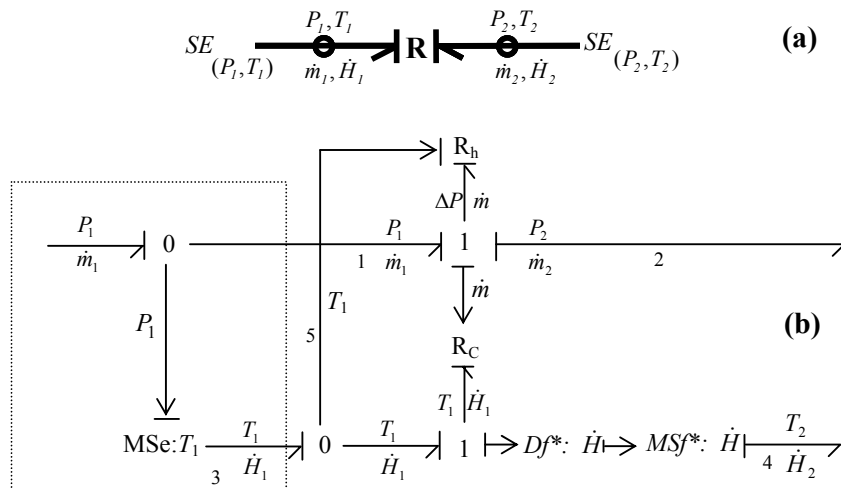
Contrairement au cas de l'écoulement d'un fluide en régime sous saturé, le débit massique dépend des pressions amont  $P_1$  et aval  $P_2$ , mais aussi de la température amont  $T_1$ . La température aval n'influe pas par contre sur le débit *Prandtl (1952), Borel (1984)*.

$$\dot{m} = \Phi_h(P_1, P_2, T_1) \tag{2.12}$$

$$\dot{H} = \Phi_T(P_1, P_2, T_1) = \dot{m}C_pT_1 \tag{2.13}$$

Cependant, dans le cas étudié, le débit massique dépend de l'effort thermique. Ainsi, la résistance hydraulique dépend de la température d'entrée. La structure du modèle BG donné par le schéma 2.9 (b) reste valable, cependant une modification doit être faite sur le schéma 2.9 (a).

Nous obtenons:

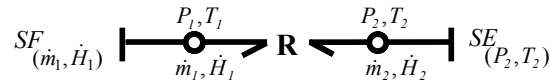


**Figure 2.10.** Modèle non linéaire éclaté de la conduite.

Le sous modèle encadré sur le schéma 2.10 (b) exprime la dépendance de la pression et de la température en raison de l'état thermodynamique (vapeur saturée). Cette représentation présente un avantage sur celle donnée par le schéma 2.9 (b) parce qu'elle met en évidence les liens d'information dans les deux sens.

### 2.4.1.1.2. Causalité résistance

Quand le débit hydraulique au niveau d'une vanne est imposé par un élément mécanique (pompe par exemple), la causalité résistance (la variable flux est une entrée) est affectée au multiport **R** modélisant la vanne. Dans ce cas, le débit n'est plus la conséquence d'une différence entre les efforts amont et aval mais, il est fourni par la caractéristique de la pompe. Le modèle BG non linéaire est représenté comme montré sur le schéma 2.11. *SE* représente les sources d'effort imposées par l'environnement (la température et pression) :  $SE = [P \quad T]^t$ . *SF* est une source de flux thermofluide  $SF = [\dot{m} \quad \dot{H}]^t$ .

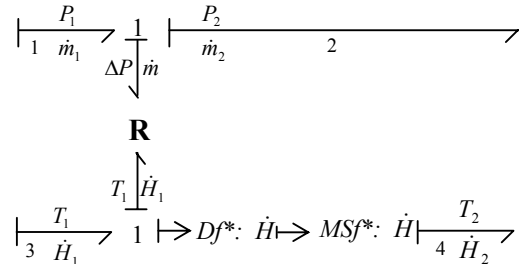


**Figure 2.11.** Modèle Bond Graph d'un multiport résistance (causalité résistance).

Les équations constitutives dans le cas d'une causalité conductance sont :

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P(\dot{m}) \\ T_1 &= T_1(\dot{m}, \dot{H}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

En causalité résistance, la représentation 2.9 (b) devient celle donnée par la figure 2.12.:



**Figure 2.12.** Modèle BG non linéaire éclaté d'un multiport **R**.

Comme avant, nous aurions pu remplacer la jonction thermique 1 par une jonction 0, le capteur de flux par un capteur d'effort et la source modulée de flux par une source modulée d'effort. Le même inconvénient des schémas 2.9 (c) et (d) apparaît dans une telle représentation.

### 2.4.1.1.3. Multiport Mixte **R**

Deux types de multiports **R** mixtes peuvent être définis : les multiports **R** mixtes du type 1 et les multiports **R** mixtes du type 2. Les multiports **R** mixtes du type 1 sont soumis à une causalité conductance au niveau hydraulique et à une causalité résistance au niveau thermique. Ceux du type 2 possèdent la causalité conductance au niveau thermique et la causalité résistance au niveau hydraulique. La représentation vectorielle comme celle des figures 2.6 et 2.11 n'est plus possible.

Les équations constitutives sont dans le cas d'un multiport mixte **R** de type 1 :

$$\dot{m} = \dot{m}(\Delta P)$$

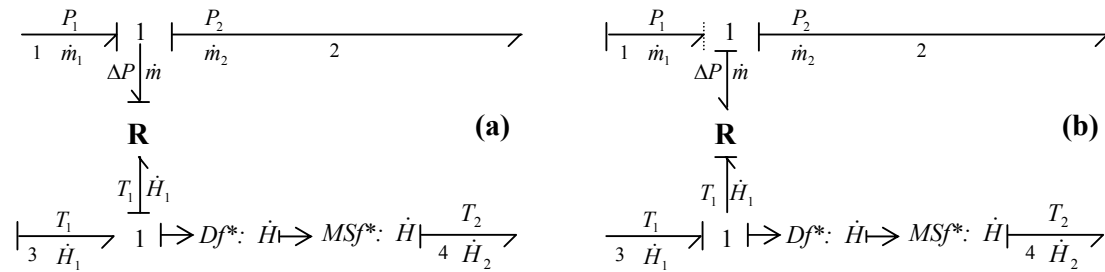
$$T_1 = T_1(\Delta P, \dot{H})$$

et dans le cas d'un multiport mixte **R** de type 2 :

$$\Delta P = \Delta P(\dot{m})$$

$$\dot{H} = \dot{H}(\dot{m}, T_1)$$

Le BG non linéaire éclaté résultant est donné par la figure 2.13 (a) pour le multiport mixte du type 1 et par la figure 2.13 (b) pour le multiport mixte du type 2.



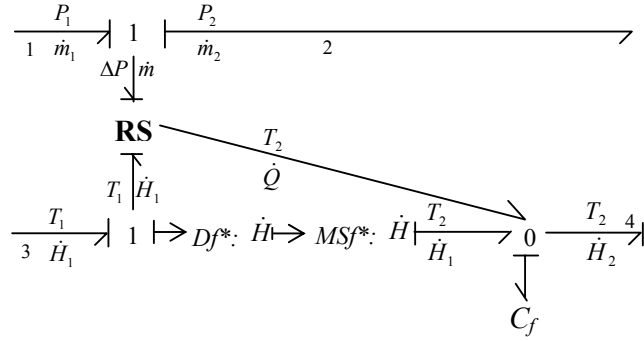
**Figure 2.13.** Modèle éclaté du multiport **R** non linéaire.

### 2.4.1.2. Multiport **RS**

En bond graph, le symbole **R** signifie un élément dissipatif quelconque. Pour inclure les effets thermiques, on ajoute à celui ci le symbole **S** comme source d'énergie. L'élément **RS** prend en effet en compte la génération de la chaleur. Cette structure conserve la puissance et le phénomène associé est irréversible.

L'élément **RS** modélise tout type de résistance qui génère de la chaleur, il se manifeste surtout par échauffement dans les phénomènes de frottement. On distingue le frottement mécanique, hydraulique, ou électrique dans une résistance. Le modèle bond graph de la dissipation de l'énergie thermique dans une restriction hydraulique a été considéré *Ould Bouamama & Thoma (2000)*. Cette section considère la dissipation de l'énergie thermique dans une restriction thermofluide.

La figure 2.14 représente le multiport **RS** en pseudo BG. Le flux thermique généré par la résistance par échauffement est représenté par le lien thermique  $(T_2 - \dot{Q})$ . En effet, l'augmentation de la température est souvent importante suite à une variation de la pression. L'énergie hydraulique  $P\dot{V}$  provoque un échauffement du fluide. Sur le modèle bond graph, le flux d'énergie dissipée par échauffement  $\dot{Q}$  modélisé par le multiport **RS** s'ajoute donc directement à la puissance thermique convectée  $\dot{H}_1$ . La température moyenne  $T_2$  du fluide est alors calculée par l'élément **C** de capacité thermique global  $C_f$ .



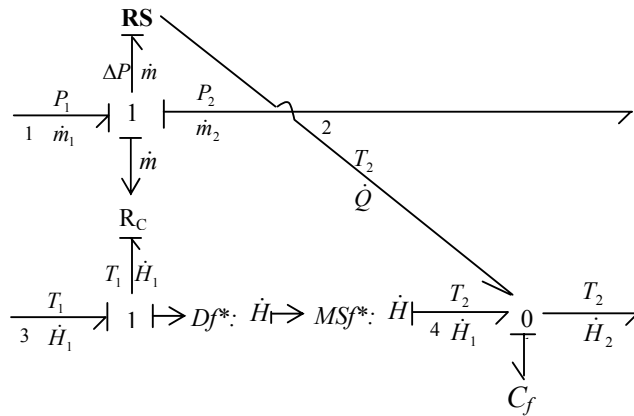
**Figure 2.14.** Bond graph de la dissipation de l'énergie thermique par une restriction thermofluide en utilisant un Multiport **RS**.

Les équations constitutives déduites du modèle bond graph donnent alors :

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= (P_1 - P_2)\dot{V} \\ T_2 &= \frac{1}{C_f} \int (\dot{Q} + \dot{H}_1 - \dot{H}_2) dt + T_2(0) = \frac{U}{mc_v} + T_2(0) \end{aligned} \quad (2.15)$$

avec,  $\dot{H}_2$  la puissance thermique convectée à la sortie de la résistance hydraulique, U l'énergie interne et m la masse du fluide dans le système.

Toutefois, comme la puissance dissipée  $\dot{Q}$  ne dépend que des variables hydrauliques  $\Delta P$  et  $\dot{m}$  le multiport **RS** peut être remplacé par un élément **RS** hydraulique (figure 2.15).



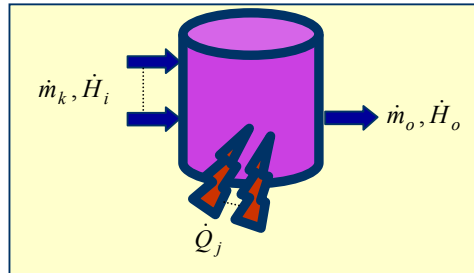
**Figure 2.15.** Bond graph de la dissipation de l'énergie thermique par une restriction thermofluide en utilisant un élément **RS** hydraulique.

**Remarque 2.4.1.** Si un multiport **C** se trouve en aval de la restriction, la capacité  $C_f$  peut être enlevée. Dans ce cas le lien  $(T_2, \dot{Q})$  sera directement attaché à la jonction 0 du multiport **C**.

### 2.4.1.3. Multiport **C** thermodynamique : accumulateur d'énergie

La figure 2.16 représente la représentation symbolique d'un accumulateur général soumis à des flux thermiques par convection  $\dot{H}_i (i=1..n)$ , par conduction  $\dot{Q}_j (j=1..r)$  et des flux

hydrauliques  $\dot{m}_k (k=1..n)$ .  $n$  et  $r$  sont le nombre des ports de flux par convection et par conduction respectivement.  $\dot{m}_o$  et  $\dot{H}_o$  sont respectivement le flux de sortie hydraulique et thermique. Dans les processus industriels, les multiports **C** représentent des accumulateurs d'énergies (chaudière, réservoir, ballons...) et sont associés à un stockage d'énergie thermique et hydraulique.



**Figure 2.16.** Représentation Symbolique d'un Multiport **C**.

En pseudo bond graph, le multiport **C** en thermodynamique mis en causalité intégrale comporte deux variables d'état : la quantité d'énergie thermique  $H_C$  (associée à la température) et hydraulique (la masse  $m_C$ ). Les équations constitutives d'un multiport **C** sont :

$$\begin{bmatrix} P_C \\ T_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{C1} \left( \int (\Sigma \dot{m}_k, \Sigma \dot{H}_i, \Sigma \dot{Q}_j, \dot{m}_o, \dot{H}_o) dt \right) \\ \Phi_{C2} \left( \int (\Sigma \dot{m}_k, \Sigma \dot{H}_i, \Sigma \dot{Q}_j, \dot{m}_o, \dot{H}_o) dt \right) \end{bmatrix}$$

où  $P_C$  et  $T_C$  sont la pression et la température du réservoir respectivement. En vrai BG, les variables d'états sont le volume de l'accumulateur  $V$  et l'entropie  $S$ . Les variables de puissance du multiport **C** sont la température (ou l'enthalpie spécifique) et le flux d'entropie (ou le flux d'enthalpie sur le lien thermique et la pression et le débit volumique (ou massique) sur le lien hydraulique. Ce phénomène de couplage entre les effets thermiques et hydrauliques est plus important pour les gaz.

Les fonctions  $\Phi_{C1}$  et  $\Phi_{C2}$  sont non linéaires et dépendent de l'état thermodynamique du fluide (état saturé ou non saturé). Ces modèles de processus industriels sont développés dans *Ould Bouamama et al. (1997)*, *Thoma & Ould Bouamama (2000)*, *El Osta et al. (2004b)*.

#### 2.4.1.3.1. Régime sous saturé (réservoir de stockage)

Considérons le cas d'un multiport **C** en régime sous saturé. Ce multiport modélise dans l'industrie la classe des processus d'accumulation d'énergie en particulier un réservoir de stockage par exemple pour le régime considéré. On considère que le système est à paramètres localisés (température moyenne répartie d'une façon homogène). La pression dépend de la variable de flux thermique  $\dot{H}$  et de la variable de flux hydraulique  $\dot{m}$  dans le cas saturé. Cependant, dans les systèmes étudiés, le fluide est supposé monophasique. Par conséquent la pression ne dépend que de la variable de flux hydraulique. Les équations liant les variables d'effort thermique  $T_C$  et hydraulique  $P_C$  avec les variables de pseudo déplacement thermique  $H_C$  et hydraulique  $m_C$  sont :

$$P_C = \frac{g}{A} \int \dot{m}_C dt = F_H(m_C) \quad (\text{Equation linéaire}) \quad (2.16)$$

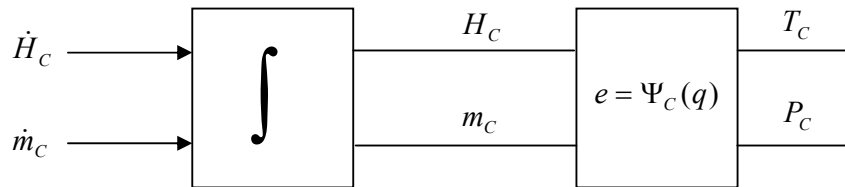
$$T_C = \frac{\int \dot{H}_C dt}{\int \dot{m}_C dt} = F_T(m_C, H_C) \quad (\text{Equation non linéaire}) \quad (2.17)$$

$g$  et  $A$  sont l'accélération de la pesanteur et la section du réservoir respectivement, deux autres relations entre les variables de flux peuvent être écrites :

$$\dot{m}_C = \Sigma \dot{m}_k - \dot{m}_o \quad (2.18)$$

$$\dot{H}_C = \Sigma \dot{H}_i + \Sigma \dot{Q}_j - \dot{H}_o \quad (2.19)$$

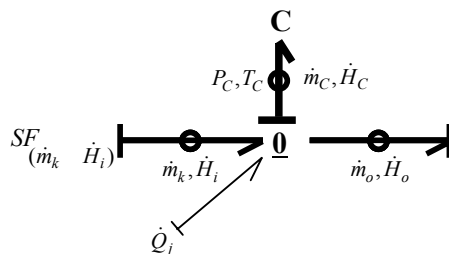
Le fluide étant sous saturé, il y a influence de l'énergie hydraulique sur l'énergie thermique. Une fois les variables de flux intégrées, les équations constitutives sont de la forme  $e = \Psi_C(q)$  comme dans les capacités, il faut donc intégrer les variables de flux afin d'obtenir les variables de déplacements correspondantes (thermique  $H_C$  et hydraulique  $m_C$ ) qui représentent les variables d'état (voir figure 2.17).



**Figure 2.17.** Chemin de détermination des équations constitutives du multiport  $C$ .

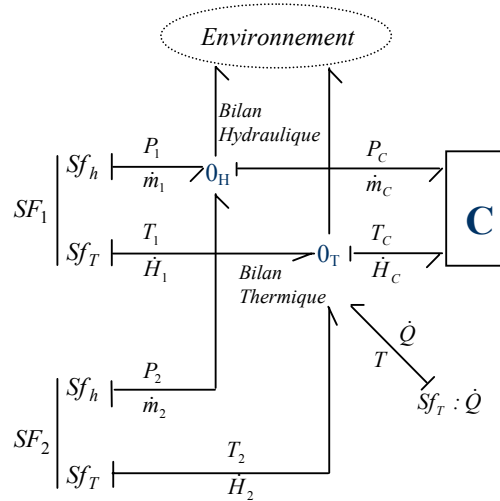
Le flux thermique par conduction n'intervient que dans le bilan thermique, il est modélisé par un BG simple. Par contre, le flux thermique par convection intervient dans le bilan thermique et dans le bilan hydraulique, il est modélisé sous forme vectorielle comme le montre la figure 2.18.

Un accumulateur est modélisé par un deux-ports  $C$ , les jonctions  $\underline{0}$  représentent la conservation des deux énergies : hydraulique ( $0_H$ ) et thermique ( $0_T$ ).



**Figure 2.18.** Modèle BG d'un multiport capacité (Causalité Intégrale).

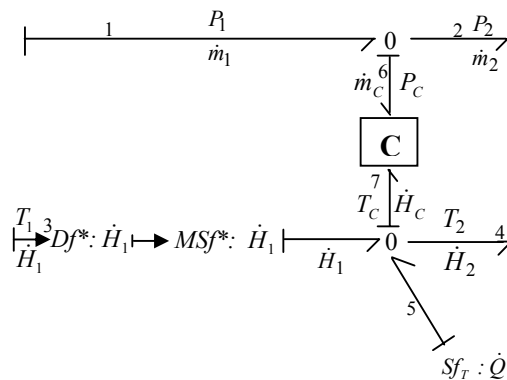
Le modèle éclaté d'un accumulateur général est donné par la figure 2.19.



**Figure 2.19.** Vue d'un accumulateur général soumis à des sources de flux de natures diverses.

Dans ce modèle bond graph, on a considéré deux sources de flux thermofluides par convection  $SF_1, SF_2$  ( $n = 2$ ) ( $SF_i = [Sf_{ih} \ Sf_{iT}]^T$ ,  $i=1, 2$ ) et une source de flux par conduction  $Sf_T : \dot{Q}$ . Les indices  $h$  et  $T$  désignent l'énergie hydraulique et thermique respectivement.  $Sf_h$  représente le flux massique et  $Sf_T$  le flux d'enthalpie. Suivant la causalité intégrale assignée, les sorties de l'accumulateur (figures 2.18 et 2.19) sont l'effort thermique  $T_C$  et l'effort hydraulique  $P_C$ .

Dans un circuit thermofluide, le multiport **C** est représenté comme le montre la figure 2.20.

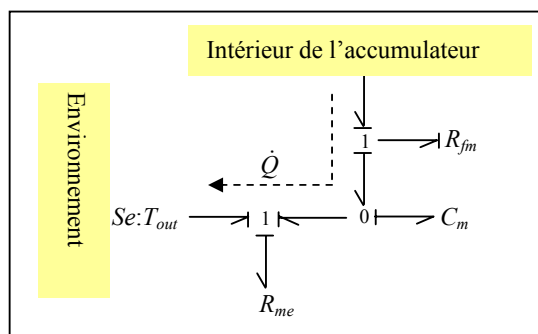


**Figure. 2.20.** Modèle non linéaire éclaté du multiport **C**.

Un détecteur et une source de flux fictifs sont employés. De cette façon, la température imposée du réservoir n'influencera pas la température du flux entrant ( $T_1 \neq T_2 = T_C$ ).

Le système d'instrumentation est constitué de deux types de capteurs dans les accumulateurs d'énergie : un capteur d'effort hydraulique  $De_H$  (de pression) et un capteur d'effort thermique  $De_T$  (de température).

Le transfert du flux thermique par conduction est une conséquence d'une variation des efforts thermiques imposés (un gradient de température). Si l'on considère qu'une partie de la chaleur est accumulée par la capacité thermique de l'enceinte  $C : C_m$ , le modèle bond graph de la conduction thermique est donné par la figure 2.21.  $R_{fm}$  modélise le flux thermique par conduction de l'intérieur de l'accumulateur vers l'enceinte et  $R_{me}$  de l'enceinte vers l'environnement.  $Se:T_{out}$  est une source d'effort constante désignant la température externe.



**Figure 2.21.** Liens Thermiques pour les phénomènes de conduction.

En présence d'une conduction thermique, ce modèle est connecté à la jonction 0 thermique de la figure 2.20 et le modèle obtenu est celui d'un accumulateur mal calorifugé où une partie de la chaleur est accumulée par l'enceinte et l'autre transférée vers l'atmosphère.

#### 2.4.1.3.2. Accumulateur de vapeur

Les accumulateurs de vapeur (ou chaudière) sont des composants industriels largement utilisés. Ils sont communément appelés chaudière ou générateur de vapeur. Un grand nombre de publications est consacré à ce type de processus industriel. Les modèles mathématiques d'une chaudière (ou générateur de vapeur) se différencient entre eux principalement par: les hypothèses posées, les équations employées, les méthodes de résolution, et les moyens de calcul. Nous pouvons toutefois les classer aussi en : modèles linéaires ou linéarisés, modèles non linéaires et modèles calculant ou non le volume d'eau dans l'accumulateur de vapeur. 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 intervenant sur cette variable. Ce phénomène est dû à l'effet de variation de la densité de la vapeur. Il introduit alors un déphasage non minimal très nuisible à la stabilité du système. Nous ne développons pas dans ce rapport ce phénomène qui se manifeste surtout dans les générateurs de vapeur industriels de grande dimension. La modélisation par bond graph d'un générateur de vapeur industriel dans le cadre d'un travail de recherche *Rimaux et al. (1996)*, a permis de visualiser par simulation ces phénomènes.

Pour une approche simple du problème, on adopte quelques hypothèses de modélisation :

- On considère le modèle de la chaudière comme un système à paramètres localisés.
- Le liquide et la vapeur dans chaque phase sont en équilibre thermodynamique (justifié par le fait qu'il se produit une bonne homogénéisation de l'émulsion eau-vapeur). Une approximation polynomiale en fonction de la pression est faite alors sur les variables thermodynamiques régissant le mélange eau –vapeur à saturation. Soient  $h, \rho, v$  et  $T$  l'enthalpie spécifique, la masse volumique, le volume massique et la température du mélange.  $h_l, h_v, \rho_l, \rho_v, v_l, v_v$  et  $T$  sont des polynômes en

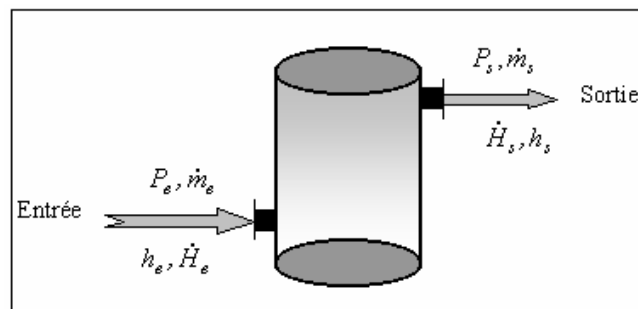
fonction de  $P$ , ils sont donc de la forme  $\sum \alpha_i P^i$  où les  $\alpha_i$  sont les coefficients de ces polynômes. Les indices  $l$  et  $v$  représentent liquide et vapeur.

- Le mélange est à une pression uniforme  $P$ , c'est à dire que nous négligeons l'effet des tensions superficielles des bulles de vapeur d'eau provoquant la variation de la pression du mélange.
- Le générateur de vapeur ne subit pas des pertes par conduction vers l'extérieur, le cas échéant le sous modèle donné par la figure 2.21 est inséré au niveau de la jonction  $0_T$ .
- Le mélange étant à saturation, on peut déterminer en équilibre thermodynamique, pour chaque température l'enthalpie correspondante. La chaleur spécifique  $c_p$  varie sensiblement avec la température, il sera alors difficile de calculer le flux d'enthalpie en fonction de  $c_p$  et  $T$ . Il suit alors qu'il est plus simple d'utiliser la paire flux d'enthalpie - enthalpie spécifique ( $h, \dot{H}$ ). De plus, ce choix permet de reconstituer d'autres variables tel que la qualité de la vapeur  $X$  (le titre de la vapeur<sup>1</sup>) dans un mélange diphasique *Ould Bouamama & Dauphin Tanguy (1996)* et d'utiliser ainsi en simulation les fonctions thermodynamiques.

En fonction du nombre de phases considérées dans la modélisation d'un accumulateur de vapeur on distingue un mélange diphasique à deux phases séparées et un mélange homogène.

#### *Un mélange diphasique homogène*

On considère qu'il se produit un mélange diphasique entre l'eau et la vapeur. Il n'existe pas en conséquence de séparation nette entre les deux phases. Notons que ce cas est plus fréquent dans les chaudières industrielles. L'accumulateur est modélisé par un élément  $C$  à deux ports. Ce multiport est associé à un stockage d'énergie (hydraulique et thermique) du mélange dans le réservoir. Comme on ne considère pas le stockage thermique par le corps de la chaudière, le sous modèle est en conséquence d'ordre deux. Le schéma de principe d'un accumulateur de vapeur est donné par la figure 2.22.



**Figure 2.22.** Schéma de principe d'un accumulateur de vapeur.

Considérons un système thermodynamique ouvert isolé adiabatiquement, en négligeant les énergies cinétiques et potentielles, la variation de l'énergie interne  $\dot{U}$  accumulée est :

<sup>1</sup> L'eau chauffée passe de l'état liquide à l'état vapeur saturée sèche. Entre ces deux états nous avons un mélange «vapeur + eau» appelé vapeur saturée ou vapeur saturée humide. La vapeur saturée est définie par son titre  $X$ . Ainsi, une masse de 1 kg de mélange au titre  $X$  contient  $(1-X)$  kg de liquide et  $X$  kg de vapeur. Si  $X=0$ , on est à l'état liquide et si  $X=1$  on n'a que de la vapeur saturée sèche.

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad (2.20)$$

où  $\dot{H}_e$  et  $\dot{H}_s$  sont les flux d'enthalpie à l'entrée et à la sortie du système.  $\dot{E}$  est la puissance fournie par le système sous forme de travail des forces de pression, égale au produit de la pression  $P$  par la variation du volume de la vapeur  $\dot{V}$  :

$$\dot{E} = -P\dot{V}$$

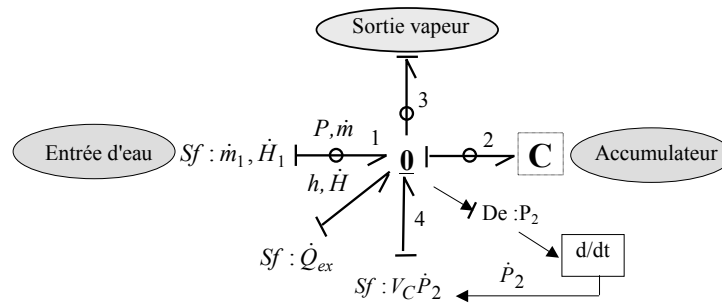
L'équation (2.20) devient alors :

$$\dot{U} = -P\dot{V} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad (2.21)$$

Si on introduit  $\dot{H}$  en qualité de variable de flux, le modèle bond graph multidomaine est donné par la figure 2.23. Il vient de l'équation (2.21) en remplaçant  $U$  par  $H-PV$  :

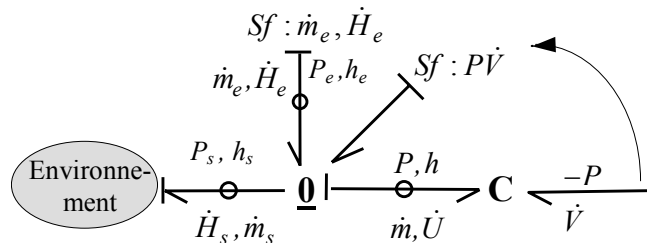
$$\dot{H} = V\dot{P} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad (2.22)$$

Il apparaît sur l'équation (2.22) une puissance fictive  $V\dot{P}$  qui ne peut être associée à aucun lien, mais qui est aisément calculée uniquement à partir du volume  $V$  (donnée géométrique) et de la pression  $P$  (qu'il faudra dériver) de l'accumulateur calculée par le multiport C. Cette puissance est représentée par une source de flux  $Sf : V\dot{P}$  modélisée par un lien simple.



**Figure 2.23.** Modèle bond graph d'un mélange eau-vapeur diphasique homogène

Ce modèle est le résultat d'un choix judicieux de la variable de flux thermique lors de la modélisation. En effet, le choix de  $\dot{U}$  comme variable de puissance fait apparaître sur le bond graph (figure 2.24) une variable d'état qui est le volume de vapeur  $V$ , d'où la nécessité d'un lien supplémentaire  $(P, \dot{V})$  dont la puissance hydraulique  $P\dot{V}$  vient moduler cette source de flux. Ce signal est le prix à payer pour lier un pseudo à un vrai bond graph *Karnopp (1979)*.



**Figure 2.24.** Modèle bond graph d'un accumulateur avec  $\dot{U}$  comme variable de flux

A partir du modèle bond graph présenté sur la figure 2.23, les équations constitutives de la jonction  $\underline{0}$  sont formées :

$$\begin{cases} m_2 = \int (\dot{m}_1 - \dot{m}_3) dt \\ H_2 = \int (V_C \dot{P}_2 + \dot{Q}_{ex} - \dot{H}_3 + \dot{H}_1) dt \end{cases} \quad (2.23)$$

Un système d'équations complémentaires du mélange diphasique homogène peut être ajouté :

$$\begin{cases} h_2 = \frac{H_2}{m_2} = h_v(P_2)X + h_L(P_2)(1-X) \\ v_2 = \frac{V_C}{m_2} = v_v(P_2)X + v_L(P_2)(1-X) \end{cases} \quad (2.24)$$

$h_L(P_2)$ ,  $h_v(P_2)$ ,  $v_L(P_2)$  et  $v_v(P_2)$  représentent respectivement les fonctions thermodynamiques de l'enthalpie et du volume massique dans la phase vapeur du liquide et de la vapeur. Elles sont déterminées par la méthode des moindres carrés à partir des tables d'équilibre eau vapeur.  $V_C$  est le volume géométrique de la chaudière qui est supposé égal à celui du mélange.  $X$  est la qualité (titre) du mélange (taux de la vapeur dans le mélange).

La résolution de (2.24) nous permet de déterminer non seulement la variable d'effort (pression  $P_2$ ) mais aussi le titre  $X$ , paramètre important dans les générateurs de vapeur industriels car, il nous permet de calculer la quantité d'eau  $m_l$  dans l'accumulateur :

$$m_l = m(1 - X) \Rightarrow V_l = \Phi(m_l) \quad (2.25)$$

ou éventuellement d'apprécier le niveau du liquide connaissant les dimensions géométriques de la chaudière. Un schéma de simulation de l'accumulateur de vapeur à deux phases séparées est donné dans *Ould Bouamama & Thoma (2000)*. Les équations d'état de ce type de mélange sont développées dans *Ould Bouamama (2003)*, deux choix des variables d'états sont considérés. Le premier choix  $x = (m_2, H_2)'$  conduit à une équation d'état simple et bien adaptée pour la détermination des RRAs. Cependant, elle ne permet pas d'estimer directement le volume d'eau du mélange et n'est pas bien adaptée pour la commande car les deux variables d'états ne sont pas mesurables directement. Le second choix  $x = (P_2, V_l)'$  permet le calcul direct du volume d'eau du mélange, mais le calcul du titre de la vapeur est compliqué et basé généralement sur la méthode des moindres carrées.

Le modèle bond graph multidomaine (dans notre cas thermique et hydraulique) peut être éclaté en deux domaines comme indiqué sur la figure (2.25). La jonction « $\underline{0}$ » du modèle couplé (figure 2.24) est alors décomposé en deux jonctions « $0_H$ » et « $0_T$ » modélisant respectivement la conservation d'énergie hydraulique ( $C : C_H$ ) et thermique ( $C : C_T$ ). Pour l'expression de la pression, on a considéré une colonne fictive quelconque. Soit  $V_{col}$  le volume et  $A$  la section de la colonne considérée, le mélange étant homogène la masse peut ainsi être exprimée comme suit :

$$m_{col} = \frac{V_{col}}{V_C} m \quad (2.26)$$

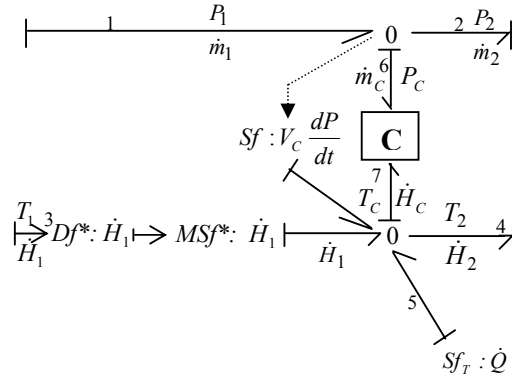


Figure 2.25. Modèle éclaté d'un mélange diphasique.

Examinons les équations constitutives, on peut écrire :

$$P_C = \frac{V_{col}}{V_C} \left( \frac{m g}{A} \right) = \frac{V_{col}}{V_C} \left( \frac{m_v g + m_l g}{A} \right) = \frac{1}{C_H} \int (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) dt \quad (2.27)$$

$$H_C = (1-X)mh_l + Xmh_v = f(T_C) \text{ avec } \dot{H}_C = \dot{H}_{in} - \dot{H}_{out} + \dot{Q} \quad (2.28)$$

Modèle bond graph d'un mélange diphasique à deux phases séparées

Le schéma de principe est donné par la figure 2.26 (a) et le modèle bond graph correspondant par la figure 2.26 (b).

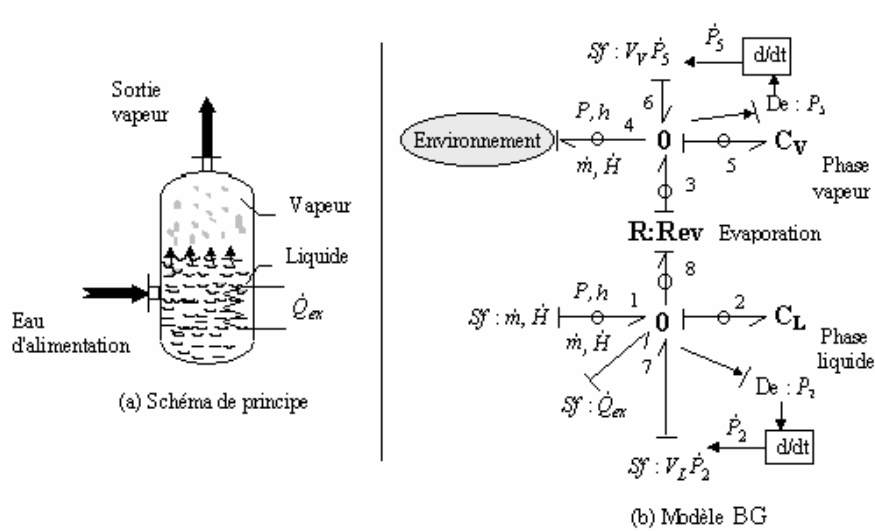


Figure 2.26. Accumulateur de vapeur à deux phases séparées.

On adopte les hypothèses de modélisation suivantes :

- Les phases eau et vapeur sont nettement séparées (ce cas peut se produire dans l'industrie en présence d'un séparateur de vapeur)

- On modélise en pseudo BG, nous avons déjà vu que l'utilisation d'un pseudo-bond graph avec les paires des variables de puissance  $(P, \dot{m})$  et  $(h, \dot{H})$  nous permet d'avoir accès à une autre variable importante qui est le titre de la vapeur et d'utiliser aisément les fonctions thermodynamiques en simulation.
- Le liquide et la vapeur dans chaque phase sont en équilibre thermodynamique avant le chauffage,
  - A l'état statique, les deux phases sont à pression uniforme,
  - A l'état dynamique (lors de la chauffe), il se produit une évaporation d'où la différence de pression entre les deux phases.
- Le liquide du circuit d'alimentation est incompressible
- La phase liquide vapeur se comporte comme un gaz réel

Un modèle non linéaire d'ordre quatre peut être obtenu. Les phénomènes de stockage et de dissipation d'énergie dans le système sont ici clairement représentés par les liens couplés d'énergie thermique  $(h, \dot{H})$  et hydraulique  $(P, \dot{m})$ . La puissance thermique de chauffe  $\dot{Q}_{ex}$  est représentée par un lien simple. Les deux phases eau et vapeur sont liées par le multiport R:Rev qui modélise le phénomène d'évaporation.

Les variables d'état concernent l'accumulation d'énergie dans les phases vapeur et eau, modélisées respectivement par les multiports  $C_V$  et  $C_L$  qui associent le stockage d'énergie thermique et hydraulique dans leurs phases correspondantes. Les termes  $V_V \dot{P}_2$  et  $V_L \dot{P}_5$  modélisés par les sources de flux ( $Sf$ ) sur les liens 6 et 7 représentent l'énergie mécanique de pressurisation due à la variation des pressions. Ces sources de flux sont calculées par un lien d'information donnant les pressions  $P_2$  et  $P_5$  (détecteur d'effort).  $De : P_2$  et  $De : P_5$  désignent les capteurs de pression dans les phases liquide et vapeur.  $V_L$  et  $V_V$  sont les volumes occupés par le liquide et la vapeur. Ainsi, le volume de la vapeur sera déterminé en fonction de la masse volumique  $\rho_V$  et celui du liquide sera déduit du volume géométrique de la chaudière  $V_C$ :

$$V_V = \frac{m_2}{\rho_V} \quad (2.29)$$

$$V_L = V_C - V_V$$

La masse volumique de la vapeur est déterminée aisément à partir de la table thermodynamique en fonction de l'enthalpie vapeur  $h_5$  :  $\rho_V = F_P(h_5)$ . La vapeur d'eau sort à la même enthalpie que celle de la vapeur stockée  $h_5$  ( $\dot{H}_4 = \dot{m}_4 h_5$ ).

– Equations constitutives du multiport  $C_L$

La phase liquide vapeur est considérée comme un gaz parfait de constante  $R$ . La pression  $P_{CL}$  et l'enthalpie spécifique  $h_{CL}$  qui correspondent au multiport  $C_L$  sont exprimées par les équations constitutives du multiport  $C_L$  mis en causalité intégrale (équation 2.31). L'effort thermique (enthalpie spécifique) est calculé en divisant l'enthalpie totale  $H_{CL}$  par la masse stockée correspondante  $m_{CL}$ . Ce multiport reçoit le couple  $(\dot{m}_{in}, \dot{H}_{in})$  en entrée et délivre en sortie le couple  $(\dot{m}_{ev}, \dot{H}_{ev})$ .

$$P_{CL} = P_l + P_v = \frac{V_{col}}{V_C} \frac{(1-X)mg}{A} + \frac{X.mRT_V}{V_V} = \frac{1}{C_{HL}} \int (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{ev}) dt + \frac{X.mRT_V}{V_V} \quad (2.30)$$

$$h_{CL} = \frac{H_{CL}}{m_{CL}}$$

avec  $C_{HL}$  la capacité hydraulique du multiport  $C_L$ .  $\dot{H}_{CL}$  est donné par l'équation suivante :

$$\dot{H}_{CL} = \dot{H}_{in} - \dot{H}_{ev} + \dot{Q}_{ex} + V_l \frac{dP_{CL}}{dt}$$

– Equations constitutives du multiport  $\mathbf{R} : \mathbf{R}_{ev}$

On considère qu'à l'interface phase liquide- phase vapeur se produit un échange par évaporation. Le débit d'évaporation est modélisé par le multiport  $\mathbf{R} : \mathbf{R}_{ev}$ . Le sens de la demi-flèche nous indique la direction du flux d'évaporation (de la phase liquide vers la phase vapeur). Les équations constitutives de ce multiport qui associe les phénomènes d'évaporation (de dissipation d'énergie) sont complexes et empiriques *Ordys et al. (1994)*. Elles calculent le débit massique et d'enthalpie d'évaporation (le flux d'enthalpie véhiculé est égal au produit du débit massique évaporé  $\dot{m}_{ev}$  par la chaleur latente d'évaporation  $L$ ):

$$\dot{m}_{ev} = K_{ev} (e_{H_{in}} - e_{H_{out}}) = K_{ev} (P_{ev} - P_v) = K_{ev} (f(T_{ev}) - \frac{X.mRT_V}{V_V}) \quad (2.31)$$

$$\dot{H}_{ev} = \dot{m}_{ev} (h_v - h_l) = \dot{m}_{ev} L = g(T_{ev})$$

avec  $L$  chaleur latente d'évaporation.

Cette approche considère, en effet, que le débit d'évaporation est proportionnel à la différence des pressions de la phase liquide  $P_l : P_{ev}$  et vapeur  $P_v$ . L'eau et la vapeur sont à saturation, les pressions  $P_l$  et  $P_v$  sont alors calculées en fonction des enthalpies correspondantes sur la base des tables ou des fonctions thermodynamiques  $f_p(h_l)$  et  $f_p(h_v)$ . Le coefficient de proportionnalité  $K_{ev}$  est déterminé par l'expérience. *Lamiri (2000)* trouve un moyen plus judicieux permettant de l'évaluer par l'écriture de l'équation de conservation du volume total dans le générateur de vapeur.

– Equations constitutives du multiport  $C_v$

La pression  $P_{CV}$  et l'enthalpie  $H_{CV}$  qui correspondent au multiport  $C_v$  sont exprimées par l'équation (2.32).

$$P_{CV} = \frac{1}{C_{HV}} \int (\dot{m}_{ev} - \dot{m}_{out}) dt = \frac{X.mRT_V}{V_V} \quad (2.32)$$

$$H_{CV} = X.mh_v$$

avec  $\dot{H}_{CV} = \dot{H}_{ev} - \dot{H}_{out} + V_V \frac{dP}{dt}$

Le modèle BG éclaté d'un mélange diphasique à deux phases séparées est donné par la figure 2.27. Deux résistances fictives  $R_1^*$  et  $R_2^*$  ont été ajoutées, elles modélisent respectivement une différence de pression  $P_{CL}$  et  $P_l$  et entre  $P_l$  et  $P_{ev}$ .

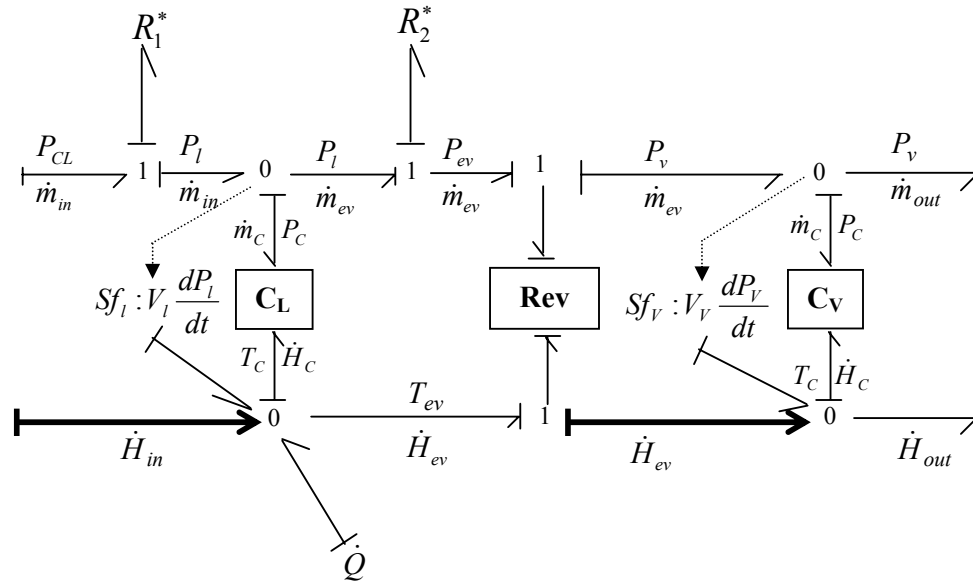


Figure 2.27. Modèle BG éclaté d'un mélange diphasique à deux phases séparées.

**Remarque 2.4.2.** Contrairement à l'évaporation, la condensation de la vapeur est supposée se produire par échange de chaleur avec un corps plus froid. Nous sommes alors en présence de deux phénomènes thermiques qui se déroulent simultanément : phénomène de conduction de la chaleur vers le fluide ou solide refroidissant et convection du condensât. Nous utilisons alors pour la simulation les paires  $(T, \dot{Q})$  et  $(h, \dot{H})$  pour la puissance thermique et  $(P, \dot{m})$  pour la puissance hydraulique. Un modèle bond graph détaillé est donné dans Ould Bouamama et al. (1997).

#### 2.4.1.4. Source thermofluide

Dans les systèmes thermofluides, le couplage des deux énergies est quantifié par l'équation (2.33).

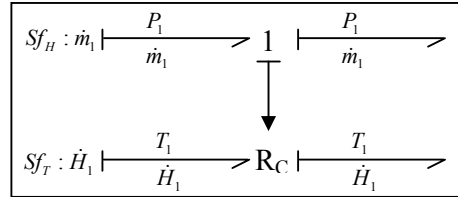
$$\dot{H} = \dot{m}h = \dot{m}C_p T = F(\dot{m}, T) \quad (2.33)$$

A travers cette équation, on voit que le flux thermique est une fonction du flux hydraulique et de l'effort thermique :

$$f_T = F(f_H, e_T) \quad (2.34)$$

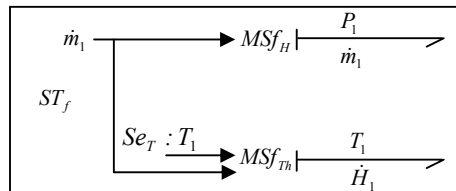
Dans la littérature Moksnes (1997), Karnopp et al. (1981) ce couplage est modélisé en introduisant une résistance fictive sur le lien thermique modulée par le débit fourni par le lien hydraulique (figure (2.28)). Alors que  $Sf_H : \dot{m}_1$  est un actionneur, le flux d'enthalpie ne se

représente pas une source physique mais une source énergétique *Karnopp et al. (1990)*, *Mukherjee & Karmakar (2000)*. Cette représentation ne met pas donc 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).



**Figure 2.28.** Modèle de source thermofluide proposé dans la littérature.

On propose de représenter la source thermofluide  $ST_f$  comme définie par la figure 2.29. Cette représentation est plus importante du point de vue physique et de l'analyse des systèmes de commande. En effet, ce modèle bond graph met en évidence les véritables actionneurs : le flux hydraulique  $Sf_H : \dot{m}_1$  (qui peut être fourni par une pompe), et éventuellement la source de température  $Se_T : T_1$  (fournie par une source extérieure).



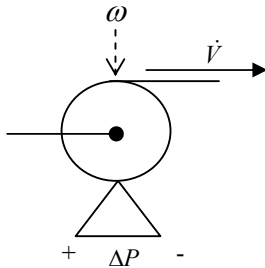
**Figure 2.29.** Source Thermofluide  $ST_f$ .

$Se_T : T_1$  peut être employée aussi en tant que paramètre si la température du fluide est constante.

#### 2.4.1.5. Éléments Mécaniques

Les pompes en tant qu'éléments mécaniques sont largement répandues dans les systèmes thermofluides. Une pompe est une source d'énergie qui dérive sa puissance à partir d'un moteur électrique. Dans ce mémoire, sont seulement considérées les pompes centrifuges, qui sont les plus répandues dans les systèmes thermofluides. Le détail d'un modèle décrivant la technologie d'une pompe dépend de son but. Des auteurs décrivent les pompes juste par une source d'effort ( $Se$ ) augmentant la pression d'entrée  $P_{in}$  par une quantité  $\Delta P$  *Tylee (1983)*. Dans une étude faite par *Thoma (1990)*, l'action essentielle d'une pompe hydrostatique est donnée par un transformateur entre la puissance mécanique et hydrostatique, ou par un MTF (transformateur modulé) en cas de vitesse réglable ou variable. *Mukherjee & Karmakar (2000)* conçoit la pompe comme un gyrateur avec quelques éléments parasites en termes de glissements et fuites. Dans ce chapitre, l'aspect mécanique de la pompe n'est pas modélisé.

La représentation symbolique d'une pompe est montrée sur le schéma 2.30.  $\omega$  est la vitesse de rotation,  $\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$  est l'écoulement hydraulique conduit par la différence de pression  $\Delta P$  et  $\rho$  est la densité du fluide.

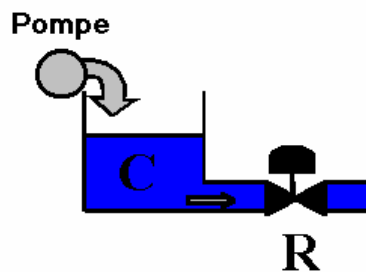


**Figure 2.30.** Représentation Symbolique d'une pompe.

Une pompe est caractérisée dans un modèle bond-graph par une source de flux. Selon sa position dans le circuit, elle peut avoir comme objectif de transporter le fluide (alimenter un réservoir), ou élever la pression si celle-ci est située ailleurs. Deux cas peuvent être considérés: les pompes externes et les pompes branchées dans un circuit thermofluide.

#### 2.4.1.5.1. Pompes externes

C'est le cas d'une pompe qui alimente le système d'une façon externe. Dans ce cas la pompe, comme le montre la figure 2.31, est considérée comme une source de flux. Le modèle BG est représenté par la figure 2.29.

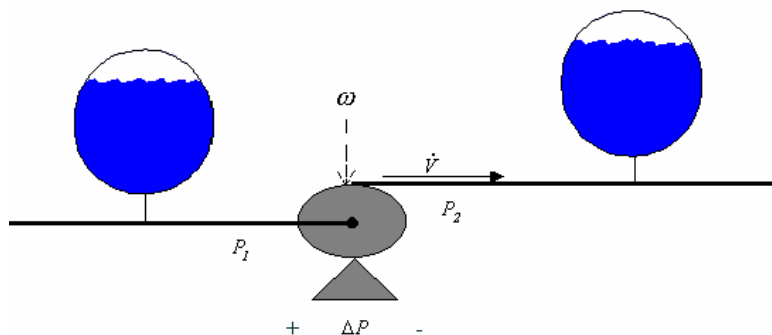


**Figure 2.31.** Schéma représentatif d'une pompe externe.

Le remplacement de la pompe par n'importe quelle autre source de flux (par exemple vanne) assurant le même débit ne change rien dans le modèle et en conséquence on ne s'intéresse qu'au deuxième cas.

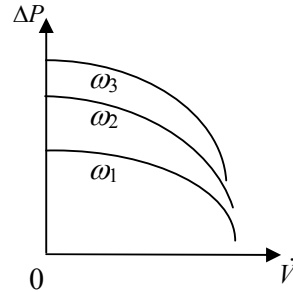
#### 2.4.1.5.2. Pompe branchée dans un circuit

Ce cas est présent dans la plupart des processus industriels en génie des procédés. C'est le cas d'une pompe branchée entre deux accumulateurs (par exemple), comme le montre la figure 2.32.



**Figure 2.32.** Pompe branchée entre deux accumulateurs.

Chaque pompe possède ses propres courbes caractéristiques liant la différence de pression ( $\Delta P$ ) et le débit volumique  $\dot{V}$  ( $dV/dt$ ) à différentes vitesses de rotation possible ( $\omega$ ) (figure 2.33).

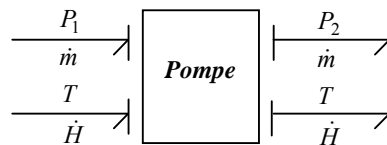


**Figure 2.33.** Courbe caractéristique d'une pompe centrifuge avec ( $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ ).

Basé sur la caractéristique d'une pompe (figure 2.33), voici quelques commentaires :

- une augmentation de la vitesse de rotation impliquera une augmentation de la pression,
- pour une vitesse de rotation donnée, la pompe peut être considérée comme une source de flux modulée par la différence de pression :  $MSf=f(\Delta P)$ .

Dans le cas d'un modèle d'une pompe, les multibonds liés à la pompe sont représentés par le schéma (2.34).



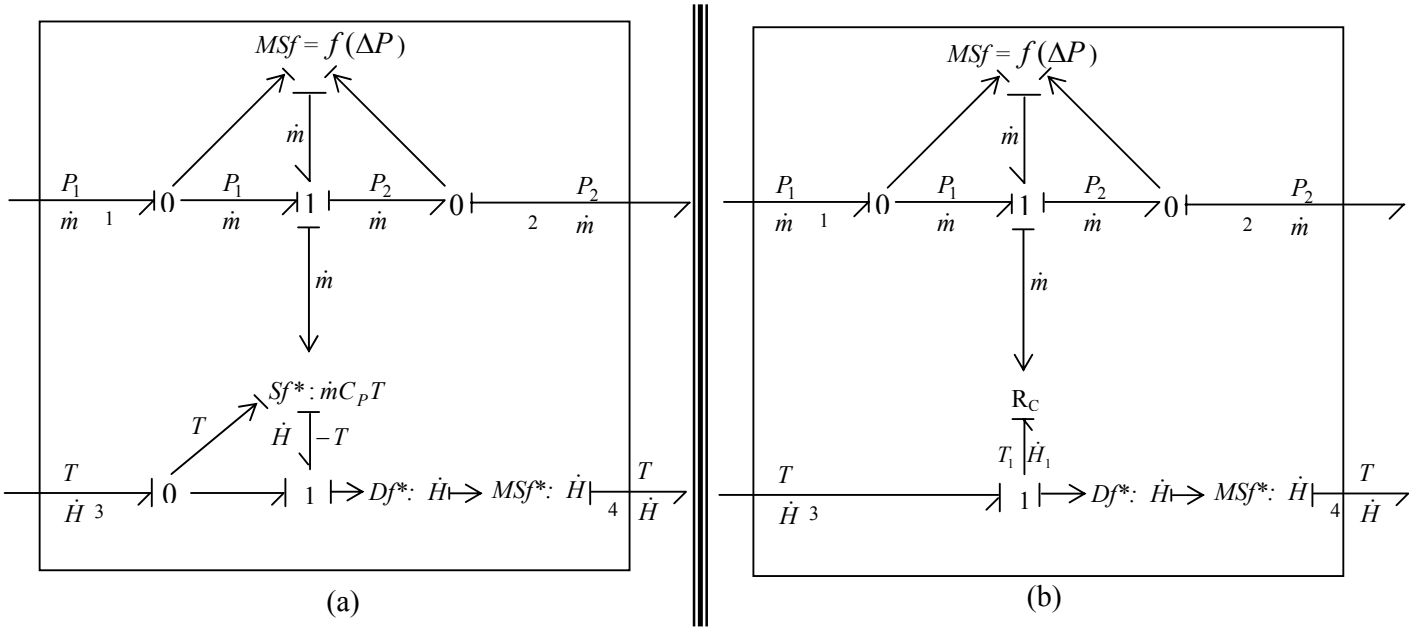
**Figure 2.34.** Schéma bloc d'une pompe branchée dans un circuit.

Le circuit impose les pressions amont et avale, la pompe en réaction impose le débit hydraulique. En supposant qu'il n'y a pas de perte thermique au niveau de la pompe, la pompe transporte l'énergie thermique du fluide qui dépend directement du débit volumique de la pompe caractérisée par l'équation (2.35).

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot C_p T = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p T \quad (2.35)$$

Le modèle BG correspondant est donné par la figure 2.35 (a) *El Osta et al. (2003b)*. La source de flux  $MSf$  liée à la jonction hydraulique 1 imposera sa valeur au circuit. Dans le but d'avoir accès à la valeur de  $\Delta P$ , les jonctions 0 ont été introduites au niveau hydraulique. La source de flux  $Sf^* : \dot{m} C_p T$  placée sur une jonction thermique 1 assure le flux  $\dot{H}$  dans les liens thermiques. Cependant, comme on a la même température à l'entrée et à la sortie de la pompe (pas de perte thermique,  $T_1 = T_2 = T$ ), un détecteur fictif ( $Df^* : \dot{H}$ ) et une source fictive

modulée ( $MSf^* : \dot{H}$ ) ont été introduites de façon à ne pas imposer une valeur d'effort nulle à  $Sf^*$ .



**Figure.2.35.** *Modèle Non linéaire d'une pompe branchée.*

Le modèle BG donné par la figure 2.35 (b) est équivalent à celui donné par la figure 2.35 (a). L'élément simple  $R_C$  modélise le couplage des énergies, il remplace le multiport à deux ports  $R_C$  (figure 2.28) et dépend aussi du débit massique  $\dot{m}$ . Ayant comme entrée la température d'entrée du fluide  $T_1$ , il fournit la valeur de l'enthalpie ( $\dot{H} = \dot{H}_1 = \dot{H}_2$ ). Les valeurs de pression en amont et aval de la pompe sont imposées par le circuit ce qui entraîne l'association de la causalité effort à la jonction 1.

Comme on considère qu'il n'y a pas de perte thermique, l'élément simple  $R_C$  est simplement un élément de couplage et non un élément dissipatif.

Le problème dans ce modèle est que la source de flux dépend de la variable complémentaire d'effort  $\Delta P'$  ce qui est contradictoire avec la définition habituelle d'une source de flux.

Une autre possibilité est de considérer la pompe comme une résistance non linéaire ( $R_P$ ) comme le montre la figure 2.36. La résistance modélise les courbes caractéristiques de la pompe (figure 2.33). Le modèle est le même que celui donné par la figure 2.9, mais en général une résistance doit être principalement employée pour modéliser les phénomènes de dissipation. En outre, une compressibilité du fluide à la sortie de la pompe (représentée par  $C_p$ ) et la fuite de pompe (représentée par  $R_i$ ) peut être ajoutée dans le modèle (voir le schéma 2.36).

En réalité, la pompe et la conduite (*sur laquelle la pompe est branchée*) forment un seul composant thermofluide. En modélisant l'ensemble (pompe + conduite), la sous partie thermique peut être négligée au niveau de l'un de ses éléments (pompe ou conduite), voir l'annexe B.

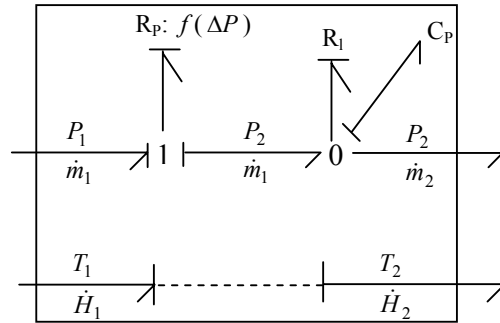


Figure 2.36. Modélisation d'une pompe par une résistance non linéaire.

### 2.4.2. La structure de jonction dans la représentation vectorielle

En génie des procédés, les jonctions sont vectorielles. La loi de conservation de la masse et de l'énergie est matérialisée par la jonction vectorielle 0 représentée sous forme soulignée (figure 2.19). Globalement, la conservation des énergies hydrauliques et thermiques est modélisée par la jonction vectorielle 0. Ces jonctions assurent l'égalité des variables d'effort. Les éléments multiports **R** (modélisant une conduite, vanne, phénomène de convection,...) sont attachés directement aux liens multi-énergies (figure 2.7 (a)). On trouve aussi les jonctions classiques 0, 1, TF, GY dans le cas de modélisation d'une seule énergie (conduction thermique).

### 2.4.3. Bond graph à Multiliens/ lien et semi-lien multiénergie

Le génie des procédés est caractérisé par le couplage des énergies de natures différentes (mécanique, chimique, thermique, hydraulique). Dans les systèmes thermofluides, le couplage des énergies hydraulique et thermique est modélisé par un multiport **R** fictif. D'autres auteurs utilisent un élément **R<sub>C</sub>** fictif placé sur le lien thermique et modulé par la variable de flux hydraulique  $\dot{m}$ . Ces deux représentations ne sont pas pratiques pour des modèles complexes, en outre l'élément **R** introduit des confusions avec des éléments résistifs (vannes, conduite, etc.). C'est pourquoi, nous préférons représenter le modèle multidomaine avec des liens couplés.

Les liens couplés ont été représentés différemment dans la littérature *Breedveld (1985)*, *Karnopp (1990)*, *Karnopp et al. (1981)*. Dans cette thèse nous avons adopté la représentation donnée par *Thoma & Ould Bouamama (2000)*, le couplage est ainsi représenté par un lien entouré d'un anneau.

Toutefois, la représentation des bond graphs à énergies couplées telle qu'elle est proposée dans la littérature introduit des ambiguïtés. En effet, le modèle BG donné par la figure 2.37 correspond à deux systèmes physiques différents (figure 2.42(a), 2.43(a)).

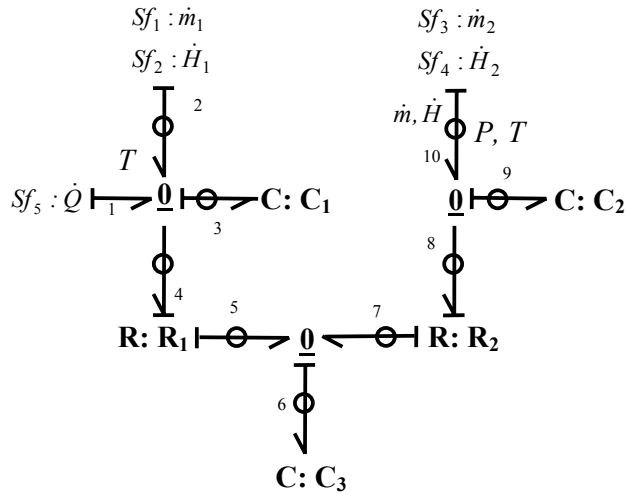


Figure 2.37. Un Modèle BG multiénergie.

Pour résoudre ce problème et afin que les modèles bond graphs à énergies couplées soient plus précis, nous introduisons la notion de semi-lien. Contrairement à un lien de puissance (lien causal) qui peut être traversés causalement dans les deux sens, on définit un semi lien (ou un lien d'information spéciale) comme suit :

**Définition 7.** Un semi-lien (ou un lien d'information spéciale) est un lien causal entre deux systèmes  $A$  et  $B$  en liaison, où seul le sous système  $A$  influe sur le sous système  $B$ . Il est représenté par un lien bond graph pointillé (figure 2.38 a) ou un lien d'information épais (figure 2.38 b). Le sens de la demi flèche (figure 2.38 a) ou de la flèche (figure 2.38 b) est fixée et supposée toujours sortant du système qui influe sur l'autre.

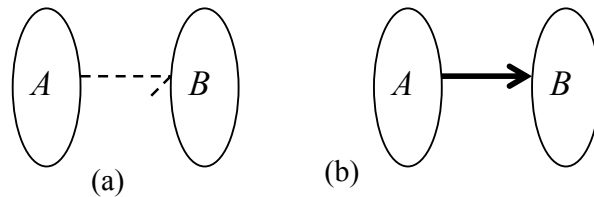


Figure 2.38. Lien d'information spéciale.

**Propriété 2.** Un semi-lien peut être représenté par un ensemble de liens causaux et de liens d'information (figure 2.39). Il est composé d'un capteur fictif installé au niveau du sous système  $A$  qui module une source fictive intervenant au niveau du sous système  $B$ .

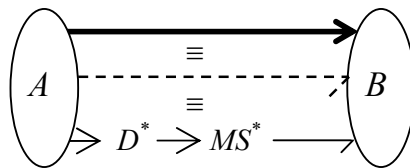
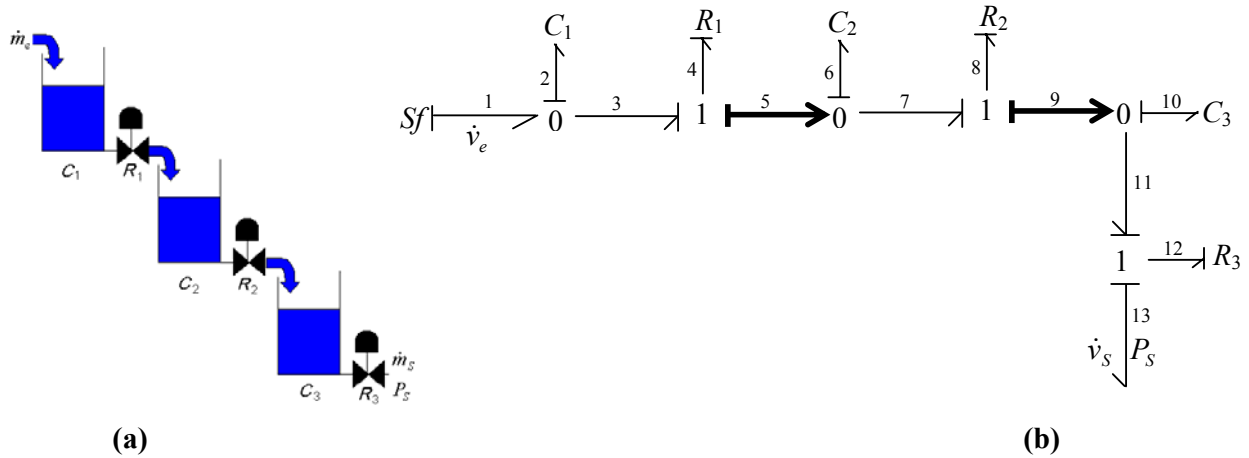


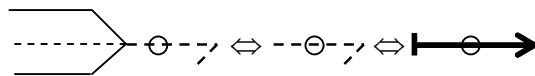
Figure 2.39. Lien d'information spéciale

**Exemple 2.4.1.** Considérons le système hydraulique de la figure 2.40 (a). La figure 2.40 (b) représente le modèle BG (en vrai bond graph) avec les semi-liens 5 et 9, la source de débit volumique d'entrée  $Sf : \dot{v}_e = \frac{\dot{m}_e}{\rho}$  ( $\dot{m}_e$  le débit massique et  $\rho$  la masse volumique du fluide), la pression imposée par la sortie  $P_S$  et le débit de sortie  $\dot{v}_S$ .



**Figure 2.40.** Système à 3 réservoirs (a), modèle BG (b).

**Définition 8.** Un semi-lien multiénergie est un lien causal multiénergie c'est à dire représentant le couplage des plusieurs énergies où au moins un de ses liens est un semi lien. Il est représenté par un semi-lien entouré d'un anneau comme indiqué sur la figure 2.41.



**Figure 2.41.** Un semi-lien multiénergie.

En génie des procédés, on trouve des semi-liens multiénergies de type thermofluide ou de type thermique.

**Définition 9.** Un semi-lien multiénergie de type thermique est un semi-lien multiénergie où seul le lien thermique est un semi-lien.

**Définition 10.** Un semi-lien multiénergie de type thermofluide est un semi-lien multiénergie où les deux liens hydrauliques et thermiques sont des semi-liens.

Pour distinguer les deux types de semi-liens en génie des procédés, on a gardé la représentation en pointillée pour le semi-lien multiénergie de type thermofluide et le lien d'information épais entourée d'un anneau pour le semi-lien multiénergie de type thermique.

**Exemple 2.4.2.** Considérons l'exemple illustré par le système thermofluide de trois réservoirs représenté sur le schéma 2.42 (a). Le réservoir  $C_1$ , alimenté par le débit massique  $\dot{m}_1$ , contient

de l'eau chauffée par une résistance délivrant une puissance thermique  $\dot{Q}$ . Le réservoir  $C_2$ , alimenté par le débit massique  $\dot{m}_2$ , contient de l'eau à la température ambiante. Les vannes  $R_1$  et  $R_2$  sont des vannes modulées ( $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  représentent les positions d'ouverture des vannes  $R_1$  et  $R_2$  respectivement). Le modèle bond graph non linéaire est donné par le schéma 2.42 (b).

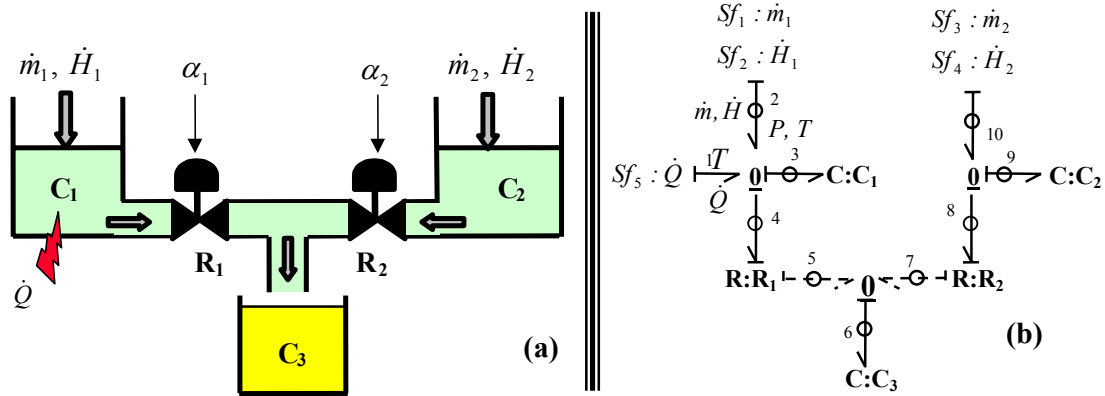


Figure 2.42. Représentation Symbolique (a), modèle BG Multiénergie (b).

Les liens multiénergies 5 et 7 sont des semi-liens multiénergies de type thermofluide. Chacun des deux est composé de deux semi-liens (un hydraulique et un thermique) modélisant le fait que le multiport  $C_3$  ne peut pas influencer sur les multiports  $C_1$  et  $C_2$  ni au niveau hydraulique ni au niveau thermique.

**Exemple 2.4.3.** Considérons l'exemple précédent, mais cette fois le réservoir  $C_3$  est branché à chacune des deux vannes  $R_1$  et  $R_2$ . La représentation symbolique et le modèle BG sont donnés par la figure 2.43.

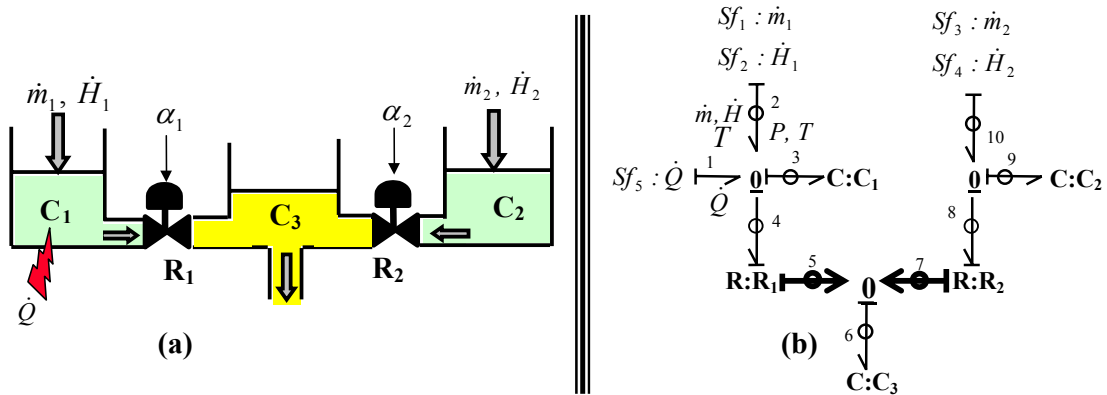


Figure. 2.43. Schéma du processus thermofluidique (a), le modèle BG correspondant (b).

Le modèle BG multiénergie est le même que celui donné par la figure 2.43 (b). Cependant les semi-liens multiénergies 5 et 7 sont de type thermique. Chacun d'eux est composé d'un lien causal hydraulique et d'un semi-lien thermique. Les semi-liens thermiques sont représentés par la figure 2.44, ils modélisent le fait que la puissance thermique est véhiculé par le flux hydraulique. Ceci revient à dire qu'« on ne peut pas chauffer l'eau tant qu'elle n'est pas encore arrivée au thermoplongeur ». En d'autres termes, un accumulateur ne peut pas imposer

sa température sur un fluide en amont de l'accumulateur par rapport au circuit thermofluide et donc le retour d'effort thermique doit être interdit dans ce sens. Cette interdiction du retour d'effort est signalée dans la figure 2.43 (b) par la présence des semi-liens thermiques 5 et 7.

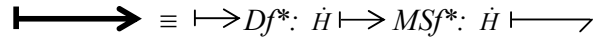


Figure 2.44. Un semi-lien thermique.

**Remarque 2.4.3.** En pseudo BG, ces semi-liens de flux thermique représentent une continuité de puissance.

**Définition 11.** En pseudo BG, un semi-lien est dit de puissance s'il représente une continuité de puissance. En conséquence, un semi-lien d'effort (respectivement de flux) est un semi-lien de puissance Ssi on choisit la puissance comme la variable d'effort (respectivement de flux).

### 2.4.4. Application : modèle BG non linéaire "découplé" d'un système à 3 réservoirs

Un exemple représentant la création générique de modèles BGs d'une installation thermofluide est donné. En vue de l'analyse des propriétés structurales des procédés énergétiques, un découplage servant à visualiser les interactions des différents phénomènes mis en jeu (hydraulique, thermique, chimique...) est nécessaire. Considérons l'exemple illustré par le système thermofluide de trois réservoirs (figure 2.43), le modèle BG découplé correspondant (figure 2.4) est obtenu par simple connexion d'une façon modulaire des sous modèles BGs des multiports **R** (figure 2.9 (b)), des multiports **C** (figure 2.21) et des sources thermofluides (figures 2.29) modélisant les composants technologiques.

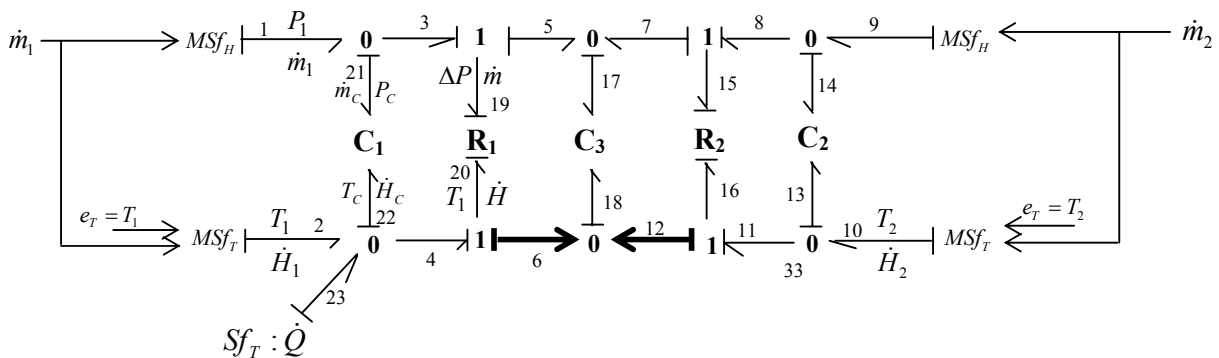


Figure 2.45. Modèle BG éclaté (Causalité Intégrale).

Une fois le modèle non linéaire global obtenu, il est facile d'obtenir le modèle linéarisé du processus considéré. En effet, la section suivante propose une méthodologie générique pour la linéarisation des processus complexes basée uniquement sur la linéarisation des sous modèles bond graphs des composants technologiques.

## 2.5. Génération de modèles linéarisés des processus thermofluides

Afin d'appliquer les techniques d'analyse des propriétés structurelles déduites du bond graph linéaire (commandabilité, observabilité et surveillabilité), les méthodes de linéarisation des bond graphs mono-énergies sont étendues aux bond graphs non linéaires à énergies couplées.

*Karnopp (1977)* décrit la linéarisation des différents composants des bond graphs sans aborder l'extension à la linéarisation du bond graph dans son ensemble. L'extension à la linéarisation du bond graph complet est développée par *Rimaux (1995)*, mais seulement pour les systèmes monoénergies. Le point de fonctionnement est imposé par les caractéristiques du processus, sa détermination se fait en écrivant les équations d'état non linéaire :

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

où  $t$  représente le temps,  $x(t)$  le vecteur d'état dont les variables sont associées aux éléments  $I$  et  $C$  sur le bond graph et  $u(t)$  le vecteur d'entrée.

La solution d'une telle EDO (équation différentielle ordinaire) n'est pas toujours évidente et nécessite que la fonction vectorielle  $f$  soit Lipschitzienne; pourtant la détermination du point d'équilibre ne demande que la résolution d'un système d'équation algébrique  $f(t, x_e(t), u_e) = 0$ .

La procédure de suivi des chemins causaux permet aussi d'exprimer le point de fonctionnement si le modèle bond-graph est déjà tracé *Rimaux (1995)*.

### 2.5.1. Méthodologie

Le travail qui m'a été confié concerne l'analyse des propriétés structurelles de modèle bond graphs de systèmes thermofluides. Dans ce cadre et pour utiliser les résultats développés dans l'équipe, nous proposons la démarche suivante (schématisée par la figure 2.46) :

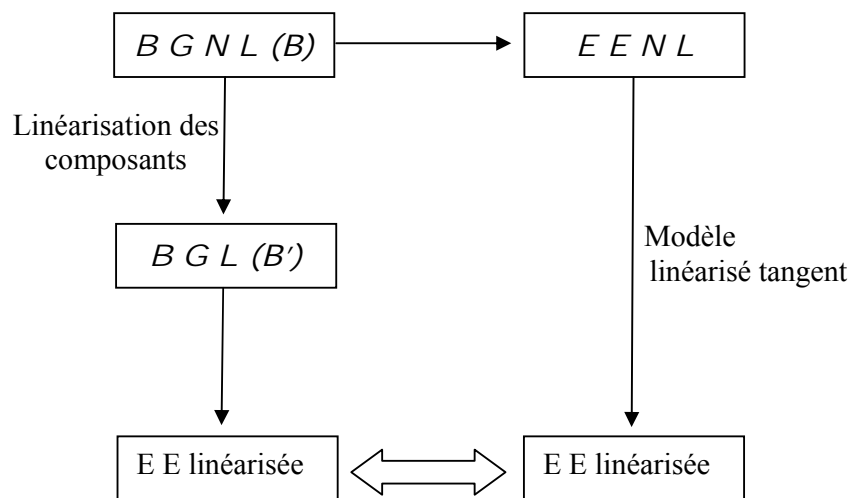


Figure 2.46. Chemins possibles pour la dérivation des équations d'état.

Pour linéariser des modèles non linéaires à énergies couplées (présents en génie des procédés), l'approche classique en automatique consiste à écrire l'équation d'état globale non linéaire (EENL) du système puis à la linéariser et obtenir ainsi un modèle linéarisé tangent (EEL). Cette procédure est évidemment complexe à réaliser dans le cas de procédés complexes constitués de l'interconnexion d'un ensemble de composants. En bond graph, il a été montré que le triplet ( A, B, C ) d'une équation d'état linéarisée (EEL) obtenue par un modèle linéarisé tangent par une approche classique est équivalent à celui obtenu (BGL) en linéarisant les composant du bond graph non linéaire (BGNL).

Nous avons alors exploité cette propriété pour la linéarisation d'un modèle complexe (au sens du couplage des deux phénomènes hydraulique et thermique et de la présence de multiport **C** et **R**) du processus thermofluide en obtenant uniquement les bond graphs linéarisés de chaque composant.

L'approche classique est évidemment complexe à réaliser dans le cas de procédés complexes constitués de l'interconnexion d'un ensemble de composants (multiports **C** et **R**). Par contre l'approche exploitée fournit le modèle linéarisé d'un système complexe en obtenant le bond graph linéarisé de chaque composant (classé selon une approche fonctionnelle plus haut et détaillé dans *Ould Bouamama (2001)*). Ces résultats seront utilisés au chapitre 3 pour déterminer les propriétés structurelles (commandabilité et observabilité) ainsi que les conditions de surveillabilité des actionneurs d'un modèle bond graph linéarisé sans générer les RRAs.

**Propriété 3.** *Pour les systèmes multiénergies, on ne peut pas changer la causalité directement sur le modèle linéarisé. En effet, le modèle linéarisé dépend lui même de la causalité affectée sur les différents composants multiports.*

*Preuve.*

Considérons par exemple un multiport **R** en causalité résistance, l'équation constitutive est de la forme :

$$e_R = \psi_R(f_R) \quad (2.36)$$

Si  $\psi_R$  est inversible, changer la causalité du multiport revient à écrire :

$$f_R = \psi_R^{-1}(e_R) \quad (2.37)$$

La linéarisation d'un multiport **R** en causalité résistance conduit à la forme matricielle suivante :

$$e'_R = \mathbf{IR} \cdot f'_R \quad (2.38)$$

**IR** est la matrice caractérisant le multiport **R** linéarisé en causalité résistance, elle est obtenue en dérivant la fonction non linéaire  $\psi_R$ .

Pareillement, la linéarisation d'un multiport **R** en causalité conductance conduit à la forme matricielle donnée par l'équation (2.40).

$$f'_R = \mathbf{IR}' \cdot e'_R \quad (2.39)$$

$\mathbf{IR}'$  est la matrice caractérisant le multiport  $\mathbf{R}$  linéarisé en causalité conductance obtenue en dérivant la fonction non linéaire  $\psi_R^{-1}$ .

Sur le corps des nombres réels, le produit de l'opérateur dérivé par l'opérateur inverse n'étant pas commutatif, la matrice  $\mathbf{IR}'$  n'est pas forcément la matrice inverse de  $\mathbf{IR}$  et trivialement par la suite on ne peut pas changer la causalité du multiport  $\mathbf{R}$  directement sur le modèle linéarisé. De même, ceci peut être montré pour n'importe quel multiport.

**Propriété 4.** *En régime sous saturé, l'énergie hydraulique ne dépendant pas de l'énergie thermique, le changement de causalité d'un BG thermofluide linéarisé au niveau hydraulique peut se faire d'une façon directe.*

### 2.5.2. Modèles Bond Graphs linéarisés des composants thermofluides

A titre illustratif, cette partie traite la linéarisation de l'élément dissipatif (le multiport  $\mathbf{R}$ ) en causalité conductance. Les deux régimes sous saturé et saturé ont été traités. Les autres composants seront traités dans le chapitre 5 pour la génération du modèle linéarisé global d'un générateur de vapeur.

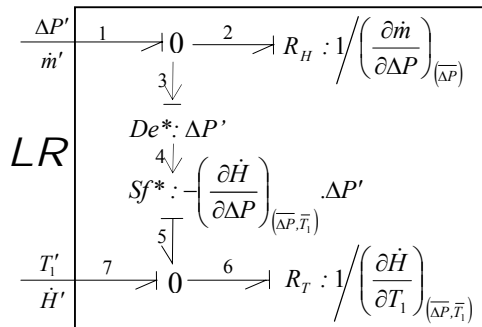
Considérons le cas d'une conduite thermofluide bien calorifugée en **régime sous saturé**. La linéarisation de Taylor des équations (2.6) et (2.7) autour du point d'équilibre  $(\Delta\bar{P}, \bar{T}_1)$  donne autour les relations (2.40) et (2.41).

$$\dot{m}' = \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta P} \right)_{(\Delta\bar{P})} \cdot \Delta P' \quad (2.40)$$

$$\dot{H}' = \left( \frac{\partial \dot{H}}{\partial \Delta P} \right)_{(\Delta\bar{P}, \bar{T}_1)} \cdot \Delta P' + \left( \frac{\partial \dot{H}}{\partial T_1} \right)_{(\Delta\bar{P}, \bar{T}_1)} \cdot T_1' \quad (2.41)$$

$\dot{m}'$ ,  $\dot{H}'$ ,  $\Delta P'$  et  $T_1'$  sont les variables linéarisées.

Le bond graph résultant d'un multiport  $\mathbf{R}$  linéarisé noté  $\mathbf{LR}$  pour « linearized R » est donné par la figure 2.47. Dans cette figure, le capteur fictif utilisé pour moduler la source de flux modulée (obtenue après la linéarisation) est représenté en ajoutant le signe « \* » dans le but de le distinguer des capteurs réels (même représentation pour les sources fictives).



**Figure 2.47.** Bond Graph Linearisé du multiport  $\mathbf{R}$ .

Une résistance hydraulique et une résistance thermique apparaissent dans le modèle linéarisé. Comme indiqué précédemment, en régime sous saturé seule l'énergie hydraulique peut influencer sur l'énergie thermique, ceci se matérialise ici par la présence des liens d'information dans un seul sens (hydraulique vers thermique).

Les paramètres  $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta P}\right)_{(\bar{\Delta P})}$ ,  $\left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial \Delta P}\right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1)}$  et  $\left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial T_1}\right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1)}$  sont déterminés en dérivant les équations (2.6) et (2.7) explicitement :

$$\dot{m}' = \frac{k}{2\sqrt{\Delta P}} \cdot \Delta P' = \frac{1}{R_H} \cdot \Delta P' \quad (2.42)$$

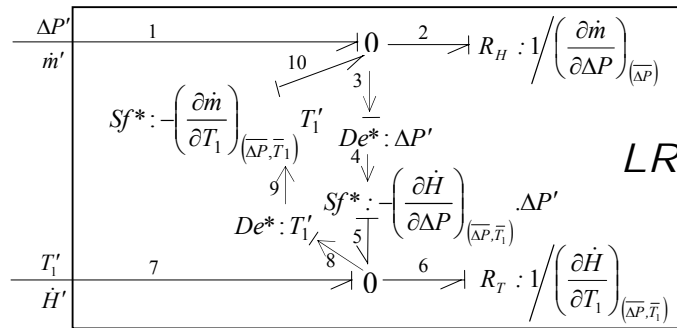
$$\dot{H}' = \frac{k}{2\sqrt{\Delta P}} C_p \bar{T}_1 \cdot \Delta P' + \bar{m} C_p \cdot T_1' = \frac{1}{R_H} C_p \bar{T}_1 \cdot \Delta P' + \frac{1}{R_T} \cdot T_1' \quad (2.43)$$

Les équations (2.40), (2.41), (2.42) et (2.43) donnent :

$$\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta P}\right)_{(\bar{\Delta P})} = \frac{k}{2\sqrt{\Delta P}} = \frac{1}{R_H}, \quad \left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial \Delta P}\right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1)} = \frac{k}{2\sqrt{\Delta P}} C_p \bar{T}_1 = \frac{1}{R_H} C_p \bar{T}_1 \quad \text{et}$$

$$\left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial T_1}\right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1)} = \bar{m} C_p = \frac{1}{R_T}.$$

Dans le **cas saturé**, alors que l'équation thermique (2.41) reste valide, la modification couvrira seulement l'énergie hydraulique. Le terme thermique  $\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial T_1}\right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1)} \cdot T_1'$  apparaît dans l'équation (2.40). Ce terme est caractérisé par une source fictive qui agit au niveau du bilan hydraulique. Le modèle linéarisé résultant est montré sur la figure 2.48.



**Figure 2.48.** BG linéarisé d'un multiport **R** (Causalité Conductance) en régime saturé.

## 2.6. Conclusion

Contrairement à la modélisation des systèmes à structure rigide (mécanique, électrique) qui a connu d'énormes progrès, la modélisation des systèmes thermodynamiques 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 des variables de puissance n'est pas trivial et dépend du système à modéliser. Néanmoins, ces processus présents dans plusieurs types d'industries à risques (nucléaire, chimique, ...) nécessitent pour leur surveillance des modèles précis et exploitables d'une part et des outils d'analyse performants d'autre part.

Dans un premier temps, une représentation vectorielle des processus multiénergies est donnée. Cette représentation multiénergie est valable pour les modèles non linéaires ainsi que pour les modèles linéarisés. Pour les systèmes thermofluides, un découplage des énergies est utile pour l'analyse et l'étude de la surveillabilité. Dans ce cadre, après avoir défini les variables de puissance pour les systèmes thermodynamiques et classifié les éléments simples et multiports, une représentation vectorielle découplée d'un système thermofluide est proposée. Elle concerne les systèmes thermofluides en régime saturé et sous saturé. Dans un second temps, la modélisation bond graph des éléments thermofluides pour la génération du modèle bond graph global de n'importe quelle installation à partir uniquement des PIDs est proposée. En effet, le modèle BG à surveiller est établi en reliant d'une façon modulaire le modèle BG générique de chaque composant

Le bond graph est aussi un outil d'analyse, des procédures d'analyse structurelle sont largement développées mais pour des modèles bond graphs linéaires monoénergies (commandabilité, observabilité, surveillabilité). Afin d'appliquer ces procédures en génie des procédés, le présent chapitre propose une démarche de linéarisation des modèles bond graphs des composants thermofluides afin de générer d'une façon systématique les modèles linéarisés globaux des installations industrielles. Pour la linéarisation des composants, nous nous sommes inspiré de l'approche de Karnopp *Karnopp et al. (1990)*, nous avons alors linéarisé séparément les différents multiports constitutifs. Le modèle global linéarisé peut être ensuite obtenu en connectant chaque composant. Au chapitre 5, une implémentation informatique sur le logiciel SYMBOLS 2000 permet la génération du modèle dynamique linéarisé d'un process d'une façon générique.

L'intérêt de cette approche, mis en évidence dans le chapitre suivant, est de pouvoir étudier très simplement des problèmes d'analyse de propriétés structurelles locales pour des systèmes non linéaires notamment celles de la surveillabilité (possibilité de détecter et d'isoler les défaillances des sources et des fautes physiques dans les procédés énergétiques).

# Chapitre 3

## ***Analyse structurelle des modèles bond graphs multiénergies linéarisés***

### **3.1. Introduction**

Les processus thermofluides réels étant en général régulés autour d'un point de fonctionnement, leurs modèles linéarisés sont valides. Les paramètres de ces modèles (capacités thermiques, coefficients hydrauliques, coefficients d'échange thermique...) ne sont pas connus. En outre, ils ne peuvent pas facilement être fixés en raison de la non stationnarité de ces processus due à la variation de ces paramètres (phénomènes d'entartrage dans les conduites, vieillissement des équipements, .....). Par conséquent, la détermination directe des propriétés structurelles (commandabilité, observabilité, surveillabilité) sans calcul numérique préalable est utile pour l'analyse, la synthèse des lois de commande et la surveillance de tels processus. Ce chapitre concerne l'analyse structurelle et la surveillance des modèles bond graph thermofluides linéarisés. L'analyse de la surveillabilité que nous proposons concerne les défauts additifs (actionneurs et capteurs) ainsi que les défauts multiplicatifs (défauts composants).

La méthodologie BG est largement répandue pour la modélisation, cependant peu de travaux traitent la surveillance des systèmes complexes à l'aide de l'outil BG. Initialement, le BG a été employé principalement pour la modélisation, et le modèle obtenu est utilisé pour faire de l'analyse (commandabilité/ observabilité). Plus tard le BG a été employé pour faire de la surveillance en générant les relations de redondances analytiques (RRAs). Basée sur les propriétés causales de la topologie graphique du modèle BG, une autre approche permet l'étude de la surveillabilité sans générer les RRAs *Tagina (1995)*. Malheureusement, cette technique ne considère que les défauts additifs (défauts de capteurs ou d'actionneurs) dans les systèmes linéaires modélisés par BG. Pour les défauts multiplicatifs (au niveau des composants physiques), l'étude de la surveillabilité dans les systèmes en génie des procédés n'est pas encore bien développée en utilisant une approche BG.

Une étude de la représentation vectorielle du modèle bond graph linéarisé et de la forme particulière de ses matrices d'état permet de déduire directement les propriétés structurelles d'analyse et de diagnosabilité. Pour les propriétés structurelles de commandabilité et d'observabilité, il a été montré que pour une classe de systèmes thermofluides, l'analyse du modèle global se fait au niveau hydraulique. Au niveau FDI, des techniques directes ont été établies en considérant séparément les défauts actionneurs, les défauts composants et les défauts capteurs. Plus particulièrement, on montrera également que pour une classe de systèmes thermofluides l'étude de la diagnosabilité des actionneurs se limite au sous modèle

thermique. L'approche développée dans ce chapitre peut être facilement appliquée à n'importe quel processus thermofluide grâce à la généralité des modèles bond graphs (cf. chapitre 2).

Le chapitre est organisé comme suit : après une description de la représentation vectorielle du modèle bond graph linéarisé, le cas des systèmes thermofluides est considéré. Après le rappel sur les procédures d'analyse des propriétés structurelles donné au chapitre 1, une extension aux bond graphs à multiport est considérée. Pour une classe de systèmes thermofluides, l'étude des matrices d'état du modèle linéarisé nous permet de conclure sur les propriétés structurelles. En conclusion et à titre illustratif, ces méthodes sont appliquées au système hydraulique simple considéré au chapitre 1. Les relations de redondance analytiques générées pour cet exemple vérifient notre démarche. Au chapitre 5, ces résultats seront illustrés sur le modèle bond graph couplé du site pilote du générateur de vapeur.

### 3.2. Représentation vectorielle du modèle BG linéarisé

La linéarisation des différents composants des bond graphs a été décrite par *Karnopp (1977)* et développée plus tard par *Rimaux (1995)* pour les systèmes monoénergies. La linéarisation des modèles bond graphs multiénergies a été développée au chapitre 2. Le point de fonctionnement est fixé par les caractéristiques des différents multiports. Grâce à des sources fictives introduites dans le modèle linéarisé, le bilan global d'énergie reste cohérent.

*Karnopp (1977)* part du bloc diagramme représentant les interconnexions des différents éléments du modèle bond graph pour déterminer la matrice de structure. Basés sur les notions de chemins causaux et de boucles causales, les différents termes des différentes matrices de l'équation d'état peuvent être calculées. Plus tard, *Rahmani et al. (1997)* ont développé une méthode pour la détermination graphique de l'équation d'état en présence d'éléments en causalité dérivée. Ce paragraphe traite la représentation vectorielle (le bloc diagramme) du modèle BG linéarisé. Une extension aux systèmes thermofluides linéarisés est donnée par la suite. Grâce à ces représentations, des propriétés intéressantes concernant le triplet  $(A, B, C)$ , la commandabilité, l'observabilité et la surveillabilité sont ainsi obtenues.

L'équation d'état d'un système non linéaire (monoénergie ou multiénergies) peut être écrite sous la forme:

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \quad (3.1)$$

où  $t$  représente le temps,  $x(t)$  le vecteur d'état dont les variables sont associées aux éléments  $I$  et  $C$  (ou aux multiports dynamiques) et  $u(t)$  est le vecteur d'entrée.

Pour les systèmes linéarisés invariants (MIMO), la représentation d'état est une équation différentielle vectorielle d'ordre 1, elle se présente autour du point de fonctionnement  $(\bar{x}, \bar{u}, \bar{y})$  comme donnée par l'équation (3.2).

$$\begin{aligned} \dot{x}'(t) &= Ax'(t) + Bu'(t) + B'S^* \\ y'(t) &= Cx'(t) + Du'(t) + D'S^* \\ y^*(t) &= C^*x'(t) + D^*u'(t) + \alpha^*S^* \end{aligned} \quad (3.2)$$

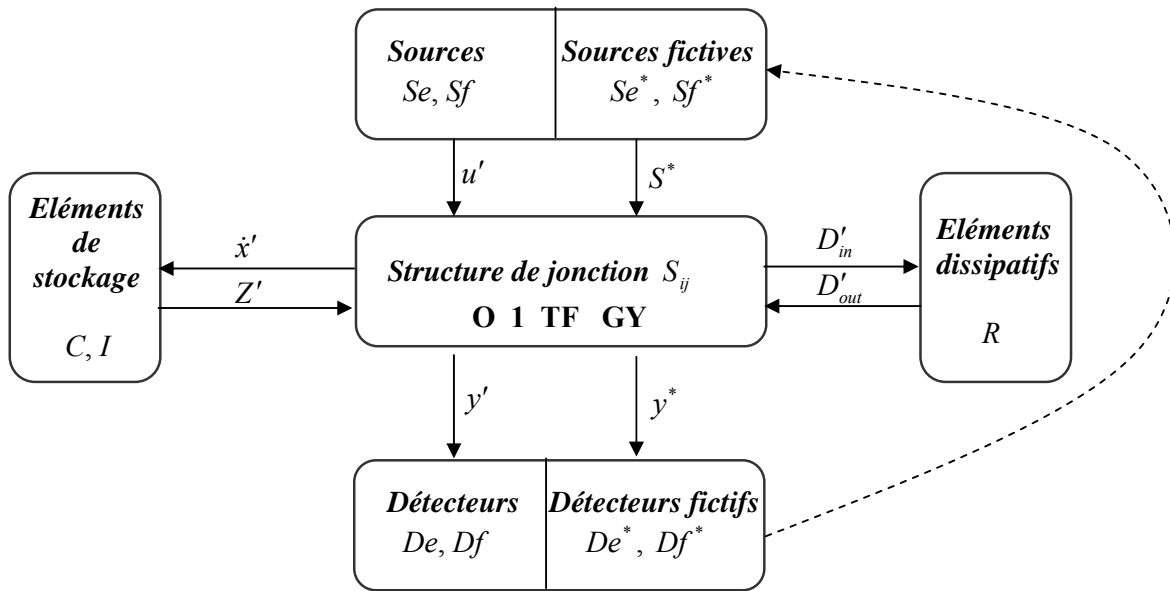
avec  $(x'(t) = x - \bar{x}) \in R^n$  le vecteur d'état linéarisé du système,  $(u'(t) = u - \bar{u}) \in R^m$  le vecteur regroupant les entrées de commande du système,  $(y'(t) = y - \bar{y}) \in R^p$  le vecteur regroupant les variables à commander du système.  $S^*$  et  $y^* \in R^{N^*}$  représentent respectivement le vecteur des sources fictives et des détecteurs fictifs issus de la linéarisation.

Les matrices  $A, B, C, D$  sont appelées respectivement matrice d'état, matrice d'entrée, matrice de sortie et matrice de transmission directe. On appelle  $B'$  la matrice d'entrée fictive,  $D'$  la matrice de transmission directe d'entrée fictive,  $C^*$  la matrice fictive de sortie,  $D^*$  la matrice fictive de transmission directe et  $\alpha^*$  la matrice fictive de transmission directe d'entrée fictive. Toutes les matrices sont de dimensions appropriées. Cette forme facilite le découplage des énergies quand il s'agit des modèles multiénergies (cas des systèmes thermofluides).

L'objectif de la section suivante est de déterminer d'une manière graphique, l'équation d'état sous la forme canonique (3.2).

### 3.2.1. Généralisation

Nous allons déterminer les matrices de l'équation d'état en partant du bloc diagramme donné dans *Rosenberg & Karnopp (1983)* (dont tous les éléments dynamiques initiaux sont en causalité intégrale), sur lequel nous faisons apparaître les sources et détecteurs fictifs issus de la linéarisation (figure 3.1).



**Figure 3.1.** Représentation bloc diagramme d'un BG linéarisé avec les sources fictives.

Soit :

- $D'_{in}$  et  $D'_{out}$  les vecteurs regroupant les efforts et les flux respectivement entrants et sortants pour les éléments dissipatifs  $R$  (voir chapitre 1 pour plus de détail),
- $\dot{x}'$  le vecteur d'état linéarisé et  $Z'$  le vecteur complémentaire.

**Hypothèse 3.** On suppose qu'il y a pas de chemin causal entre des éléments R.

Quelques relations peuvent être énoncées :

$$\begin{aligned} D'_{out} &= LD'_{in} \\ Z' &= Fx' \\ y^* &= K^{-1}S^* \end{aligned} \quad (3.3)$$

$L$  est une matrice diagonale composée de gains de la forme  $R_j, j = 1 \dots N_R$  et  $1/R_k, k = 1 \dots N_{1/R}$ .  $N_R$  et  $N_{1/R}$  sont respectivement les nombre d'éléments R en causalité résistance et conductance.  $F$  une matrice diagonale composée des gains des éléments dynamiques sans l'opérateur de Laplace  $1/I_i, i = 1 \dots N_I$  et  $1/C_j, j = 1 \dots N_C$ .  $K^{-1}$  est l'inverse de la matrice de modulation, elle est diagonale et de la forme  $1/k_i, i = 1 \dots N^*$  avec  $N^*$  le nombre de couples sources fictives - capteurs fictifs.

La matrice de structure prend la forme:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ D'_{in} \\ y' \\ y^* \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{31} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{43} & S_{44} & S_{45} \\ S_{51} & S_{53} & S_{54} & S_{55} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Z' \\ D'_{out} \\ u' \\ S^* \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Comme on suppose qu'il n'y a pas d'élément dynamique en causalité dérivée, la deuxième ligne et la deuxième colonne ont été supprimées de la matrice de structure donnée au chapitre 1.

Suites aux hypothèses faites, quelques relations supplémentaires concernant la matrice de structure  $S$  peuvent être citées:

$$\begin{aligned} S_{11} &= -S'_{11} \\ S_{33} &= 0 \end{aligned}$$

A partir de l'équation (3.4) et des relations (3.3), on obtient :

$$\dot{x}' = (S_{11} + S_{13}LS_{31})Fx' + (S_{14} + S_{13}LS_{34})u' + (S_{15} + S_{13}LS_{35})S^*, \quad (3.5)$$

$$y' = (S_{41} + S_{43}LS_{31})Fx' + (S_{44} + S_{43}LS_{34})u' + (S_{45} + S_{43}LS_{35})S^* \text{ et} \quad (3.6)$$

$$y^* = (S_{51} + S_{53}LS_{31})Fx' + (S_{54} + S_{53}LS_{34})u' + (S_{55} + S_{53}LS_{35})S^*. \quad (3.7)$$

### 3.2.2. Cas des systèmes thermofluides

**Hypothèse 4.** On considère les modèles présentés dans le chapitre 2 (ne comportant pas de transformateur ou de gyrateur). Soit  $n$  le nombre d'accumulateurs dans un système

thermofluide. A partir du PID, numérotons selon la direction de la puissance thermique les composants de stockage et les composants dissipatifs. Soient  $x_1$  et  $x_{n+1}$  respectivement la masse et l'enthalpie dans le réservoir 1 (en amont), et  $x_n$  et  $x_{2n}$  sont respectivement la masse et l'enthalpie dans le réservoir  $n$ . Les autres variables  $x_i$  et  $x_{i+1}$  sont associées aux réservoirs "intermédiaires". Désignons par  $u_1$  à  $u_p$  les  $p$  entrées associées aux actionneurs hydrauliques,  $u_{p+1}$  à  $u_{p+q}$  les énergies thermiques associées aux actionneurs thermiques numérotés suivant la direction de l'écoulement de la puissance thermique. Les capteurs hydrauliques et thermiques portent la numérotation du composant sur lequel ils sont installés.

En génie des procédés deux énergies se manifestent, l'énergie hydraulique et l'énergie thermique. Le couplage de multiples domaines énergétiques ainsi que la caractéristique des composants des processus réels introduisent des non linéarités (équation 3.8).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = g(x(t), u(t)) \end{cases} \quad (3.8)$$

avec  $x(t) = \begin{bmatrix} x_H \\ x_T \end{bmatrix}$  et  $u(t) = \begin{bmatrix} u_H \\ u_T \end{bmatrix}$ .

$x_H$ ,  $x_T$ ,  $u_H$ ,  $u_T$  représentent respectivement le vecteur d'état hydraulique, le vecteur d'état thermique, les sources hydrauliques et l'énergie thermique fournie par les actionneurs.

Les équations d'état d'un modèle linéarisé en génie des procédés sont données par :

$$\begin{cases} \dot{x}'(t) = Ax'(t) + Bu'(t) \\ y'(t) = Cx'(t) + Du'(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

Les matrices  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  peuvent être décomposées comme suit :

$$A = \begin{pmatrix} A_H & A_{HT} \\ A_{TH} & A_T \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_H & B_{HT} \\ B_{TH} & B_T \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} C_H & C_{HT} \\ C_{TH} & C_T \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} D_H & D_{HT} \\ D_{TH} & D_T \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$A \in R^{n_H+n_T} \times R^{n_H+n_T}, \quad A_H \in R^{n_H} \times R^{n_H}, \quad B \in R^{n_H+n_T} \times R^{m_H+m_T}, \quad B_H \in R^{n_H} \times R^{m_H}, \\ C \in R^{P_H+P_T} \times R^{n_H+n_T}, \quad C_H \in R^{P_H} \times R^{n_H}, \quad D \in R^{P_H+P_T} \times R^{m_H+m_T}, \quad D_H \in R^{P_H} \times R^{m_H} \text{ avec :}$$

- $n_H$  le nombre d'état hydrauliques (égal au nombre d'états thermiques  $n_T$  si les accumulateurs sont bien calorifugés),
- $n = n_H + n_T$  est le nombre total d'état,
- $m_H$  est le nombre d'actionneurs hydrauliques de type 1 et 2,  $m_T$  le nombre d'actionneurs thermiques par convection de type 1 et le nombre d'actionneurs thermiques par conduction ( $m = m_H + m_T$  est le nombre total d'actionneurs),
- $P_H$  le nombre de sorties hydrauliques,  $P_T$  le nombre de sorties thermiques hydraulique ( $P = P_H + P_T$  est le nombre total de sorties).

Les sous matrices  $A_{HT}, A_{TH}, A_T, B_{HT}, B_{TH}, B_T, C_{TH}, C_{HT}, C_T, D_{TH}, D_{HT}, D_T$  sont de dimensions appropriées. En régime sous saturé, les sous matrices  $A_{HT}, B_{HT}, C_{HT}$  et  $D_{HT}$  sont nulles indiquant que l'énergie hydraulique ne dépend pas de l'énergie thermique.

Un découplage des énergies permettant de considérer chacune des deux énergies séparément est utile pour l'étude des propriétés structurales. La linéarisation de ces processus permet d'avoir un découplage de ces énergies. Grâce à des détecteurs et sources fictifs introduits suite à la linéarisation (cf. chap.2), ce découplage permet comme le montre la figure 3.2 d'avoir une représentation vectorielle de chacune des deux énergies. Les sources hydrauliques  $Sf_H$  représentent les vrais actionneurs des sources thermofluides  $STf$  (pompes branchées ou non), les vrais actionneurs thermiques sont les sources thermiques par conduction  $Sf_T$ .

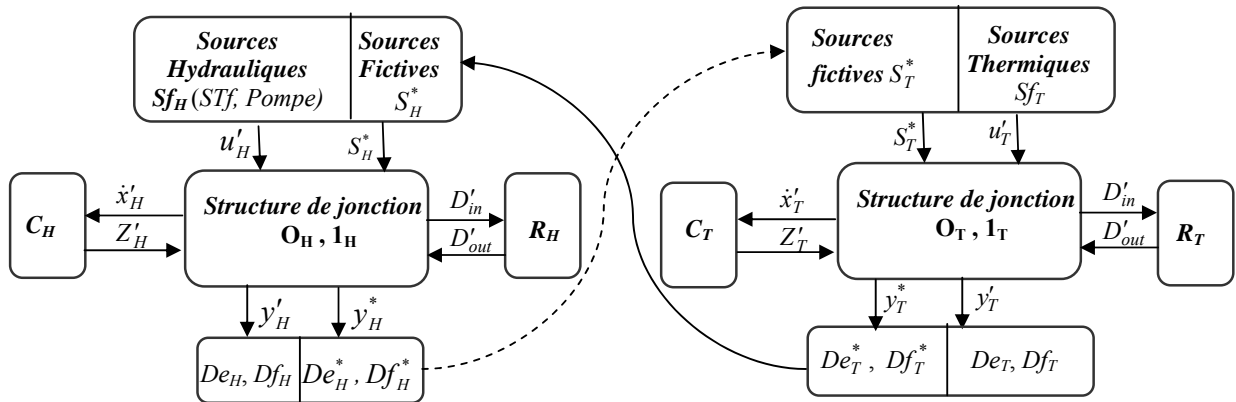


Figure 3.2 Représentation vectorielle d'un BG linéarisé en génie des procédés.

Les matrices de structure hydraulique  $S_h$  et thermique  $S_T$  sont:

$$\begin{bmatrix} x'_H \\ D'_{in} \\ y'_H \\ y_H^* \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{13} & S_{14} \\ S_{31} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{43} & S_{44} \\ S_{51} & S_{53} & S_{54} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Z'_H \\ D'_{out} \\ u'_H \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x'_T \\ D'_{in} \\ y'_T \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{31} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{43} & S_{44} & S_{45} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Z'_T \\ D'_{out} \\ u'_T \\ S_T^* \end{bmatrix}$$

En génie des procédés, quelques relations supplémentaires concernant la matrice de structure  $S_h$  et  $S_T$  peuvent être obtenues; pour la matrice  $S_h$  on a :

$$S_{13} = -S'_{31}$$

Ceci se traduit par le fait que selon les hypothèses posées, les modèles BG en génie des procédés ne comportent pas des transformateurs ou des gyrateurs.

Pour la matrice  $S_T$  : l'énergie thermique est véhiculée par le flux hydraulique. Elle ne dépend que des sources thermiques se trouvant en amont (amont par rapport à la direction de l'écoulement de la puissance thermique). Dans les modèles en génie de procédés, ceci se matérialise par des liens informationnels spéciaux employés au niveau des composants. Par conséquent :

- La matrice carrée  $S_{11}$  et la matrice  $S_{41}$  sont toutes les deux des matrices triangulaires inférieures ( $\begin{smallmatrix} \square \\ \square \end{smallmatrix}$ ).
- Les matrices  $S_{13}$ ,  $S_{31}$  et  $S_{43}$  sont elles diagonales.
- Les sous matrices qui restent, c.à.d celles qui appartiennent aux deux dernières colonnes sont triangulaires inférieures par bloc ( $\begin{smallmatrix} \square & \square \\ \square & \square \\ \square & \square \end{smallmatrix}$ ).

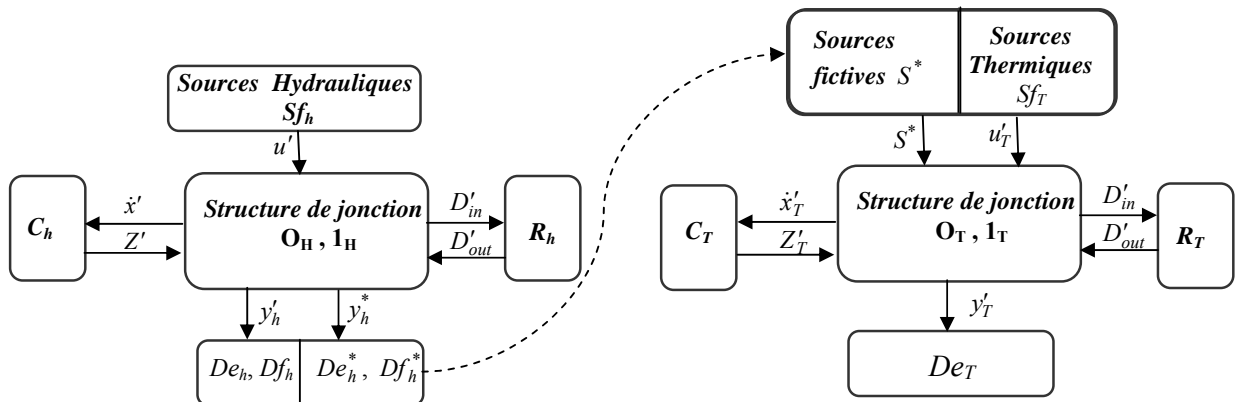
### Cas des systèmes thermofluides sous saturés

Pour les systèmes thermofluides en régime sous saturé, les équations d'état sont de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_H = f(x_H, u_H) \\ \dot{x}_T = g(x_H, x_T, u_H, u_T) \\ y_H = h(x_H, u_H) \\ y_T = l(x_H, x_T, u_H, u_T) \end{cases} \quad (3.11)$$

avec  $x_H$ ,  $x_T$ ,  $u_H$ ,  $u_T$ ,  $y_H$  et  $y_T$  respectivement le vecteur d'état hydraulique, le vecteur d'état thermique, les sources hydrauliques, l'énergie thermique fournie par les actionneurs, les sorties hydrauliques et les sorties thermiques.

L'énergie thermique dépend de l'énergie hydraulique alors que le contraire n'est pas vrai. La méthode de linéarisation définie par *Karnopp (1977)* et développée par *Rimaux (1995)* fait apparaître des sources fictives au niveau thermique modulées par des capteurs fictifs intervenant au niveau hydraulique. Ceci se matérialise par la figure 3.3.



**Figure 3.3.** Représentation vectorielle d'un BG linéarisé en génie des procédés (sous saturé).

En régime sous saturé, une fois le modèle BG non linéaire obtenu, sa linéarisation conduit à un modèle BG linéarisé qui peut être représenté par l'équation (3.2). Cependant il est à noter que dans ce cas on a :

$$\alpha = (S_{55} + S_{53}LS_{35}) = 0 \quad (3.12)$$

Ceci revient au fait que les capteurs fictifs sont installés au niveau hydraulique et que les sources elles, sont introduites pour maintenir la conservation de l'énergie thermique.

Sachant que seule l'énergie hydraulique influe sur l'énergie thermique et en scindant le vecteur d'état, le vecteur d'entrée réelle, le vecteur d'entrée fictive, le vecteur de sortie et le

vecteur de sortie fictive en  $x' = \begin{bmatrix} x'_H \\ x'_T \end{bmatrix}$ ,  $u' = \begin{bmatrix} u'_H \\ u'_T \end{bmatrix}$ ,  $S^* = \begin{bmatrix} 0 \\ s^* \end{bmatrix}$ ,  $y' = \begin{bmatrix} y'_H \\ y'_T \end{bmatrix}$  et  $y^* = \begin{bmatrix} y^*_H \\ y^*_T \end{bmatrix}$

l'équation (3.2) se traduit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}'_H(t) = A_H x'_H(t) + B_H u'_H(t) \\ \dot{x}'_T(t) = A_T x'_T(t) + B_T u'_T(t) + B'_T s^* \\ y'_H(t) = C_H x'_H(t) + D_H u'_H(t) \\ y'_T(t) = C_T x'_T(t) + D_T u'_T(t) + D'_T s^* \\ y^*_H(t) = C^*_H x'_H(t) + D^*_H u'_H(t) \\ y^*_T(t) = 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

où  $A_H$  et  $A_T$  représentent les matrices d'état hydraulique et thermique si on supprime les sources fictives.

D'un autre coté, la linéarisation de l'équation (3.8) donne aussi :

$$\begin{cases} \dot{x}'_H(t) = A_H x'_H(t) + B_H u'_H(t) \\ \dot{x}'_T(t) = A_{HT} x'_H(t) + B_{HT} u'_H(t) + A_T x'_T(t) + B_T u'_T(t) \\ y'_H(t) = C_H x'_H(t) + D_H u'_H(t) \\ y'_T(t) = C_{HT} x'_H(t) + D_{HT} u'_H(t) + C_T x'_T(t) + D_T u'_T(t) \end{cases} \quad (3.14)$$

En comparant les équations (3.14) et (3.13) nous obtenons :

$$A_{HT} x'_H + B_{HT} u'_H = B'_T s^* \quad (3.15)$$

$$C_{HT} x'_H + C_{HT} u'_H = D'_T s^* \quad (3.16)$$

Les sources fictives au niveau thermique sont reliées aux détecteur fictifs au niveau hydraulique par la relation (3.17).

$$s^* = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \ddots & k_i & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & k_r \end{bmatrix} y_H^* \quad (3.17)$$

avec  $r = n_\lambda + m$ , où  $n_\lambda$  est le nombre de composants (passifs et actifs) et  $m$  le nombre d'actionneurs thermofluides.

Parmi les sources  $S^*$ , on distingue les sources qu'on appelle actives  $\underline{S}^*$  et les sources passives  $\bar{S}^*$ . Contrairement aux sources actives issues de la linéarisation des actionneurs thermofluides, les sources passives proviennent de la linéarisation des composants multiports. La forme diagonale liant les sources fictives aux détecteurs fictifs par la relation (3.17) est conservée, on peut alors écrire :

$$\underline{S}^* = \begin{bmatrix} \underline{k}_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \underline{k}_m \end{bmatrix} \underline{y}^* \quad \text{et} \quad \bar{S}^* = \begin{bmatrix} \bar{k}_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & \bar{k}_{n_\lambda} \end{bmatrix} \bar{y}^* \quad (3.18)$$

avec  $S^* = \{\underline{S}^* \cup \bar{S}^*\}$ ,  $y^* = \{\underline{y}^* \cup \bar{y}^*\}$  et  $k^* = \{\underline{k}^* \cup \bar{k}^*\}$ .

### 3.2.3. Quelques propriétés des matrices d'état du modèle linéarisé en génie des procédés

La synthèse des lois de commande pour un système linéaire est basée sur ses matrices d'état ou sa fonction de transfert. Les matrices d'état d'un modèle linéarisé en génie des procédés possèdent une forme particulière. En vu de leur commande, la forme des matrices d'état est exploitée, les résultats suivants sont ainsi obtenus :

**Propriété 5.** *Le rang de la matrice d'état dans un système thermofluide linéarisé donné peut changer selon que les sources modulées sont ou non des sources de commande.*

**Preuve.**

On a vu qu'une pompe branchée dans un circuit impose son flux hydraulique donné autour d'un point de fonctionnement par l'équation (3.19).

$$MSf' = -K \cdot \Delta P' \quad (3.19)$$

$K$  est la constante de la pompe qui dépend de la vitesse de rotation  $\omega$  du moteur tournant la pompe. La variable ( $\Delta P' = P'_s - P'_e$ ) exprimant la différence de la pression entre la sortie et

l'entrée de la pompe dépend directement des variables d'état (pour une pompe entre un accumulateur  $i$  et un accumulateur  $(i+1)$ :  $P'_e = \frac{x_i}{C_{iH}}$ ,  $P'_s = \frac{x_{i+1}}{C_{(i+1)H}}$ ).

En conséquence, selon que l'on remplace  $MSf'$  par sa valeur ou pas, le rang de la matrice d'état peut changer. La section (5.2.3.3) illustre cette propriété par un exemple sur le Générateur de Vapeur (GV)□

**Proposition 3.** *La matrice d'état thermique  $A_T$  et la matrice de sortie thermique  $C_T$  sont triangulaires inférieures.*

**Preuve.**

La forme triangulaire de  $A_T$  est due au fait que dans un circuit thermofluide l'état thermique d'un accumulateur n'affecte pas l'état thermique d'un autre accumulateur en amont de lui par rapport au circuit thermofluide.

Ceci peut aussi être prouvé mathématiquement en se basant sur la matrice de structure. En effet, à partir de l'équation (3.5) on obtient :

$$A_T = (S_{11} + S_{13}LS_{31})F \quad (3.20)$$

Cependant, la matrice  $S_{11}$  est une matrice triangulaire inférieure et les matrices  $S_{31}$ ,  $S_{13}$ ,  $L$  et  $F$  sont elles diagonales. La multiplication structurelle de ces matrices conduit à une forme triangulaire inférieure.

$$A_T = \left[ \begin{array}{c|c} \text{triangle} & \\ \hline & \end{array} \right] \quad (3.21)$$

Pour la matrice de sortie thermique  $C_T$ , les sorties thermiques portent la numérotation du composant sur lequel elles sont installées. Il est évident que dans un circuit thermofluide l'état thermique d'un accumulateur n'affecte que les détecteurs qui sont en aval de lui par rapport au circuit thermofluide. La preuve mathématique est identique à celle qui précède. □

**Proposition 4.** *La matrice d'entrée thermique  $B_T$  et la matrice de transmission directe thermique  $D_T$  ont la forme escalier suivante.*

$$\left[ \begin{array}{c|c} \text{escalier} & \\ \hline & \end{array} \right] \quad (3.22)$$

**Preuve.**

La forme escalier signifie qu'un actionneur thermique en aval d'un composant par rapport au circuit d'écoulement n'affecte pas l'état thermique de ce composant. Il ne peut affecter que les accumulateurs situés en aval de lui. Les sauts de cette forme ne sont pas de largeurs égales vu que sur un accumulateur plusieurs actionneurs thermiques peuvent être installés.

Mathématiquement, la matrice  $B_T$  est donnée par l'équation (3.5).

$$B_T = (S_{14} + S_{13}LS_{34}) \quad (3.23)$$

Les matrices  $S_{14}$  et  $S_{34}$  ont la forme escalier. Alors que les matrices  $S_{13}$  et  $L$  sont diagonales, le calcul structurel de la forme de  $B_T$  conduit au résultat cherché.

Pour la matrice  $D_T$  le raisonnement mathématique est similaire. Sa forme signifie qu'un actionneur thermique en aval d'un détecteur par rapport au circuit d'écoulement ne l'affecte pas.  $\square$

Par conséquent, les matrices  $A$  et  $B$  des équations linéarisées sont de la forme (3.24).

$$A = \begin{bmatrix} A_H & 0 \\ \square & \triangle \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_H & 0 \\ \square & \text{escalier} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

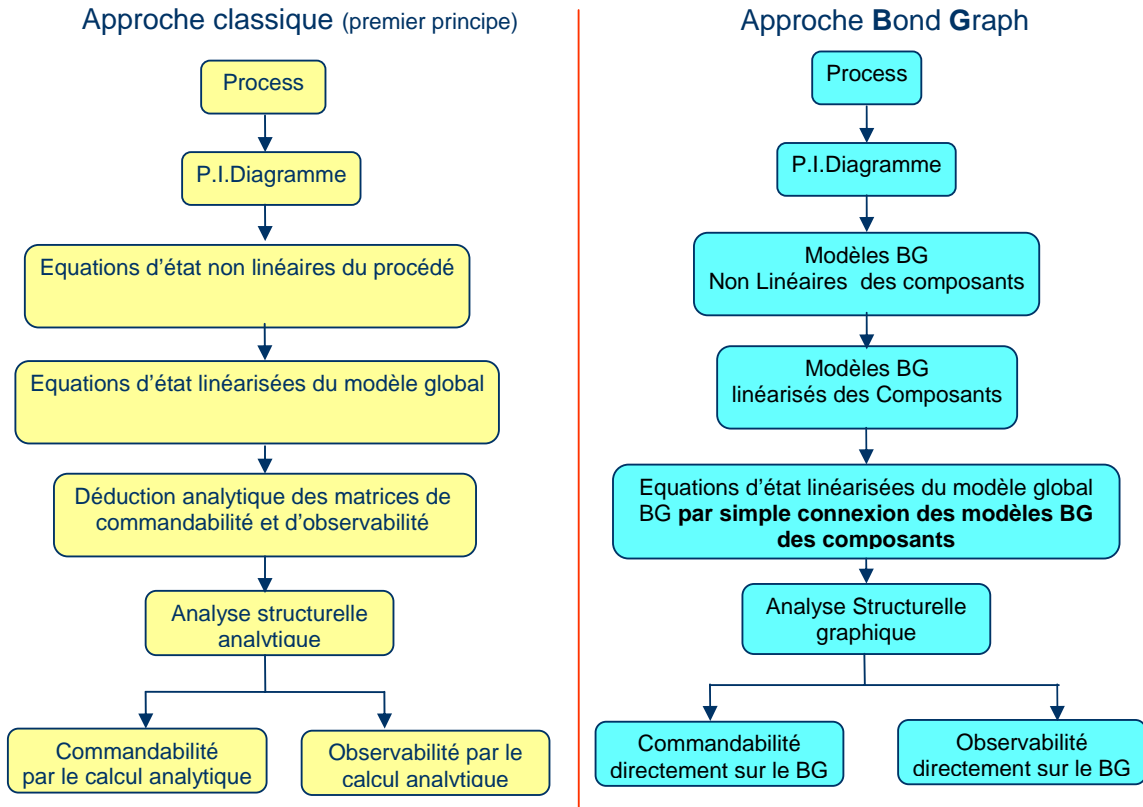
### 3.3. Commandabilité/ Observabilité structurelle

La détermination des propriétés structurelles des processus physiques en utilisant la méthodologie bond graph est largement développée mais seulement dans le cas monoénergie. Les propriétés structurelles locales concernent la paire  $(A, B)$  pour la commandabilité et la paire  $(A, C)$  pour l'observabilité où  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont les matrices d'état du modèle linéaire. Dans le présent travail, ces propriétés sont étendues localement pour les modèles couplés des processus thermofluides à partir uniquement des modèles bond graphs linéarisés.

Il a été montré *Rimaux (1995)* que le triplet  $(A, B, C)$  du modèle linéarisé tangent obtenu par une approche classique est équivalent à celui obtenu en linéarisant les composants du bond graph non linéaire. Cette propriété a été étendue au chapitre 2 pour la linéarisation des modèles couplés (au sens du couplage des phénomènes mis en jeu en génie des procédés) des processus thermofluides à partir uniquement des bond graphs linéarisés de chaque composant. La structure étant linéaire, le modèle global linéarisé a été alors obtenu en connectant simplement chaque composant.

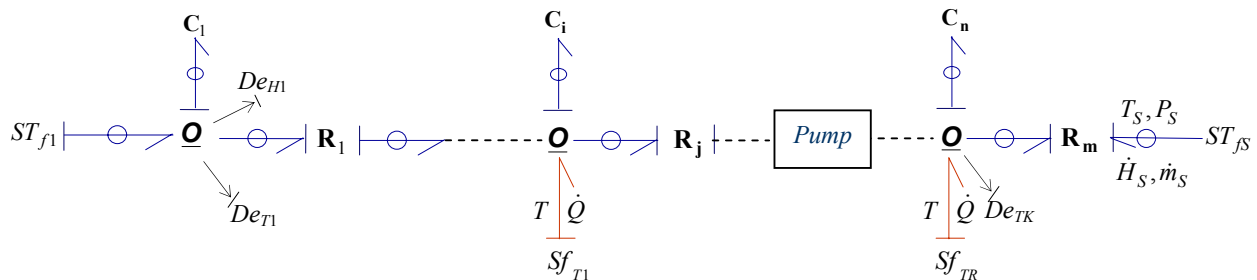
L'informatisation de cette procédure est développée pour une analyse des propriétés structurelles des procédés énergétiques directement à partir des PID du procédé.

L'organigramme des deux approches classique et bond graph pour l'analyse des propriétés structurelles est montré par la figure 3.4.



**Figure 3.4.** Analyse Structurale par une approche classique/ une approche BG.

Considérons un processus thermofluide constitué d'un réseau d'éléments stockant de l'énergie (accumulateurs  $C_i$ ) de composants transportant de l'énergie ( $R_i$ ) et de sources d'énergies ( $ST_f$  and  $Sf_T$ ) (voir figure 3.5). Chaque réservoir constitue un composant d'accumulation stockant des énergies thermiques et hydrauliques. Les variables d'état sont la masse et l'enthalpie stockée par les réservoirs. L'inertie du fluide due à l'écoulement du fluide à travers le tuyau n'est pas considérée.  $ST_{fs}$  représente la pression et la température imposées par la sortie,  $De_H$  et  $De_T$  sont respectivement les capteurs hydrauliques et thermiques.



**Figure 3.5.** Réseau de composants interconnectés dans un processus thermofluide.

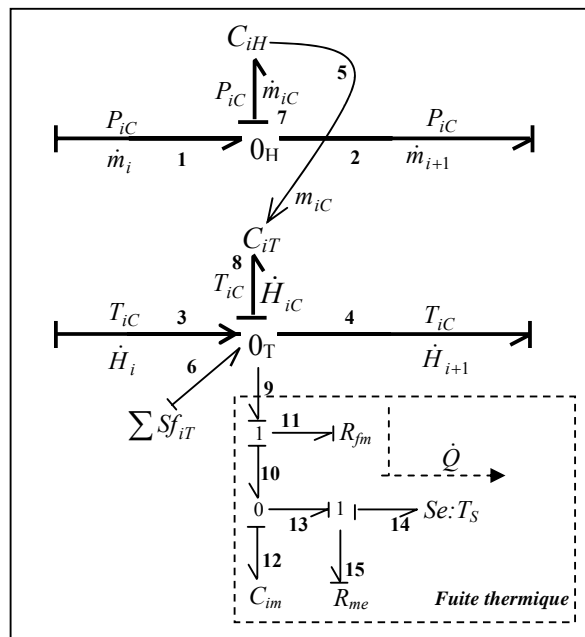
Après l'élaboration des propriétés structurelles locales pour les modèles BGs thermodynamiques, considérons l'**atteignabilité** des états (associés avec les énergies stockées) par les sources.

Soit un processus thermofluide en régime sous saturé, les connexions causales entre les multiports **C** (éléments dynamiques) et les sources d'énergies sont considérées *El Osta et al. (2003b)* (atteignabilité par les sources d'énergie des états liés aux énergies stockées hydrauliques et thermiques) :

**Proposition 5. (Atteignabilité des états par les sources en régime sous saturé)**  
*L'atteignabilité des capacités hydrauliques par des sources hydrauliques implique l'atteignabilité des capacités thermiques correspondantes par les mêmes sources.*

**Preuve.**

Sous les hypothèses de modélisation données au chapitre 2, les éléments dynamiques dans un modèle bond graph thermofluide sont des capacités hydrauliques et des capacités thermiques (figure 3.6). Les capacités hydrauliques  $C_{iH}$  modélisent les énergies hydrauliques stockées par les accumulateurs. Les énergies thermiques stockées par les accumulateurs sont associées à des capacités thermiques  $C_{iT}$ . D'autres capacités thermiques  $C_{im}$  modélisent les pertes thermiques par conduction.



**Figure 3.6.** *Eléments dynamiques dans un circuit thermofluide.*

L'atteignabilité des capacités hydrauliques  $C_{iH}$  par des sources hydrauliques est une condition nécessaire pour l'atteignabilité de toutes les capacités.

En effet, pour un élément dynamique  $i$  les capacités hydrauliques et thermiques sont causalement liées comme suit:

- $C_{iH} - 5 - C_{iT}$
- $C_{iH} - 5 - C_{iT} - 8 - 9 - 11 - R_{fm} - 11 - 10 - 12 - C_{im}$

Les capacités thermiques  $C_{iT}$  et  $C_{im}$  sont causalement liées à la capacité hydraulique  $C_{iH}$ . Par conséquent, l'atteignabilité des capacités hydrauliques  $C_{iH}$  par des sources hydrauliques implique aussi celles des capacités thermiques et la preuve est achevée. □

**Proposition 6.** (Accessibilité des états par les capteurs) *Les capacités thermiques ne sont pas accessibles par les capteurs hydrauliques. Toutes les capacités sont accessibles par un capteur thermique bien placé (en aval du circuit thermofluide considéré).*

**Preuve.**

L'accessibilité des états peut être étudiée en se basant sur la matrice  $C_{acc}$ . Si un détecteur d'effort thermique  $De_T$  est placé au dernier réservoir, la matrice de sortie  $C$  sera :

$$C = (0 \dots 0 \alpha_n 0 \dots 0 \alpha_{2n}) \quad (3.25)$$

Basé sur la forme de la matrice  $A$ , et puisque la variable de sortie dépend explicitement de la variable d'état  $x_{2n}$ , la dérivation de la variable de sortie  $(2n-1)$  fait apparaître explicitement toutes les variables d'état et par conséquent tous les états sont accessibles par ce détecteur.

Cependant, un détecteur thermique installé en amont d'un accumulateur par rapport au circuit thermofluide n'est pas influencé par l'état thermique de ce dernier: ceci est montré en dérivant la variable de sortie (détecteur), la forme spéciale de  $A$  montre qu'il n'y a que les variables d'état thermiques correspondants aux accumulateurs en amont du détecteur qui apparaissent dans la dérivation. En conséquence seuls les états thermiques en amont sont accessibles par un détecteur thermique.

A partir de la sous matrice nulle de la matrice  $A$ , nous déduisons que seulement les états hydrauliques sont accessibles par un détecteur hydraulique.  $\square$

**Proposition 7.** *Une condition nécessaire et suffisante pour assurer l'accessibilité de tous les états par les capteurs est d'avoir au moins un capteur thermique placé en aval du circuit.*

La preuve est triviale et se déduit directement de la proposition 6.  $\square$

Une autre propriété très intéressante dans le domaine de l'analyse structurelle des systèmes thermofluides peut être établie :

**Propriété 6.** (régime sous saturé) *Tous les éléments dynamiques thermiques d'un système thermofluide admettent une causalité dérivée lorsqu'on affecte la causalité dérivée préférentielle.*

**Preuve.**

Pour les éléments thermiques  $C_{iT}$  au niveau des multiports  $C_i$  modélisant les accumulateurs :

Dans les processus technologiques, un accumulateur se situe entre deux conduites, une conduite d'entrée et de sortie. En général, les efforts sont imposés sur les multiports  $R$  et les flux sur les accumulateurs (multiports  $C$ ) car le flux massique transféré est la conséquence d'un gradient de pression. Il a été montré au chapitre 2 que tous les multiports  $C$  dans un bond graph thermodynamique en causalité intégrale préférentielle admettent une causalité intégrale. Lorsque la causalité dérivée préférentielle est appliquée, les éléments thermiques  $C_{iT}$  passent automatiquement en causalité dérivée grâce à la position respective des multiports  $R$  et  $C$

facilitant ainsi ce passage. Ce n'est pas le cas pour les capacités hydrauliques  $C_{iH}$ ; leur passage en causalité dérivée est conditionné par la présence ou non de sources modulées modélisant des pompes centrifuges (ceci est illustré par les figures C.2, C.3 et C.4 en annexe C).

Pour les éléments  $C_{im}$  :

Le modèle bond graph de la conduction thermique présente la capacité  $C_{im}$  entre deux éléments  $R_{fm}$  et  $R_{me}$ . Par la suite, la position respective des éléments simples  $R$  et  $C$  facilite la mise en causalité dérivée lorsque la causalité dérivée préférentielle est affectée.

Par conséquent, tous les éléments dynamiques passent en causalité dérivée lorsque qu'on affecte la causalité dérivée.

Une démonstration mathématique est donnée en annexe B.  $\square$

Cette propriété nous permet de conclure sur la propriété de commandabilité et d'observabilité des systèmes thermofluides linéarisés. En régime sous saturé, la condition de la commandabilité locale (l'observabilité locale) dans le cas d'un modèle BG 1-port thermodynamique linéarisé peut être déduite du sous modèle hydraulique *El Osta et al. (2003b)*.

**Théorème 5.** (commandabilité locale en régime sous saturé) *Un modèle BG 1-port thermodynamique linéarisé est localement commandable Ssi le sous modèle hydraulique l'est, i.e. Ssi:*

**(a)** *tous les éléments dynamiques  $C_{iH}$  en causalité intégrale dans le modèle BG en causalité intégrale préférentielle sont causalement connectés à au moins une source indépendante par un chemin causal,*

**(b)**  *$\text{rang}_s \langle A_H | B_H \rangle = n_H$  (les éléments dynamiques hydrauliques admettent la causalité dérivée quand on met le BG en causalité dérivée préférentielle et qu'on dualise si nécessaire les sources de commande hydrauliques indépendantes afin de mettre les éléments  $C_H$  restant en causalité intégrale, en causalité dérivée).*

**Preuve.**

La preuve est facilement déduite de la propriété 6 et de la proposition 5.

Condition suffisante

Si la condition (a) est vérifiée, tous les éléments dynamiques sont atteignables par au moins une source (proposition 5). D'après la propriété 6, en affectant la causalité dérivée préférentielle, tous les éléments dynamiques ont une causalité dérivée ssi les éléments dynamiques hydrauliques l'ont aussi. Ce qui est vérifié si la condition (b) l'est. Par conséquent, un modèle bond graph thermodynamique linéarisé est localement commandable si la commandabilité du sous modèle hydraulique est vérifiée.

Condition nécessaire

Il est clair que le modèle bond graph global ne sera pas commandable si l'une des deux conditions (a) et (b) n'est pas vérifiée, c.à.d, si l'un des éléments dynamiques hydrauliques n'est pas atteignable ou ne passe pas en causalité dérivée en affectant la causalité dérivée préférentielle. □

**Théorème 6.** (observabilité locale en régime sous saturé) *Un modèle bond graph 1-port thermodynamique linéarisé est localement observable Ssi:*

(a) *Au moins un détecteur thermique est placé sur l'accumulateur se situant en aval du circuit thermofluide,*

(b)  $\text{rang}_s \left\langle \frac{A_H}{C_H} \right\rangle = n$  (les éléments dynamiques hydrauliques admettent la causalité dérivée quand on met le BG en causalité dérivée préférentielle et qu'on dualise si nécessaire les détecteurs afin de mettre les éléments  $C_H$  restant en causalité intégrale, en causalité dérivée).

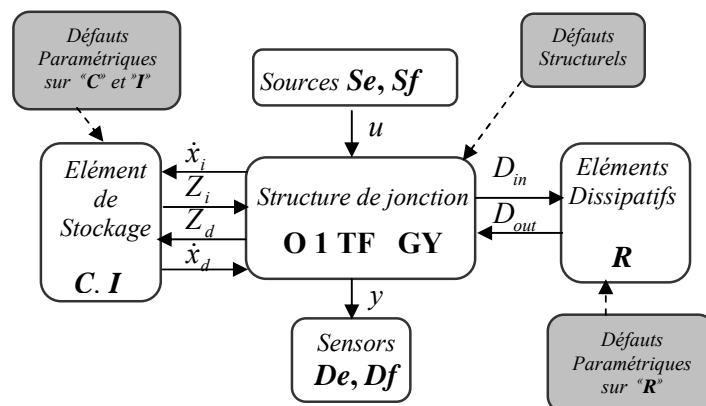
**Preuve.** La preuve est évidente (même principe de démonstration que pour la commandabilité). □

### 3.4. Modèles de défauts de composants

Considérons les types de défauts composants d'une façon générique; obstruction d'une vanne, déformation d'un accumulateur, perte de chaleur, entartrage et fuite au niveau d'un réservoir ou d'une conduite, représentent les types de défaillances sur les composants.

Les défauts de composants considérés sont partiels, ils se traduisent par une déviation continue et non brutale dans les caractéristiques d'un composant du système au delà des limites spécifiées, mais tels qu'ils ne causent pas la perte totale de la fonction du composant, ni celle du système global. Un exemple de la perte totale de la fonction d'un composant peut être une obstruction totale de la vanne de sortie d'un réservoir qui se vide.

Deux types de défauts de composants seront considérés ci-dessous : les défauts paramétriques et les défauts structurels, figure 3.7. Tandis qu'un défaut paramétrique au niveau d'un composant se traduit directement par une variation de la valeur des paramètres du multiport modélisant ce composant, les défauts structurels modifient la structure du système et exigent le changement du modèle initial.



**Figure 3.7.** Représentation BG de défauts de composants.

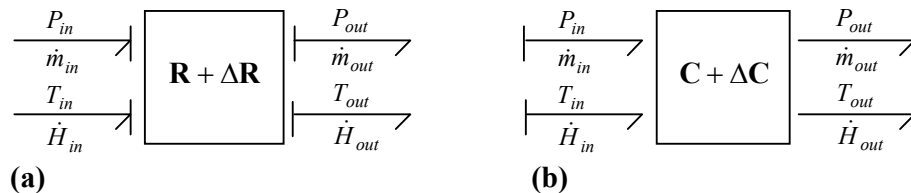
### 3.4.1. Défauts paramétriques

Un défaut paramétrique correspond à une variation de la valeur des paramètres d'un élément multiport. Il est modélisé par un vecteur additif  $\Delta$ , représentant les différentes amplitudes des variations sur les paramètres. Ainsi, le BG et le modèle mathématique résultant, demeurent valides pour la description du système.

Nous énumérons les défauts paramétriques suivants dans un système thermofluide: ( $\Delta \mathbf{R}$ ,  $\Delta \mathbf{C}$ ,  $\Delta C_m$ ).

Un changement instantané d'une ouverture d'une vanne modifie les paramètres du multiport  $\mathbf{R}$  modélisant la vanne comme montre le schéma 3.8 (a). La non-stationnarité représentée par  $\Delta \mathbf{R}$  perturbe les variables de puissance des deux ports hydraulique et thermique et le système évolue vers un nouvel état stationnaire. Pour illustrer la modélisation de ce type de défauts, considérons le système d'un bac hydraulique qui se vide, imaginons le comportement défaillant caractérisé par une augmentation significative permanente du niveau du liquide dans le bac et d'une diminution momentanée du flux traversant la restriction  $\mathbf{R}$ . Ce défaut ne peut être représenté que par le vecteur incrément  $\Delta \mathbf{R}$  ajouté à la valeur des paramètres du multiport  $\mathbf{R}$ .

De même, un changement  $\Delta \mathbf{C}$  des paramètres du multiport  $\mathbf{C}$  conduit à des variables de puissance perturbées au niveau de tous les ports et par conséquent à un vecteur de déplacement généralisé perturbé  $q + \Delta q$ , voir le schéma 3.8 (b). C'est le résultat d'une déformation dans le corps d'un accumulateur ou d'une chute d'un objet dans un réservoir.



**Figure 3.8.** Fautes Paramétriques sur un Multiport  $\mathbf{R}$  (a) et un Multiport  $\mathbf{C}$  (b).

Pareillement, un changement  $\Delta C_m$  de la capacité du stockage de chaleur par le métal perturbe la variable de déplacement généralisé. C'est le résultat d'un phénomène d'entartrage par exemple.

Une linéarisation des composants BG est nécessaire. Elle fournit une meilleure visualisation de l'effet de changement des paramètres en les visualisant par des sources fictives, comme nous le montrerons dans la suite. De ce fait, en tenant compte de la causalité assignée au bond graph, nous faisons propager l'effet des sources fictives pour une étude de diagnosabilité.

L'analyse ci-dessus des défauts est basée sur les modèles en mode normal et suppose qu'un défaut est représenté comme une déviation directe de leurs fonctions et leurs paramètres. Néanmoins, nous allons voir dans la suite que cette hypothèse n'est pas toujours valable.

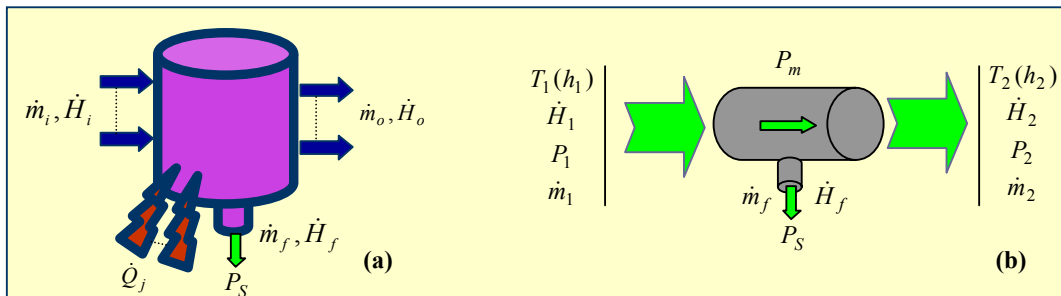
### 3.4.2. Défauts structurels

Alors qu'une majorité des défauts peut être associée à une variation directe des paramètres d'un multiport, une faute de type fuite ne peut pas être exprimée comme une déviation directe d'une capacité ou d'une résistance *Khoda et al. (1993)*. En fait, une variation directe des paramètres d'un multiport peut diminuer le débit de sortie d'un système, mais seulement d'une façon temporelle puisque l'état d'équilibre doit se maintenir avec le temps et doit conduire à l'égalité des débits d'entrée et de sortie. Cependant en réalité, la sortie diminue quand une fuite se produit sans la diminution du débit d'entrée. Ainsi, le BG du système doit être modifié pour traiter le cas d'une fuite. De même, une perte de chaleur exige aussi une modification du modèle BG.

Ces genres de défauts peuvent être considérés en tant que défauts structurels. Leur effet se traduit généralement par la perte d'une partie de puissance fournie à l'élément défectueux, ni la fonction du composant défaillant, ni celle du système global n'est altérée d'une façon complète. A leur apparition, le système emprunte un nouvel état stationnaire. Considérons seulement les défauts structurels partiels, comme les BG montrent une correspondance directe entre leurs composants et les phénomènes physiques à modéliser, il est facile d'obtenir non seulement un modèle du système, mais également une représentation des défauts composants. Cette section propose d'abord un modèle pour la fuite et en second lieu un modèle pour les phénomènes de perte de chaleur.

#### 3.4.2.1. Fuite de débit

Considérons le cas des processus thermofluides, un cas répandu de défauts peut être attribué à une fuite au niveau d'un réservoir ou d'une conduite. Imaginons une fuite de flux thermofluide sous forme d'évasion du débit; au niveau d'un réservoir (figure 3.9 (a)) et au niveau d'une conduite (figure 3.9 (b)).  $T$ ,  $P$ ,  $\dot{m}$ ,  $\dot{H}$  sont les variables de puissance utilisées dans les processus thermodynamiques.



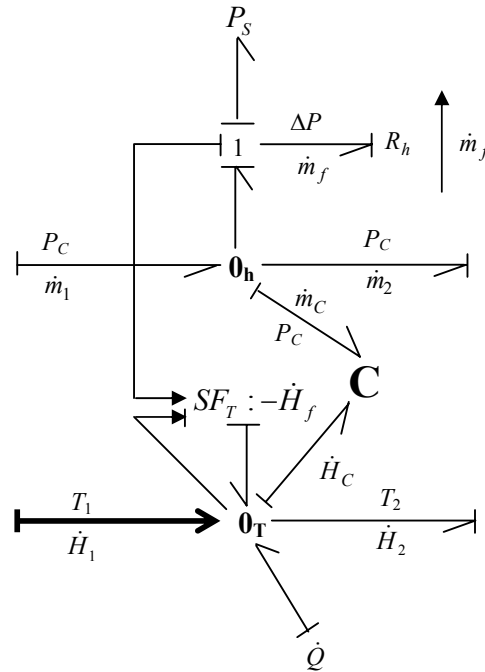
**Figure 3.9.** Représentation Symbolique d'une fuite au niveau d'un accumulateur (a), au niveau d'une conduite (b).

Soit  $P_s$  la pression extérieure,  $\dot{m}_f$  et  $\dot{H}_f$  les débits des fuites hydrauliques et thermiques respectivement, les équations constitutives sont:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_c \quad (3.25)$$

$$\dot{H}_f = \dot{H}_1 + \dot{Q} - \dot{H}_2 - \dot{H}_c = \dot{m}_f C_p T_c \quad (3.26)$$

Une première tentative pour modéliser ce défaut consiste à l'assimiler à une restriction d'évacuation, que nous caractérisons par une résistance  $R_h$  au niveau hydraulique, figure 3.10.



**Figure 3.10.** Modèle BG d'un accumulateur soumis à une fuite.

Alors que la fuite peut être considérée comme un genre de dissipation d'énergie, elle est représentée au niveau hydraulique par une résistance  $R_h$  reliant le système au milieu extérieur et par une source négative modulée  $SF_T$  exprimant l'énergie thermique perdue par convection (figure 3.10).

Une valeur infinie  $R_h$  représente le cas sans fuite puisqu'elle implique que la variable  $\dot{m}_f$  et par conséquent  $\dot{H}_f$  sont nulles. Cependant, une valeur finie de  $R_h$  est le résultat d'un phénomène de fuite et par conséquent une variation du paramètre  $R_h$  confirme la présence d'une fuite. Ayant maintenant une variation dans une valeur d'une résistance, il est possible de traiter un défaut dû à une fuite comme celui dû à une variation d'un paramètre.

Pour une fuite au niveau d'une conduite (figure 3.9 (b)):

Considérons une fuite à un point intermédiaire  $m$  d'une conduite et soit  $P_m$  la pression au niveau de la perte, les équations constitutives sont:

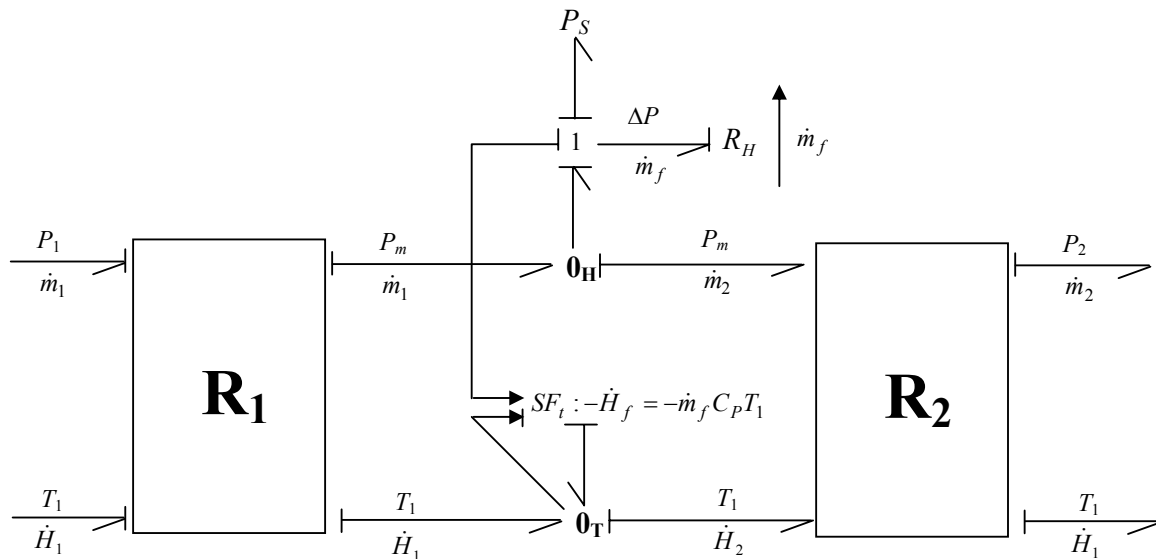
$$\dot{m}_f = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (3.27)$$

$$\dot{H}_f = \dot{H}_1 - \dot{H}_2 \quad (3.28)$$

$$T_1 = T_2 = T \quad (3.29)$$

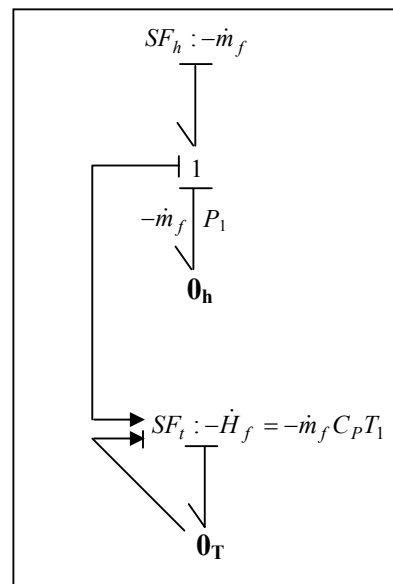
$$P_1 > P_m > P_2 \quad (3.30)$$

Comme au niveau d'un réservoir, une fuite au niveau d'une conduite peut être considérée comme une restriction d'évacuation, nous obtenons le modèle BG suivant donné par la figure 3.11.



**Figure 3.11.** Un modèle BG d'une fuite thermofluide sur une conduite.

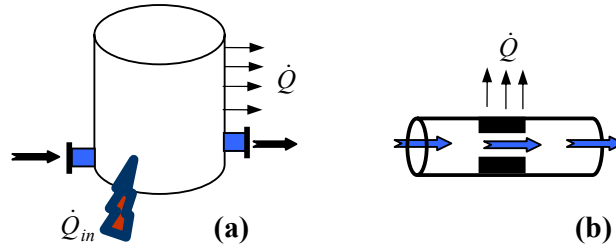
Les deux multiports  $\mathbf{R}_1$  et  $\mathbf{R}_2$  représentent les pertes de charge  $(P_1 - P_m)$  et  $(P_m - P_2)$  respectivement. Une deuxième tentative est de considérer un phénomène de fuite par un couple de sources (une source hydraulique et une thermique) modélisant les flux perdus. Le sous modèle BG est donné par la figure 3.12, les jonctions zéros au niveau hydraulique et thermique sont dans le premier cas les jonctions zéros du multiport  $\mathbf{C}$  (figure 3.10) et les jonctions zéros de la figure 3.11 dans le deuxième cas.



**Figure 3.12.** Sous modèle BG d'un phénomène d'une fuite représentée par des sources.

### 3.4.2.2. Perte de chaleur

La figure 3.13 est la représentation symbolique d'une perte de chaleur au niveau d'une chaudière ou d'une conduite.

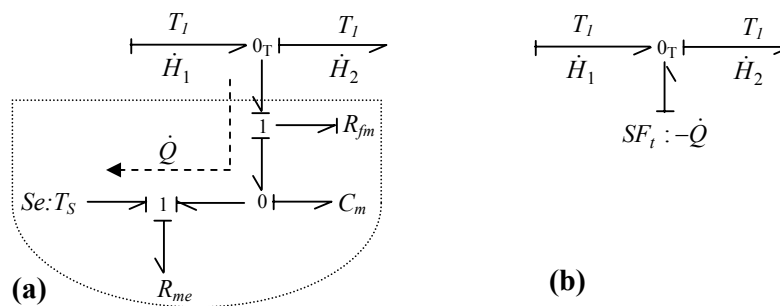


**Figure 3.13.** Une perte de chaleur (a) au niveau d'un accumulateur, (b) au niveau d'une conduite.

En tenant compte d'une perte de chaleur par conduction, nous avons considéré la capacité thermique de la paroi du réservoir ou de la conduite que nous modélisons par un élément simple (1-port)  $C : C_m$ .

Le transfert thermique par conduction du fluide chaud  $T_1$  vers la paroi de l'enceinte et de l'enceinte vers l'environnement sont modélisés respectivement par les éléments  $R : R_{fm}$  et  $R : R_{me}$ . La température externe est considérée comme une source d'effort constante  $Se : T_s$ .

Pour introduire le phénomène de conduction au niveau d'une chaudière ou au niveau d'une conduite, le sous modèle donné par la figure 3.14 (a) doit remplacer le lien thermique en aval d'un multiport **C** pour la chaudière ou le lien thermique en amont du multiport **R** pour la conduite.



**Figure 3.14.** Liens Thermiques pour les phénomènes de conduction (Défaut de calorifuge).

Une valeur infinie de  $R_{fm}$  représente le cas sans perte thermique. En conséquence, un défaut de perte de chaleur peut être traité comme variation de  $R_{fm}$ .

Considérons maintenant un système mal calorifugé, une variation de  $C_m$  peut être liée à un phénomène d'entartrage. En pratique, de tels défauts (fuite de débit et perte de chaleur) sont le plus souvent définis par un débit de fuite. De plus, pour faciliter le calcul de leurs effets, qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs, sur les variables du modèle, on se propose de les modéliser par des sources de flux de valeur négative signifiant une perte de puissance (hydraulique et/ou thermique) vers l'extérieur non consommable par le système (figure 3.14

(b)). Cependant, pour pratiquer des défauts dus à la variation des paramètres, nous avons conservé nos modèles schémas 3.10, 3.11 et 3.14 (a). D'ailleurs, le schéma 3.14 (a) permet de différencier entre une variation de la perte de chaleur exprimée par  $\Delta R_{fm}$  liée à un problème d'isolation thermique ou exprimée par  $\Delta C_m$  et un phénomène lié à l'entartrage. □

En génie des procédés, la représentation BG regroupant les possibles candidats de défaillance sur les composants (Défauts de composants Structuraux (DS) et Défauts de composants Paramétriques (DP)) est donnée par la figure 3.15.

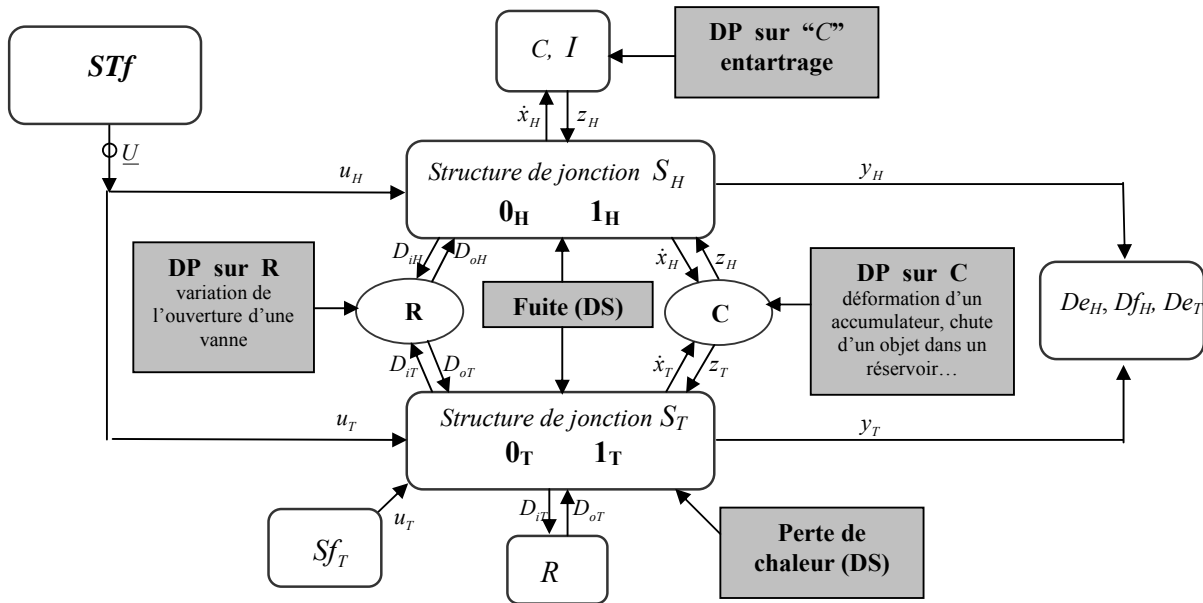


Figure 3.15. Représentation BG de défauts de composants en génie des procédés.

### 3.4.3. Représentation des modèles en régime défaillant par bond graph linéarisé

Avec une approche BG, une représentation non linéaire ne peut pas être employée pour faire de la surveillance avec les outils existants. C'est pourquoi, on propose ci-dessous une linéarisation des modèles BG dans le but d'avoir des modèles bien adaptés pour l'analyse structurelle et causale. La procédure de linéarisation des différents composants BG ainsi que celle du modèle BG global a été considérée dans le chapitre 2. Dans cette section, la procédure est appliquée pour linéariser les modèles des défauts composants. En effet, la linéarisation d'un composant permet une meilleure visualisation du défaut en l'exprimant en termes de sources fictives. On considère à titre illustratif les défauts paramétriques sur un élément simple  $R$  et sur un multiport non linéaire  $C$  quelconque. La linéarisation de quelques modèles des défauts composants en génie des procédés est présentée au chapitre 5 pour la modélisation en régime défaillant du GV en vue de la surveillabilité des composants.

#### 3.4.3.1. Défaut paramétrique sur une résistance simple $R$ (1 port)

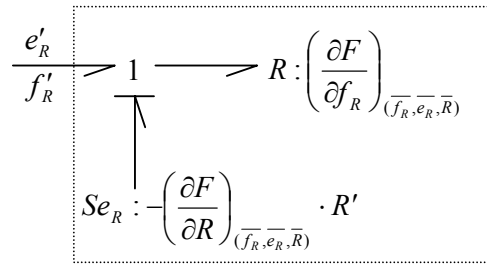
Considérons une résistance à 1-port  $R$ . L'équation constitutive en causalité résistance est:

$$e_R = F(f_R, R) \quad (3.31)$$

où  $F$  est une fonction non linéaire. La linéarisation de Taylor autour d'un point de fonctionnement conduit à :

$$e'_R = \left( \frac{\partial F}{\partial f_R} \right)_{(\bar{f}_R, \bar{e}_R, \bar{R})} \cdot f'_R + \left( \frac{\partial F}{\partial R} \right)_{(\bar{f}_R, \bar{e}_R, \bar{R})} \cdot R' \quad (3.32)$$

Cette équation peut être interprétée comme une résistance avec les variables de puissances  $e'_R$  et  $f'_R$  et une source d'effort attachée à une jonction 1 (figure 3.16). La source fictive ajoutée  $Se_R$  exprime l'effet de la variation du paramètre  $R$ .



**Figure 3.16.** Modèle bond graph linéarisé d'une résistance.

Ces modèles ont été exploités pour la surveillance des composants dans les systèmes linéaires *El Osta et al. (2004 b)*.

### 3.4.3.2. Défaut paramétrique sur un multiport C

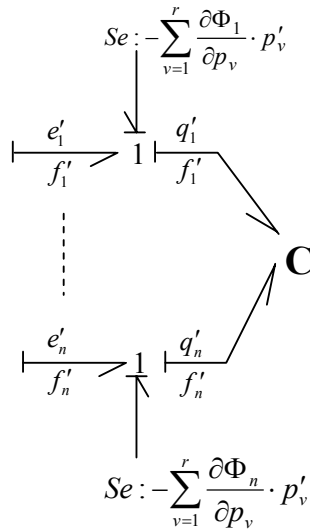
Un élément C multiport est caractérisé par l'équation constitutive suivante :

$$e = \Phi_C(q, p) = \begin{pmatrix} \Phi_1(q, p) \\ \vdots \\ \Phi_n(q, p) \end{pmatrix} \quad (3.33)$$

$q = (q_1 \ \dots \ q_n)^t$  est le vecteur de déplacement généralisé et  $p = (p_1 \ \dots \ p_r)^t$  le vecteur des paramètres. La linéarisation de l'équation (3.33) autour d'un point de fonctionnement conduit à :

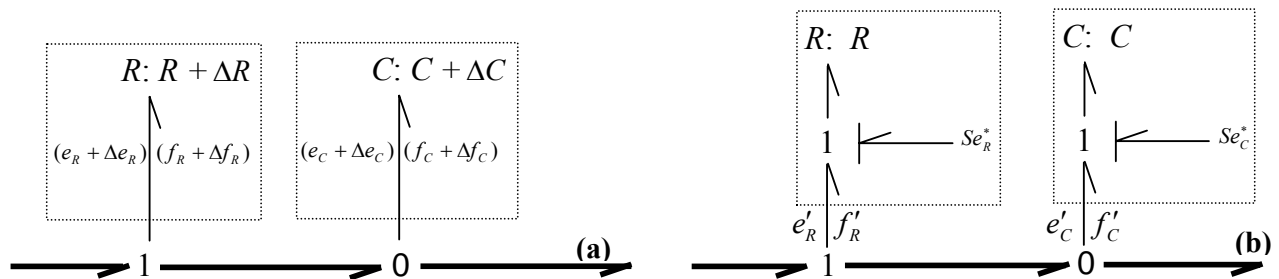
$$e' = \left( \frac{\partial \Phi_C}{\partial q} \right) \cdot q' + \left( \frac{\partial \Phi_C}{\partial p} \right) \cdot p' \quad (3.34)$$

Cette équation peut être représentée par un multiport C linéaire et un ensemble de source d'effort comme le montre la figure 3.17. □



**Figure 3.17.** *Modèle bond graph linéarisé défaillant d'un multiport C.*

Ayant déterminé pour chaque élément BG basique son sous modèle BG linéarisé correspondant, on construit le BG global linéarisé en mode défaillant par un simple remplacement des sous modèles BG des composants par leurs modèles linéarisés (figure 3.18). La figure 3.18 (a) représente une résistance non linéaire  $R + \Delta R$  (résistance soumise à une variation des paramètres) en série avec une capacité non linéaire simple  $C + \Delta C$  soumise aussi à une variation des paramètres. Par contre la résistance et la capacité figure 3.18 (b) sont linéaires.



**Figure 3.18.** *BG en mode défaillant (modèle non linéaire (a), modèle linéarisé (b)).*

### 3.4.3.3. Cas des systèmes thermofluides

Comme défauts composants thermofluides, nous considérerons à titre illustratif un défaut paramétrique sur un multiport **R** en causalité conductance, un défaut paramétrique sur un multiport **C** en causalité intégrale et des défauts structurels (fuite ou perte de chaleur sur les deux composants).

#### 3.4.3.3.1. Sous modèle d'un défaut paramétrique **R** dans le BG linéarisé

A titre illustratif, on considère la causalité conductance qui est la plus naturelle pour un multiport **R**. Rappelons les relations constitutives non linéaires en régime sous saturé (équations (3.35) et (3.36)):

$$\dot{m} = \dot{m}(\Delta P, k) = k\sqrt{\Delta P} \quad (3.35)$$

$$\dot{H} = \dot{H}(\Delta P, k, T_1) = \dot{m}C_p T_1 \quad (3.36)$$

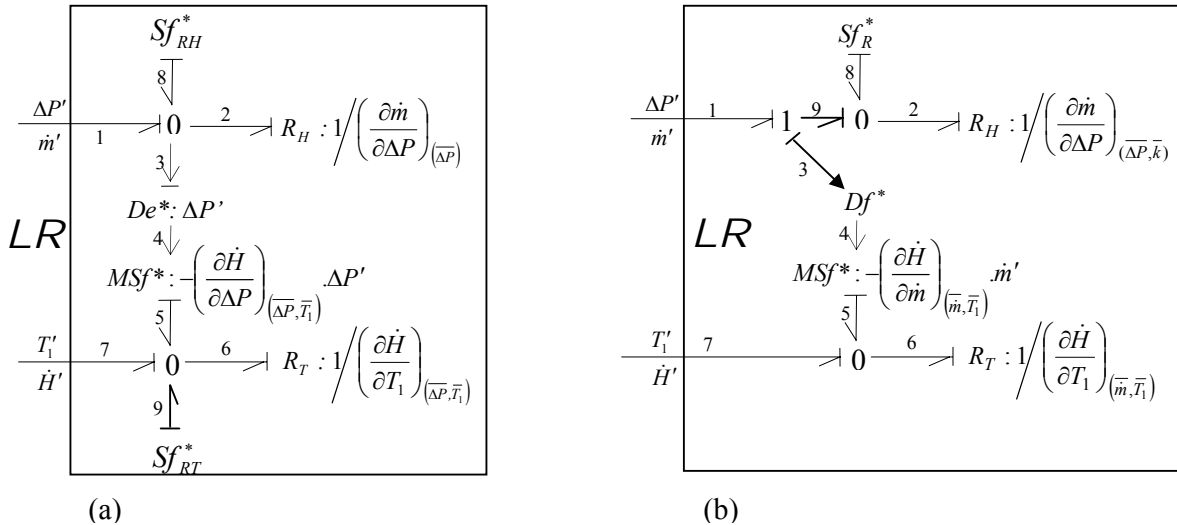
$T_1$  est la température du fluide à l'entrée du multiport et  $k$  représente la constante de la vanne associée à son ouverture.

En considérant les variations des paramètres, la linéarisation de Taylor des équations (3.35) et (3.36) autour du point de fonctionnement  $(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1, \bar{k})$  donne les relations (3.37) et (3.38) :

$$\dot{m}' = \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta P} \right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{k})} \Delta P' + \left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial k} \right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{k})} k' \quad (3.37)$$

$$\dot{H}' = \left( \frac{\partial \dot{H}}{\partial \Delta P} \right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1, \bar{k})} \Delta P' + \left( \frac{\partial \dot{H}}{\partial T_1} \right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1, \bar{k})} T_1' + \left( \frac{\partial \dot{H}}{\partial k} \right)_{(\bar{\Delta P}, \bar{T}_1, \bar{k})} k' \quad (3.38)$$

$\dot{m}'$ ,  $\dot{H}'$ ,  $\Delta P'$  et  $T_1'$  sont les variables incrémentées.  $k'$  représente la variation des paramètres du multiport **R**. A cause de la perturbation des variables de puissance, l'équation (3.37) peut être interprétée en tant qu'une résistance hydraulique avec les pseudo variables de puissance  $\dot{m}'$  et  $\Delta P'$  et une source de flux fictive  $Sf_{RH}^*$  attachée à une jonction-0 (figure 3.19 (a)). La source représente l'effet de  $\Delta R$  au niveau hydraulique. De même, en utilisant l'équation (3.38),  $Sf_{RT}^*$  est ajoutée au niveau thermique.



**Figure 3.19.** Modèle bond graph linéarisé d'un multiport **R** défaillant (Modification de l'ouverture d'une vanne).

Une autre possibilité est d'exprimer  $\dot{H}'$  en fonction de  $\dot{m}'$  et  $T'_1$ , le BG de la figure 3.19 (b) est obtenu. A travers la figure 3.19, on peut voir que la linéarisation du multiport R nous a fourni une meilleure visualisation de l'effet des changements de paramètres  $\Delta R$  en les considérant comme des sources fictives  $Sf_{RH}^*$  et  $Sf_{RT}^*$  dans la figure 3.19 (a) et par la source fictive  $Sf_R^*$  dans la figure 3.19 (b).

### 3.4.3.3.2. Sous modèle d'un défaut paramétrique C dans le BG linearisé (déformation d'un accumulateur)

Les relations constitutives d'un multiport C sont :

$$P_C = \frac{1}{C_H} \int \dot{m}_C dt = F_H(m_C, C_H) \quad (3.39)$$

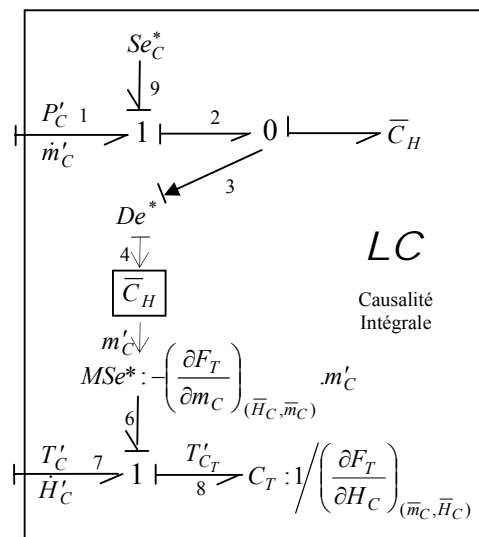
$$T_C = \frac{\int \dot{H}_C dt}{\int \dot{m}_C \cdot C_p \cdot dt} = F_T(m_C, H_C) \quad (3.40)$$

L'équation (3.39) est linéaire si la capacité  $C_H$  est considérée comme constante. Par contre, une faute comme une déformation du corps de l'accumulateur par exemple, la rend non linéaire. La linéarisation de Taylor des équations (3.39) et (3.40) autour du point de fonctionnement  $(\bar{C}_H, \bar{m}_C, \bar{H}_C)$  est donnée par les équations (3.41) et (3.42) respectivement.

$$P'_C = \frac{1}{\bar{C}_H} \int \dot{m}'_C dt - \frac{\bar{m}_C}{\bar{C}_H^2} C'_H = \frac{1}{\bar{C}_H} \int \dot{m}'_C dt - Se_C^* \quad (3.41)$$

$$T'_C = \left( \frac{\partial F_T}{\partial H_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)} \cdot H'_C + \left( \frac{\partial F_T}{\partial m_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)} \cdot m'_C \quad (3.42)$$

Le BG thermodynamique linéarisé résultant est montré sur la figure 3.20.



**Figure 3.20.** Modèle bond graph linéarisé d'un multiport C défailant (Déformation d'un accumulateur).

Grâce à la linéarisation, le changement des paramètres  $\Delta C$  est visualisé par la source fictive  $Se_C^*$ .

On peut observer que suite à l'introduction de la source dans la figure 3.20, le sous modèle du multiport  $C$  dans le BG linéarisé correspondant à un stockage d'énergie thermique et hydraulique ne conserve pas l'énergie.

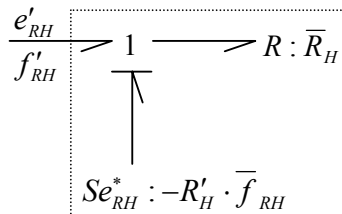
**Remarque 3.4.1.** Considérons maintenant la situation d'une faute qui provient d'une chute d'un objet dans l'accumulateur (la capacité du réservoir diminue abruptement). Le même modèle bond graph est obtenu si on ne considère pas les échanges thermiques entre l'objet et l'accumulateur. Cependant, l'objet peut ne pas avoir la même température que l'accumulateur et par conséquent un terme  $\dot{Q}'_f$  exprimant la chaleur échangée modifiée  $\dot{H}'_C$  et par suite  $H'_C$  dans l'équation (3.42). En remplaçant  $H'_C$  par  $H'_C - Q'_f$  dans l'équation (3.42), une autre source d'effort fictive  $Se_f^* : \frac{1}{\bar{m}_C C_P} Q'_f$  apparaît et doit être attachée à la jonction thermique 1 (figure 3.20).

#### 3.4.3.3.3. Fuite d'un flux thermofluide (la forme linéarisée)

La linéarisation des modèles BG donnés par les figures 3.10 et 3.11 correspond à la linéarisation de l'élément à 1-port  $R_H$  et de la source modulée  $SF_T$ . La linéarisation de  $SF_T^*$  conduit à deux sources  $SF_{1T}^* : -\bar{m}_f C_P T'$  et  $SF_{2T}^* : -\bar{m}'_f C_P \bar{T}$ . Pour l'élément simple  $R_H$ , un changement  $\Delta R_H$  dans la résistance perturbe les variables de puissance sur ses ports et par conséquent on peut écrire :

$$e'_{RH} = \bar{R}_H \cdot f'_{RH} + R'_H \cdot \bar{f}_{RH} \quad (3.43)$$

Cette équation peut être interprétée comme montre la figure 3.21. La source  $Se_{RH}^*$  représente l'effet de la variation du paramètre  $R_H$ .



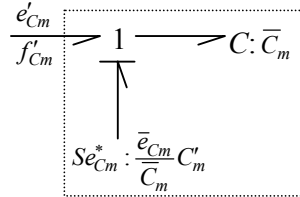
**Figure. 3.21.** Sous modèle BG linéarisé d'une défaillance sur  $R_H$  (Phénomène de fuite).

#### 3.4.3.3.4. Perte de chaleur (la forme linéarisée)

Le phénomène d'entartrage est considéré comme une variation du paramètre  $\Delta C_m$  dans l'élément simple à 1-port  $C : C_m$  modélisant le stockage d'énergie calorifique par la paroi de l'accumulateur. Alors que les deux résistances à 1-port  $R : R_{fm}$  et  $R : R_{me}$  sont considérées constantes, un changement  $C'_m$  dans la capacité perturbe les variables de puissance sur ses

ports et par suite les déplacements généralisés  $q_{C_m} + q'_{C_m}$  : ce qui peut être représenté en BG comme montré dans la figure 3.22.

$$e'_{C_m} = \frac{1}{C_m} \cdot q'_{C_m} - \frac{\bar{e}_{C_m}}{C_m} C'_m \quad (3.44)$$



**Figure 3.22.** Sous modèle BG linéarisé d'une défaillance sur  $C_m$  (entartrage).

**Remarque 3.4.2.** Une faute issue d'un problème d'isolation peut être traitée comme une variation de  $R_{fm}$ . La linéarisation de l'élément à 1 port R correspondant conduit à une source d'effort  $Se^*_{Rfm}$  attachée à une jonction 1 comme dans la figure 3.21.

Un tableau récapitulatif (tableau 3.1) montre les fautes considérées sur les composants en génie des procédés par leurs sources fictives correspondantes.

Composants Fonctionnels	Fautes Structurelles						Fautes Paramétriques			
	R			C			R		C	
	Fuite	Perte de chaleur		Fuite	Perte de chaleur		Changement dans l'ouverture d'une vanne	Changement dans l'ouverture d'une vanne	Déformation dans l'accumulateur	Chute d'un objet dans un réservoir
Description des fautes		Entartrage	Problème d'isolation		Entartrage	Problème d'isolation				
FIG ( )	(3.11, 3.21)	(3.14a, 3.22)	(3.14a, 3.21)	(3.10, 3.21)	(3.14a, 3.22)	(3.14a, 3.21)	(3.8a, 3.19a)	(3.8a, 3.19b)	(3.8b, 3.20)	(3.8b, 3.20)
Sources Fictives	$Se^*_{RH}$	$Se^*_{Cm}$	$Se^*_{Rfm}$	$Se^*_{RH}$	$Se^*_{Cm}$	$Se^*_{Rfm}$	$Sf^*_{RH}, Sf^*_{RT}$	$Sf^*_R$	$Se^*_C$	$Se^*_C, Se^*_f$

**Tableau 3.1.** Tableau Récapitulatif (sources fictives à surveiller) dans le BG linéarisé.

Dans le cas où plusieurs sources fictives apparaissent, chute d'un objet dans un accumulateur par exemple, l'étude de la diagnosabilité considérée à la section suivante, peut être limitée sur n'importe quelle source fictive.

### 3.5. Surveillabilité des processus thermofluides

#### 3.5.1. Introduction

Les outils de modélisation des procédés développés au chapitre 2 sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes de surveillance. Cette section est consacrée à la mise en place de méthodes permettant de détecter et d'isoler les défaillances survenant au sein d'un système. La surveillance des processus est considérée: quels sont les composants, actionneurs et capteurs qui peuvent être surveillés avec une architecture d'instrumentation donnée avant n'importe quelle implémentation industrielle (ou ajout de capteurs) ?

La linéarisation du modèle bond graph suivant la technique expliquée au chapitre 2 permet d'analyser la surveillabilité de certains éléments, directement à partir du modèle bond graph, sans avoir besoin de calculer les RRAs. Basée sur les propriétés causales de la méthodologie bond graph, l'étude de la surveillabilité des défauts additifs (défauts de capteurs et d'actionneurs) est directe mais elle se limite aux systèmes monoénergies. Dans un premier temps, le savoir faire pour les défauts additifs est étendu aux modèles bond graphs multiénergies linéarisés. Dans un second temps, pour traiter les défauts multiplicatifs comme des défauts additifs une "transformation" peut être facilement faite dans le modèle BG où les paramètres à surveiller correspondent aux phénomènes physiques à considérer.

### 3.5.2. Modèles mathématiques

Considérons un système linéarisé à temps invariant, deux types de fautes sont distingués : les fautes additives et les fautes multiplicatives.

La représentation du modèle linéarisé qui prend en compte les différentes défaillances additives peut s'écrire par le système déterministe à temps invariant donné par l'équation (3.45).

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax' + Bu' + Ef \\ y' = Cx' + Du' + Ff \end{cases} \quad (3.45)$$

où  $x' \in R^n$ ,  $u'(t) \in R^m$  et  $y'(t) \in R^p$  représentent respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie du modèle linéarisé.  $f$  représente le vecteur des fautes additives, les matrices  $A, B, C, D, E, F$  sont de dimensions appropriées.

Les fautes additives sont les défaillances au niveau des actionneurs et des capteurs. Soit  $f_1$  le vecteur de défaillances de capteurs et  $f_2$  celui des actionneurs. En dissociant le vecteur  $f$  en  $f_1$  et  $f_2$ , les deux matrices  $E$  et  $F$  sont définies tel que:

$$\begin{bmatrix} E \\ F \end{bmatrix} f = \begin{bmatrix} B & 0 \\ D & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$$

La généralisation de la représentation d'état précédente où toutes les perturbations ou les incertitudes influençant les dynamiques du système  $\gamma$  et le bruit de mesure  $\varepsilon$  (supposé être un bruit blanc stochastiquement déterminé  $\varepsilon \sim N(o, \Gamma)$ , c à d de moyenne nulle et de variance  $\Gamma^2$ ) interviennent :

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax' + Bu' + Ef + G\gamma + K\varepsilon \\ y' = Cx' + Du' + Ff + H\gamma + L\varepsilon \end{cases}$$

avec  $G, H, K$  et  $L$  des matrices de dimensions appropriées. En général, on n'introduit pas les perturbations au niveau des capteurs car elles peuvent être compensées. Par contre, le bruit de mesure  $\varepsilon$  agit sur tout le vecteur de la sortie  $y$  et donc doit être pris en compte. La représentation d'état devient :

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax' + Bu' + Ef + G\gamma + K\varepsilon \\ y' = Cx' + Du' + Ff + \varepsilon \end{cases} \quad (3.46)$$

Les fautes multiplicatives sont les défaillances des composants, elles apparaissent comme une variation dans les matrices d'états (équation (3.33))

$$\begin{cases} \dot{x}' = (A + \Delta A)x' + (B + \Delta B)u' + G\gamma + K\varepsilon \\ y' = (C + \Delta C)x' + (D + \Delta D)u' + \varepsilon \end{cases} \quad (3.47)$$

Lors de l'automatisation de ces systèmes, les défaillances dues aux algorithmes de commande doivent aussi être prises en considération.

### 3.5.3. Cahier des charges

Comme nous l'avons mentionné, nous distinguons les défaillances dues au processus physique, celles dues aux capteurs et celles dues aux actionneurs et enfin celles dues aux algorithmes de commande. Le cahier des charges doit répondre à trois questions :

1. *Définition des objectifs.* On précise les composants (équipement, capteur, actionneur, contrôleur, ...) et les défaillances associées qui doivent être détectées et/ou localisées.
2. *Définition des performances* attendues en termes de détection du système de surveillance. Pour cela on caractérise l'efficacité des procédures de diagnostic par quelques critères d'évaluation *Patton et al. (1989)* qui sont :
  - la sensibilité aux défauts: capacité du système de surveillance à détecter les défauts de faible amplitude. Ce concept est lié à la probabilité de fausse alarme (détection d'une anomalie en fonctionnement normal) et la probabilité de non détection (défaillance non détectée). La non détection est caractérisée à l'aide du langage probabiliste *Basseville et al. (1987)*.
  - la rapidité de détection: capacité à détecter les défauts dans les meilleurs délais afin de permettre au système de supervision de réagir rapidement. Cette qualité de détection est caractérisée par un délai moyen (qui peut être déterministe ou aléatoire) qui s'écoule entre l'apparition d'une défaillance et l'alarme générée par le système de surveillance.
  - la robustesse: capacité des techniques à opérer en présence de bruits de mesure, de perturbations et des erreurs de modélisation, avec le minimum de fausses alarmes.
  - l'isolabilité: capacité à retrouver l'origine de la défaillance, c'est à dire à identifier la cause de la panne parmi les causes prises en compte par le système de surveillance. L'idéal serait évidemment que toutes les causes de défaillance retenues soient parfaitement localisables.
3. *Définition des contraintes.* On doit préciser l'architecture de l'instrumentation optimale selon des critères de coût.

Dans le cadre de ce travail, nous poserons comme cahier de charges, la détection et la localisation des défaillances des processus thermofluides au niveau :

1. des capteurs,

2. des actionneurs,

3. des composants physiques : les fautes physiques à surveiller sont principalement

- Fuite de matière (fuite du fluide dans un réservoir ou dans une conduite),
- Défaut de calorifugeage thermique au niveau des composants (chaudière, réservoir, conduite,...),
- Bouchage des conduites, entartrage, changement dans l'ouverture d'une vanne,
- Déformation dans l'accumulateur, chute d'un objet dans un réservoir,...

La robustesse du système de surveillance n'est pas prise en compte: nous supposons que les erreurs de modélisation sont négligeables et sont de l'ordre de la précision des capteurs devant les incertitudes de mesure.

On considère aussi que toutes les entrées sont connues. D'autre part les procédures de décision ne sont pas développées.

L'analyse de l'observabilité d'un système représente une étape primordiale dans le cadre de la surveillance et de la tolérance aux fautes, elle apparaît comme une condition nécessaire de la surveillabilité. Rappelons la définition de la surveillabilité d'une variable:

**Définition 12.** *La surveillabilité d'une variable est la possibilité de localiser et de détecter une défaillance affectant cette variable.*

#### **3.5.4. Surveillabilité des capteurs**

Comme toutes les défaillances affectant les capteurs sont détectables, l'étude de leur surveillabilité se limite à la propriété de localisation des défaillances. La matrice de transfert constitue une base de relations de redondance analytique où les signatures des capteurs sont toutes différentes, ce qui permet de localiser leur défaillance. Donc si le nombre de capteurs est strictement supérieur à un alors toutes les sorties des capteurs sont isolables et par suite surveillables *Tagina (1995)*. Dans l'absolu et hors de son contexte, cette propriété est contestable.

#### **3.5.5. Surveillabilité des sources à partir des systèmes thermofluides linéarisés**

Certains chercheurs proposent de décomposer les liens couplés en liens simples puis à appliquer les outils déjà développés pour les bond graphs monoénergie *Busson & Ould Bouamama (2000)*. Un lien double énergie modélisant l'énergie hydraulique et thermique est alors transformé en un lien hydraulique et un lien thermique composé d'un élément R fictif modulé par la variable de flux hydraulique afin de modéliser le couplage des deux énergies. Toutefois, le modèle bond graph découplé devient assez complexe avec le nombre d'énergies régissant le système physique à surveiller et le lien d'information modulant le lien thermique.

Notre approche consiste en une linéarisation des multiports, obtention du modèle bond graph linéarisé global (chapitre 2) permettant ensuite une analyse du bond graph par un parcours de chemins causaux.

Le but de cette approche est donc de proposer une méthode pour distinguer les actionneurs surveillables des actionneurs non surveillables à partir du bond graph thermodynamique

linéarisé avant même de générer les relations de redondance analytique. Certaines propositions pour la surveillabilité des sources ont été données pour des modèles bond graphs monoénergies Tagina (1995). Les résultats sont étendus pour les modèles bond graph à énergies couplées linéarisés en utilisant les chemins causaux généralisés Ould Bouamama et al. (2001), Ould Bouamama et al. (2000), El Osta et al. (2004a):

**Proposition 8.** *Ould Bouamama et al. (2000) Deux sources de commande  $S_i$  et  $S_j$  dans le modèle bond graph thermodynamique linéarisé ne sont pas surveillables si :*

**(a)** *le parcours du chemin causal généralisé liant la source  $S_i$  au capteur  $D_i$  contient le chemin causal généralisé parcouru de la source  $S_j$  au même capteur  $D_i$ ,*

**(b)** *les éléments du chemin  $S_i-D_i$  ne figurant pas dans  $S_j-D_i$  n'apparaissent dans aucune boucle causale quand on enlève le chemin  $S_j-D_i$  du modèle bond graph à surveiller.*

Cette proposition peut être reformulée de la façon suivante :

**Corollaire 1.** *Pour que deux sources de contrôle  $S_i$  et  $S_j$  soient surveillables, il suffit qu'un des chemins causaux non communs liant les deux sources à un capteur ne reste pas le même en considérant un autre capteur. Autrement dit, il suffit de trouver deux capteurs où un des chemins causaux non communs entre les sources et l'un des capteurs est différent par rapport à l'autre capteur.*

La proposition précédente ne concernant que la surveillabilité des défaillances simples, une nouvelle approche est proposée pour traiter le cas des défaillances multiples ou simultanées.

**Proposition 9.** *Une condition suffisante pour que les actionneurs soient simultanément surveillables est d'avoir une matrice de signature des fautes diagonales au niveau des actionneurs.*

1/ *Il faut alors avoir autant de capteurs que d'actionneurs.*

2/ *Sur un bond graph: les sources et les capteurs sont reliés par des chemins causaux disjoints.*

**Preuve.**

Soit  $m$  le nombre des actionneurs dans un modèle linéaire ou linéarisé. Le fait d'avoir  $m$  chemins causaux entrées-sorties disjoints nous permet d'inverser la matrice de transfert et d'écrire les sources en fonction des sorties :

$$\begin{pmatrix} u'_1 \\ u'_2 \\ \vdots \\ u'_m \end{pmatrix} = T^{-1}(s) \cdot \begin{pmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ \vdots \\ y'_m \end{pmatrix}$$

Cet ensemble de relations entre les variables connues sont des RRAs permettant d'isoler les fautes sur les sources car il permet d'avoir des signatures différentes des sources (tableau 3.2). En effet, les vecteurs Booléens des signatures des fautes des sources de commande sont tous

différents et non nuls, et par conséquent les fautes pouvant les affecter sont surveillables.

ARRs	$u'_1$	$u'_2$	...	$u'_m$	$y'_1$	$y'_2$	...	$y'_m$
ARR <sub>1</sub>	1	0	...	0	1	1	...	1
ARR <sub>2</sub>	0	1	...	0	1	1	...	1
	0	0	...	0	1	1	...	1
ARR <sub>m</sub>	0	...	0	1	1	1	...	1

**Tableau 3.2.** Matrice des Signatures des fautes.

La forme diagonale de la matrice des signatures des fautes au niveau des sources permet l'isolation des fautes simultanées : par exemple le fait que les deux premières résidus ARR<sub>1</sub> et ARR<sub>2</sub> n'aient pas une valeur nulle correspond à des fautes simultanées au niveau des sources  $u'_1$  et  $u'_2$  alors qu'on déduit une faute simple au niveau de  $u'_1$  si la première relation de redondance analytique ARR<sub>1</sub> est la seule à ne pas s'annuler. □

**Proposition 10.** *En régime sous saturé, en présence de capteurs thermiques, un seul capteur hydraulique suffira pour isoler l'ensemble des actionneurs hydrauliques de l'ensemble des actionneurs thermiques.*

**Preuve.**

En régime sous saturé, il y a des chemins causaux entre :

- les sources hydrauliques et les capteurs hydrauliques
- les sources hydrauliques et les capteurs thermiques
- les sources thermiques et les capteurs thermiques

En utilisant la proposition 8, on peut déduire qu'un seul capteur hydraulique assurera la surveillabilité de l'ensemble des actionneurs hydrauliques avec l'ensemble des actionneurs thermiques. Ceci peut être montré aussi en regardant les RRAs. La matrice de transfert  $M$  est de la forme :

$$\begin{pmatrix} y'_H \\ y'_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_H & 0 \\ M_{HT} & M_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u'_H \\ u'_T \end{pmatrix}$$

Les relations de redondance analytiques sont donc:

$$\begin{aligned} RRA_H &: y'_H - M_H u'_H = 0 \\ RRA_T &: y'_T - M_{HT} u'_H - M_T u'_T = 0 \end{aligned}$$

La matrice de signatures des fautes est donnée par le tableau 3.3. Un terme "1" ("0") dans la ligne  $i$  et la colonne  $j$  signifie que la RRA  $i$  est sensible (non sensible) à la faute  $j$ .

RRAs	$u'_H$	$u'_T$	$y'_H$	$y'_T$
RRA <sub>H</sub>	1	0	1	0
RRA <sub>T</sub>	1	1	0	1

**Tableau 3.3.** Matrice des Signatures des fautes.

En présence de capteurs thermiques, un seul capteur hydraulique permet d'avoir des signatures différentes de  $u'_H$  et de  $u'_T$  et par suite d'isoler l'ensemble des actionneurs hydrauliques de l'ensemble des actionneurs thermiques. Cette proposition reste vraie pour les systèmes non linéaires (théorème 9, chapitre 4). □

Basée sur les résultats obtenus, la diagnosabilité des actionneurs du modèle BG multiénergie linéarisé est développée en utilisant seulement les détecteurs thermiques. En outre, l'étude est limitée seulement sur le système thermique.

**Théorème 7.** *En régime sous saturé, une condition nécessaire pour que les actionneurs hydrauliques dans les systèmes thermofluides linéarisés soient surveillables est la surveillabilité des sources fictives actives (issues de la linéarisation des actionneurs thermofluides) au niveau thermique.*

**Preuve.**

Dans des systèmes thermofluides, on distingue les sources thermiques par conduction (thermoplongeurs) et les sources thermofluides (associés aux sources de flux par convection). Les actionneurs de ce type de sources thermofluides sont généralement des pompes (branchées ou pas) au circuit thermofluide.

Les actionneurs hydrauliques issus de la linéarisation des modèles de pompes agissent d'une façon indirecte sur le sous système thermique. L'effet des sources hydrauliques à surveiller sur le système thermique est représenté dans les deux cas (branchée ou pas) par des sources fictives actives  $\underline{S}^*$  représentées par  $Sf_H^* : C_p \bar{T}_1 \dot{m}'$  (figure 3.23) et un ensemble des sources fictives passives ( $MSe^*, MSf^*$ ) provenant de la linéarisation des composants multiports **C** et **R**.

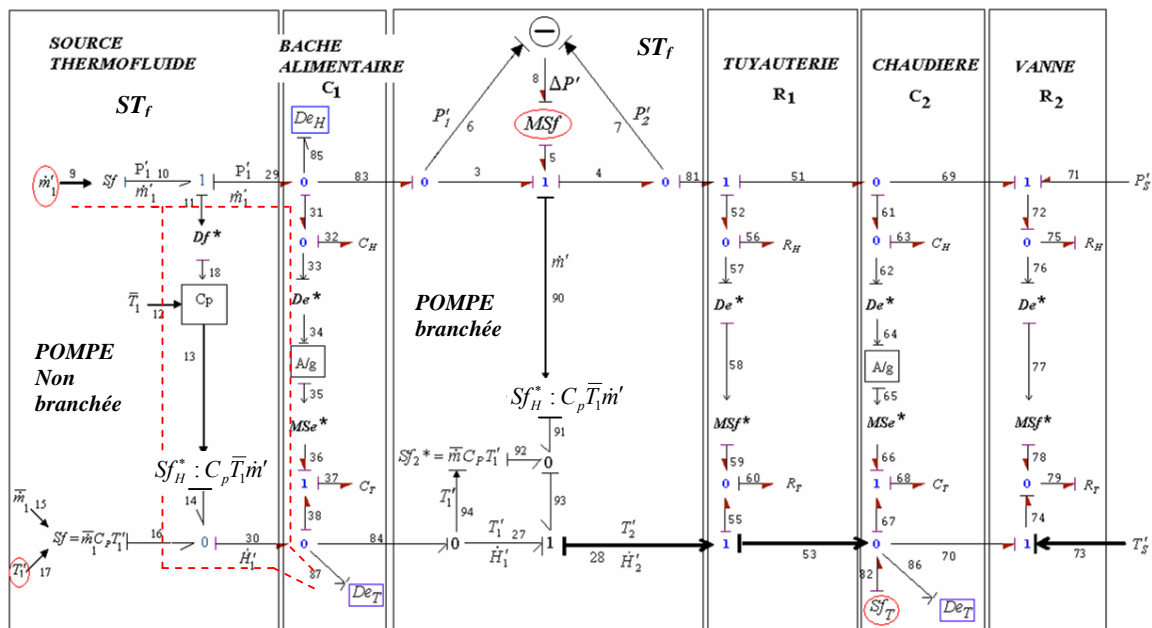


Figure 3.23. Sources thermofluides dans un modèle BG linéarisé.

La figure 3.23 représente un exemple illustrant les différents modèles bond graphs linéarisés de sources thermofluides (le modèle bond graph global est celui d'une partie du GV considérée au chapitre 5).

Rappelons la proposition donnée dans *Tagina (1995)* : *Les fautes affectant les sources sont détectables et isolables si les vecteurs colonnes de la matrice de transfert sont linéairement indépendants*. Cette approche reste applicable en présence de chemins causaux généralisés *Rimaux (1995)*. Pour cela nous nous intéressons au calcul de la matrice de transfert.

Le terme  $m_{ij}$  d'une matrice de transfert  $M(s)$  reliant la sortie  $i$  à l'entrée  $j$  est défini par l'équation (3.48), où  $T_k(s)$  est le gain du  $k^{ième}$  chemin causal liant la source (actionneur)  $S_j$  au détecteur  $D_i$ ,  $D(s)$  et  $D_k(s)$  sont les déterminant et déterminant réduit du modèle BG.

$$m_{ij} = \frac{D_i(s)}{U_j(s)} = \frac{\sum_k T_k(s) \cdot D_k(s)}{D(s)} \quad (3.48)$$

L'équation (3.48) est calculée sur un terme reliant un actionneur hydraulique  $\dot{m}'$  d'une source thermofluide (pompe branchée ou pas) à un détecteur thermique  $De_T$ . Un des chemins causaux contiendra le chemin causal parcouru de la source fictive correspondante  $Sf_H^* : C_p \bar{T} \dot{m}'$  au détecteur  $De_T$  ( $T_i(s) = \alpha \frac{D_i(s)}{Sf_H^*(s)}$ ;  $\alpha$  est une constante).

Considérons la matrice de transfert reliant les sorties thermiques et les sources  $Sf_H^*$ . Si les vecteurs colonnes de cette matrice de transfert sont linéairement indépendants, les vecteurs colonnes des actionneurs hydrauliques correspondants  $\dot{m}'$  dans la matrice de transfert  $M(s)$  seront linéairement indépendants.

Par conséquent, l'étude complexe de la surveillabilité des actionneurs hydrauliques par le moyen des détecteurs thermiques (la complexité est que plusieurs chemins causaux relient un actionneur hydraulique à un détecteur thermique) se résume à une simple étude de surveillabilité des actionneurs dans un système monoénergie: en effet, si les sources  $Sf_H^*$  sont surveillables dans le système thermique alors les sources hydrauliques  $\dot{m}'$  le seront aussi. □

**Théorème 8.** *Dans les systèmes thermofluides linéarisés, avec 1 seul détecteur thermique bien placé (en aval de tous les circuits thermofluides) l'ensemble des actionneurs hydrauliques devient surveillable avec l'ensemble des actionneurs thermiques.*

**Preuve.**

Soient  $\underline{S}^*$  l'ensemble des sources fictives actives et  $\bar{S}^*$  l'ensemble des sources fictives passives ( $MSe^*, MSf^*$ ). Le vecteur  $\underline{S}^*$  peut être décomposé en un ensemble de sources modulées par des variables hydrauliques et un autre ensemble modulées par des variables thermiques :

$$\underline{S}^* = Sf_H^* + Sf_T^* \quad (3.49)$$

$Sf_T^*$  sont les sources de flux par convection de type 1 et 2. Les vrais actionneurs thermiques sont les sources thermiques par conduction  $Sf_T$ .

Les actionneurs industriels de  $Sf_H$  (sources hydrauliques) sont des pompes branchées ou non au circuit thermofluide.

Considérons les RRAs générées à partir de la matrice de transfert  $M(s)$  reliant les différentes entrées-sorties. Un actionneur thermique par conduction  $Sf_T$  n'apparaît que dans les RRAs thermiques. S'il intervient au niveau d'un composant  $j$ , il possèdera la même signature de faute que la source passive correspondante  $\bar{S}_j^*$  ( $MSe^*$  ou  $MSf^*$ ). En effet, quelque soit le placement du capteur thermique, s'il existe un chemin causal entre la source  $\bar{S}_j^*$  et le capteur, il contiendra le chemin causal parcouru de  $Sf_T$  à ce capteur.

Les signatures de  $Sf_H$  :  $m'$  dans les RRAs thermiques sont des combinaisons des signatures des sources fictives actives  $\underline{S}^*$  et passives  $\bar{S}^*$  car les chemins causaux reliant une source  $Sf_H$  et un capteur thermique passeront par ces sources fictives.

Ce qui nous permet de déduire qu'en présence d'un capteur thermique, l'ensemble des actionneurs hydrauliques est surveillable avec l'ensemble des actionneurs thermiques: un actionneur hydraulique est connecté à un capteur thermique par un ensemble de chemins causaux alors qu'un seul chemin causal lie un actionneur thermique à un détecteur thermique.

Le détecteur est choisi d'être placé en aval de tous les circuits thermofluides pour assurer la détectabilité de tous les actionneurs. □

### *Importance des résultats*

D'après les théorèmes 7 et 8, on déduit qu'il est possible d'assurer la surveillance de tous les actionneurs thermiques et hydrauliques juste avec des détecteurs thermiques. De cette façon on tend à optimiser la fonction coût (le coût global de l'installation), puisque un capteur thermique est beaucoup moins cher qu'un capteur hydraulique. De plus, les instruments de mesure de pression sont moins fiables, ils sont sensibles aux variations de la pression atmosphérique ce qui réduira considérablement l'exactitude de leurs mesures. Les capteurs de débit hydraulique restent encore peu précis dans l'industrie.

### **3.5.6. Surveillance des composants**

Cette section décrit une méthode graphique destinée à diagnostiquer les défauts de composants des systèmes continus initialement modélisés par l'approche bond graph. Les processus industriels présentent en général une redondance physique au niveau des capteurs ou des actionneurs mais pas au niveau des composants. C'est pourquoi leur surveillance s'avère nécessaire. Basée sur les propriétés structurelles et causales de l'outil BG, la méthode proposée est directe et ne demande pas la génération des RRAs. Elle est valable dans le cas linéaire ainsi que dans le cas non linéaire, pour les systèmes monoénergies et les systèmes multiénergies.

La modélisation de systèmes est la première étape dans l'étude de la diagnosabilité. En utilisant une approche BG, la correspondance entre les éléments et les phénomènes physiques qui leur sont associés facilite l'étude de la diagnosabilité et permet ainsi une meilleure visualisation et compréhension du comportement du système.

Dans la littérature, les approches quantitatives de la surveillance des composants sont basées sur une estimation des paramètres et exigent la construction d'un observateur pour chaque défaut *Patton & Chen (1997), Isermann (1984)*. De plus, ces techniques supposent l'utilisation des valeurs nominales des composants qui ne sont pas généralement connues pour les processus réels. D'autres auteurs estiment les paramètres en utilisant la notion de la bicausalité sur un modèle BG *Gawthrop (1995)*. Cette approche suppose l'utilisation d'un capteur d'effort et de flux pour chaque composant surveillé, ce qui augmente le coût de réalisation.

Il a été montré au chapitre 2 que la linéarisation des modèles BG fournit une meilleure visualisation de l'effet du couplage des énergies multidomaines visualisé par des sources modulées. Dans cette section, la linéarisation est refaite de façon à visualiser aussi par des sources fictives l'effet des défauts paramétriques et structurels.

L'intérêt innovateur de cette section est d'étendre la méthode de diagnostic développée pour les actionneurs à la surveillance des composants. De cette façon, les propriétés causales et structurelles du modèle linéarisé obtenu seront employées pour déduire graphiquement la surveillabilité des composants. La méthode suivie est décrite par l'organigramme donné par la figure 3.22.

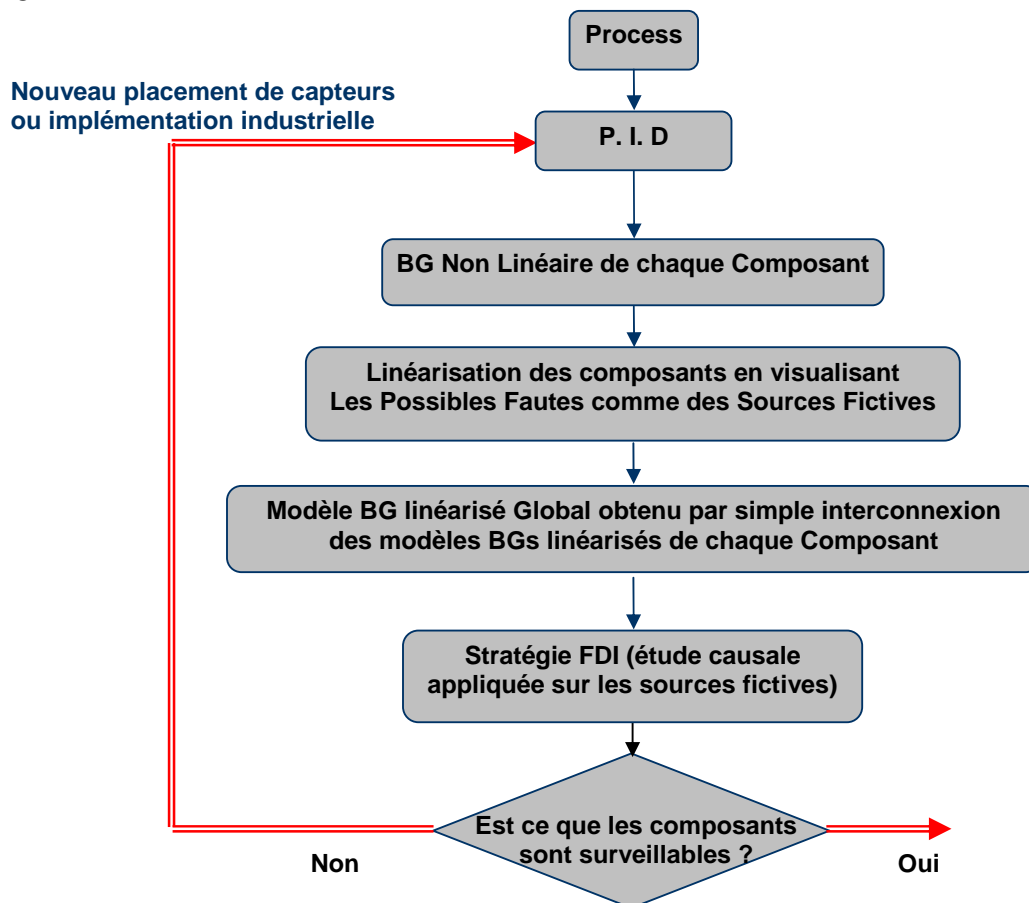


Figure 3.24. Organigramme de la technique de surveillance suivie.

Après avoir classifié et modélisé les défauts des composants en génie des procédés, la méthode de linéarisation suivie fait apparaître les variations des paramètres des composants ou plus généralement les fautes composants (défauts paramétriques et structurelles) en termes de sources fictives. La linéarisation des composants transformera les fautes multiplicatives sous forme additives.

Les représentations d'un modèle linéarisé considérant les différentes défaillances additives d'une part et les défaillances multiplicatives d'autre part ont été décrites par les équations déterministes à temps invariant (3.46) et (3.47). En utilisant une approche classique, l'écriture de l'équation (3.47) sous la forme de l'équation (3.46) dans le but de considérer les fautes multiplicatives sous forme additive demande un calcul complexe basé sur la transformation de Laplace, ce qui peut être évité avec une approche BG.

Il est montré, d'abord comment produire avec une approche BG des modèles linéarisés en visualisant les défauts sur les composants par des sources fictives (sous forme additive). La question qui se pose en deuxième étape: comment appliquer sans besoin de calcul une stratégie de FDI pour la surveillance de ces sources fictives en vue de la surveillance des composants ?

**Proposition 11.** *El Osta et al. (2004c) Une condition suffisante pour que deux fautes composants présumées soient surveillables est d'avoir leurs sources fictives correspondantes surveillables.*

**Preuve.**

A partir du PID, le BG global linéarisé est construit en remplaçant chaque composant par son modèle linéarisé. À l'exclusion de l'hypothèse de défauts additifs (fautes sur les actionneurs et capteurs) seulement des défauts composants sont considérés. Comme le BG en mode défaillant exprime les défauts composants par des sources, l'équation d'état du modèle BG linéarisé en mode défaillant est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{x}' = Ax' + Bu' + B'S^* \\ y' = Cx' + Du' + D'S^* \end{cases} \quad (3.50)$$

$S^*$  dénote les sources fictives correspondantes aux composants défectueux. Ce vecteur dépend des valeurs d'état et d'entrée à l'équilibre  $\bar{x}$  et  $\bar{u}$ .  $B'$  et  $D'$  peuvent être directement déterminés en parcourant les chemins causaux dans le modèle BG linéarisé. Grâce à la bijection entre les composants et les sources fictives, on transforme le diagnostic des composants à une approche de surveillance orientée sources fictives.

Après l'application de la transformée de Laplace sur l'équation (3.50), la fonction de transfert  $M^*(s)$  reliant  $S^*$  à  $y'$  est donnée par l'équation (3.51).

$$M^*(s) = [C.(sI - A)^{-1}.B' + D'] \quad (3.51)$$

En considérant que les petites variations infinitésimales des paramètres, cette matrice devient la matrice de sensibilité définie par Borutzky et Granda “ $S = \frac{dy}{dP}$ ” (où  $P$  est le vecteur des paramètres) *Borutzky & Granda (2001)*.

Considérons la fonction de transfert  $M^*(s)$  ( $i = 1 \dots p$ ,  $j = 1 \dots n$ ) où  $n$  est le nombre de sources fictives modélisant les défauts sur les composants, un terme  $m_{ij}$  de cette matrice peut être obtenu en utilisant la formule de Mason:

$$m_{ij} = \frac{y_i(s)}{S_j^*(s)} = \frac{\sum_k T_k(s).D_k(s)}{D(s)} \quad (3.52)$$

où  $T_k(s)$  est le gain du  $k^{\text{ème}}$  chemin causal liant la source fictive  $S_j^*$  au capteur  $D_i$ ,  $D(s)$  et  $D_k(s)$  sont respectivement le déterminant et le déterminant réduit du modèle BG.

Un défaut affecté à un composant  $l$  (représenté par une source fictive  $S_l^*$ ) est isolable Ssi le vecteur  $[m_{1l} \dots m_{pl}]^t$  n'est proportionnel à aucun vecteur colonne  $[m_{1j} \dots m_{pj}]^t$  de la matrice de transfert  $M^*(s)$  ( $j \neq l$ ). En ce qui concerne la modélisation BG, ceci signifie que le chemin causal généralisé liant une source à n'importe quel capteur contient le chemin causal parcouru pour aller de l'autre source au même capteur (ou inversement) et les éléments du chemin non commun n'apparaissent dans aucune boucle causale (autrement ils perturbent  $D_k(s)$ ). □

Pareillement pour les défauts simultanés au niveau des composants la proposition 12 peut être énoncée :

**Proposition 12.** *Une condition suffisante pour que deux fautes composants présumées soient simultanément surveillables est d'avoir leurs sources fictives correspondantes simultanément surveillables.*

La preuve est évidente. □

Ces résultats peuvent être généralisés pour inclure la surveillabilité du sous ensemble d'éléments {actionneurs, composants}. Alors que les composants sont représentés par des sources fictives, l'étude de la surveillabilité d'un actionneur avec un composant est donnée par la proposition 13 qui considère les défauts simples et multiples.

**Proposition 13.** *Une condition suffisante pour qu'une faute composant et une faute actionneur soient surveillables est d'avoir la source de l'actionneur et la source fictive du composant surveillables. Pour la surveillabilité des fautes simultanées, la source de l'actionneur et la source fictive du composant doivent être simultanément surveillables.*

**Exemple 3.5.1.** Considérons l'exemple donné par le schéma 1.5 au chapitre 1. La capacité du réservoir  $C$  et la vanne modulée  $R$  constituent l'ensemble des paramètres des composants physiques et sont ainsi les possibles candidats de défaut. Considérons par exemple le cas où la capacité du réservoir diminue brusquement, ce qui se produit quand un objet tombe dans le réservoir. L'autre composant supposé être défectueux est la vanne  $R$ .

Il a été montré par la méthode de génération des RRAs au chapitre 1 que les deux défauts paramétriques au niveau du réservoir et de la vanne sont surveillables. Afin d'illustrer la méthodologie développée, nous allons considérer les deux composants défectueux (les défauts multiplicatifs) et vérifier la propriété d'isolabilité avec l'approche proposée.

Les liens 21, 22, 41 et 42 (schéma 3.25) ont été ajoutés pour l'étude de la surveillabilité. Sur le modèle BG deux sources fictives sont ajoutées.  $Se_C^*$  représente le défaut composant  $\Delta C$  et  $Se_R^*$  le défaut composant  $\Delta R$ . Ils sont encadrés pour être distingués des vraies sources. Basé sur la proposition 3, notre étude est faite sur  $Se_C^*$  et  $Se_R^*$ .

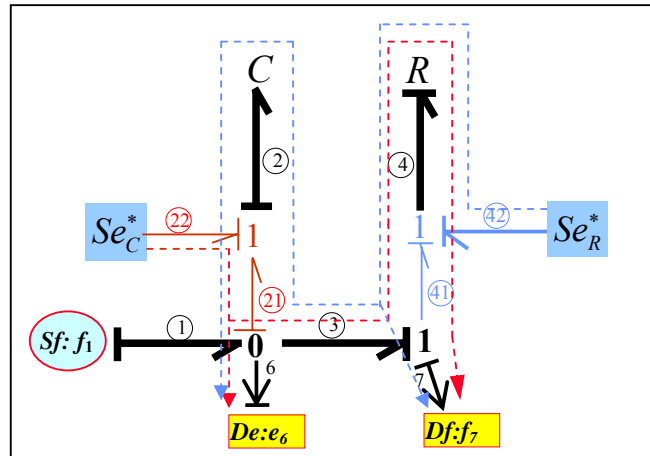


Figure 3.25. Modèle BG Défaillant

Considérons les chemins liants les sources fictives considérées à chacun des capteurs, ce qui conduit:

$$Se_C^* - De : 22 - 21 - 6.$$

$$Se_R^* - De : 42 - 4 - R - 4 - 41 - 3 - 21 - 2 - C - 2 - 21 - 6.$$

$$Se_C^* - Df : 22 - 21 - 3 - 41 - 4 - R - 4 - 41 - 7.$$

$$Se_R^* - Df : 42 - 4 - R - 4 - 41 - 7.$$

En utilisant les propositions 8 et 11, nous déduisons la surveillabilité des sources  $Se_C^*$  et  $Se_R^*$  et par conséquent celle des composants C et R. De plus, le fait qu'on a autant de capteurs que de sources fictives et que ces sources sont liées aux capteurs par des chemins causaux disjoints ( $Se_R^* - Df$ ) et ( $Se_C^* - De$ ) nous permet de déduire que même les défaillances multiples sont surveillables.

De même, la source de la pompe  $S_f$  et le défaut composant  $\Delta R$  sur la vanne représenté par  $Se_R^*$  sont surveillables. En effet, les propositions 9 et 13 montrent que ces deux défauts sont simultanément surveillables.  $\square$

### 3.6. Conclusion

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et causales d'une part et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est introduit en génie des procédés pour l'analyse et la surveillance des processus. En effet, les propriétés structurelles et causales développées pour les vrais BGs restent également valides pour les pseudos BGs. Les travaux présentés dans ce chapitre constituent une étude des propriétés structurelles des systèmes thermofluides linéarisés modélisés par pseudo bond graph.

Dans le cadre de ce thème de recherche, l'analyse des modèles bond graphs linéaires monoénergies est largement développée. Le présent travail propose d'étendre les résultats de recherche obtenus pour les bond graphs monoénergies aux systèmes complexes décrits par des bond graphs multiénergies. Des conclusions sur les propriétés structurelles des systèmes thermofluides sont alors déduites directement de la topologie des bond graphs sans écrire les équations d'état.

Au niveau FDI, deux types de défauts (les défauts additifs et les défauts multiplicatifs) ont été distingués. Les deux cas de défauts simples et de défauts multiples sont considérés. Concernant les défauts additifs (défauts actionneurs ou capteurs), la diagnosabilité des capteurs et celles des actionneurs est considérée séparément. Sans la génération des RRAs, l'étude de la surveillabilité des sources se fait par un simple parcours de chemins causaux.

Les processus industriels présentent en général une redondance physique sur les capteurs et les actionneurs mais pas sur les composants et c'est pourquoi il s'avère indispensable de les surveiller. En utilisant l'outil bond graph, la diagnosabilité des composants a été traitée quantitativement et d'une manière directe (sans besoin de calcul). Développée pour les modèles bond graphs linéaires, la méthode a été ensuite étendue pour inclure les modèles pseudo BGs multiénergies. En effet, une linéarisation des modèles BG fournit une meilleure visualisation de l'effet des changements de paramètres en les visualisant par des sources fictives où la diagnosabilité peut être analysée en appliquant les méthodes classiques de surveillance pour les fautes additives. En utilisant l'architecture d'instrumentation existante et avant que n'importe quelle implémentation industrielle nous serons capable de décider si un défaut composant peut être surveillé.

Défaut	Actionneurs	Composants	Capteurs	Actionneurs-Composants
Défaut Simple	<i>Proposition 8</i>	<i>Propositions 8 et 11</i>		<i>Propositions 8 et 13</i>
Défaut Simultané	<i>Proposition 9</i>	<i>Propositions 9 et 12</i>	<i>§ 3.5.3</i>	<i>Propositions 9 et 13</i>

**Tableau 3.4.** Tableau récapitulant les hypothèses/ résultats.

Le tableau 3.4 récapitule les hypothèses posées et les résultats obtenus. La surveillabilité des fautes simples ou simultanées des modèles bond graphs linéarisés et le type de fautes

considérées (fautes actionneurs, fautes composants, fautes capteurs et fautes actionneurs-composants) sont les principales hypothèses considérées. Des résultats directs, ne nécessitant pas la génération de RRAs, sont obtenus basés sur un parcours de chemins causaux. Le tableau 3.4 cite les propositions concernées. En considérant uniquement les défauts capteurs, il a été montré que toutes les possibles fautes sont surveillables. De plus, c'est la surveillabilité des défauts multiples qui est concernée.

Notre approche a été illustrée à un système de 3 réservoirs. Le chapitre suivant traite la diagnosabilité des modèles BGs thermodynamiques non linéaires. Les procédures développées dans ce chapitre seront appliquées sur le générateur de vapeur au chapitre 5.

## Chapitre 4

### ***La surveillance des procédés à énergies couplées : approche non linéaire***

#### **4.1. Introduction**

Le but du chapitre est de concevoir des systèmes de surveillance pour les systèmes non linéaires modélisés par bond graph. Quelques résultats définis pour les systèmes linéarisés modélisés par bond graphs sont étendus aux systèmes non linéaires comportant des multiports. La prise en compte de modèles non linéaires doit permettre de concevoir des algorithmes de surveillance valables sur une large plage de fonctionnement, et non seulement autour de certains points de fonctionnement. *En effet, la surveillabilité d'un composant dans un modèle non linéaire implique sa surveillabilité dans le modèle linearisé alors que contraire n'est pas forcément vrai.* La première partie de ce chapitre considère les différentes défaillances pouvant affecter le processus physique. La deuxième partie concerne les conditions de surveillabilité des actionneurs basée sur la platitude et l'outil bond graph. L'avantage de cette approche est qu'elle traite les défaillances simultanées mais son inconvénient est qu'elle exige autant de capteurs que d'actionneurs à surveiller.

Une des approches utilisée fréquemment dans le domaine de surveillance est celle de la redondance, qui consiste à trouver les valeurs des variables d'un système surdéterminé par différentes manières et vérifier si tous les résultats coïncident. Cette redondance peut être physique ou analytique. La première est facile à appliquer et très fiable, cependant elle est chère et encombrante *Brunet et al. (1990)*. La redondance analytique vise à trouver des relations entre les variables connues du système *Declerck & Staroswiecki (1992)*, *Cocquemot (1993)*. Ces relations (appelées les Relations de Redondance Analytiques (RRAs)) sont habituellement produites du modèle par les méthodes d'analyses structurelles et ne sont satisfaites que si le comportement réel du système coïncide avec le comportement de référence. La génération sous forme symbolique de ces équations 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). Depuis les premiers travaux sur la génération des RRAs initiés par *Potter & Sunam (1977)*, le problème de génération des RRAs a fait l'objet de nombreux travaux principalement dans le cas linéaire *Iserman (1984)*. La détermination des RRAs par le calcul des résidus, peut être réalisée en utilisant différentes approches. La première approche décompose le processus de génération en deux niveaux: le premier est le calcul de la solution en tenant compte des variables inconnues, le second est la substitution de cette solution dans les relations restantes (de telles relations existent quand le système à surveiller est considéré sur-déterminé). La seconde approche a pour

but d'éliminer l'ensemble des variables inconnues en une seule opération. Dans le cas linéaire (forme qui n'est pas adaptée aux systèmes industriels), l'opération de projection est utilisée dans cet objectif et cela conduit aux techniques de l'espace de parité *Chow & Willsky (1984)*. Les relations de parité utilisent la redondance directe au moyen de relations algébriques statiques ou la redondance temporelle issues de l'utilisation de relations dynamiques. Les techniques de redondances par réduction des équations d'état procèdent par élimination de l'état  $x$  des équations d'état du système ( $\dot{x} = Ax + Bu$ ). Le principe réside dans une réduction progressive de la dimension des équations d'état grâce aux équations de mesure ( $y = Cx$ ) *Ragot & Maquin (1994)*. Dans le cas non linéaire, la méthode d'élimination (basée sur la théorie d'élimination des systèmes algébriques) *Diop (1991)*, *Seidenberg (1956)*, *Cox et al. (1992)* donne les mêmes résultats que la méthode de résolution, en plus des relations que l'analyse structurelle ne détecte pas. Cette méthode ne résout pas mais élimine les variables inconnues. L'inconvénient de la méthode d'élimination est que les contraintes utilisées doivent être données sous forme polynomiale (ce qui n'est pas toujours vrai dans les systèmes réels). Des applications à la surveillance d'un moteur à induction et à un échangeur de chaleur (décrit par un modèle statique) sont données dans *Guernez et al. (1997)* et *Staroswiecki & Contet-Verga (2001)*.

L'outil (BG) permet une génération directe des (RRAs) à partir de la représentation graphique avant même d'écrire les équations décrivant le système. Des applications de l'outil bond graph pour la conception de systèmes de supervision (de la génération des RRAs formelles à leur implantation en temps réel dans un procédé réel) sont données dans *Ould Bouamama et al. (2005 a et b)*

Alternativement, quelques auteurs ont proposé des solutions au problème de la FDI pour une classe non linéaire de système en termes d'algèbre différentielle *Diop & Martínez-Guerra (2001)*; *Martínez-Guerra et al. (1998)*. Basé sur l'observabilité algébrique de la variable qui modélise le défaut, le problème de diagnostic dans les systèmes non linéaires est abordé dans *Cruz Victoria et al. (2004)*. En fait, l'étude de la diagnosabilité est basée sur des propriétés structurelles et plus particulièrement sur des degrés de transcendance différentiels. Définies dans le cadre de la théorie de commande algébrique, ces degrés peuvent être calculés à partir d'un bond graph *Achir & sueur (2005)*. Par conséquent, l'étude de la diagnosabilité basée sur l'algèbre différentielle peut être exploitée sur des modèles bond graphs.

Grâce à la forme particulière des modèles en génie des procédés, des résultats intéressants peuvent être déduits. En effet, il s'avère que pour une classe des systèmes thermofluides, il est possible d'identifier (d'isoler) la catégorie (ou le type) de composants (actionneurs hydrauliques, actionneurs thermiques, capteurs hydrauliques et capteurs thermiques) affectés par la défaillance. L'intérêt scientifique de cette approche est de pouvoir isoler deux défauts quelconques mais de types différents. De plus, cette architecture de diagnostic détermine l'endroit de capteurs supplémentaires pour la résolution du problème et trouve ainsi un intérêt pour le problème de placement de capteurs *El Osta et al. (2005a)*. Dans un premier temps, un résultat important sur la diagnosabilité des capteurs thermiques est déduit. En fait, il s'est avéré que tous les capteurs thermiques sont surveillables ce qui réduit par conséquent rigoureusement la taille du problème. Comme exemple illustratif, un réseau de composants interconnectés dans un système thermofluide a été considéré.

Dans un second temps la diagnosabilité des actionneurs est concernée. Une nouvelle approche basée sur la propriété de la platitude est proposée. Cette approche est illustrée par une application thermofluide (un système multienergie non linéaire). La platitude et la

commandabilité étant liées, on retrouve quelques résultats sur la commandabilité obtenus au chapitre précédent.

Le chapitre est organisé comme suit : alors que le processus à surveiller possède un modèle non linéaire complexe combinant les deux énergies thermique et hydraulique la section 2 décrit l'architecture de surveillance développée, la diagnosabilité des capteurs thermiques est ensuite considérée. Ensuite, la notion de platitude est introduite pour la surveillance des actionneurs. Cette approche est appliquée à un système thermofluide de trois réservoirs afin d'analyser l'isolabilité des actionneurs considérés dans la méthodologie (BG) comme des sources de commande. Dans *Achir et al. (2003)* un nouveau point de vue des BGs en termes d'algèbre différentielle, des modules et des champs différentiels a été présenté pour l'identification des sorties plates dans les systèmes non linéaires représentés par BG. Comme les BGs sont bien adaptés pour l'étude de la platitude, ces travaux ont été étendus pour identifier les sorties plates sur les systèmes multiénergies couplés modélisés par pseudo BGs.

La robustesse du système de surveillance n'est pas prise en compte: nous supposons que les erreurs de modélisation sont négligeables et sont de l'ordre de la précision des capteurs devant les incertitudes de mesure.

On considère aussi que toutes les entrées sont connues. D'autre part les procédures de décision ne sont pas développées.

## 4.2. Surveillance des systèmes non linéaires en génie des procédés

Considérons un processus thermofluide couplé, les équations d'état dépendent du phénomène physique modélisé (saturé, sous saturé...). Le point de départ de la mise en œuvre d'un algorithme de surveillance est le Plan des Instruments Détaillé du processus considéré. Il représente le modèle architectural du processus qu'on note  $\Sigma$  constitué de  $n$  composants thermofluides  $\Sigma : \text{COMPS} = \{\text{COMP1} \dots \text{COMP}n\}$ . Ces composants peuvent être des éléments qui transportent de l'énergie (conduite, conduite avec pompe, conduite avec vanne, ...), qui stockent de l'énergie (réservoir, accumulateur, chaudière) ou des sources d'énergies (pompe, thermoplongeur, ...).

Dans cette section, nous poserons comme cahier de charges, la détection et la localisation des défaillances dans les processus thermofluides d'une façon modulaire comme suit :

- l'ensemble des capteurs hydrauliques,
- l'ensemble des capteurs thermiques,
- l'ensemble des actionneurs hydrauliques,
- et l'ensemble des actionneurs thermiques.

Considérons la classe des systèmes non linéaires décrit par:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, u) \\ y(t) = g(x, u) \end{cases} \quad (4.1)$$

où  $x$ ,  $u$  and  $y$  sont respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie,  $f$  et  $g$  sont des fonctions analytiques. Avant de commencer de développer l'architecture de surveillance, une proposition utile est rappelée:

**Proposition 14.** *Staroswiecki (1997) Une condition suffisante pour qu'un système non linéaire décrit par les équations ci dessus ait des relations de redondances analytiques est l'analyticité des fonctions  $f$  et  $g$ . Dans ce cas la dérivation de chaque sortie  $y_i$  jusqu'à un ordre  $s_i$  conduit à un système de  $\sum_i (s_i + 1)$  équations tel que :*

$$\bar{y} = G(x, \bar{u}) \quad (4.2)$$

*Il existe alors  $\sum_i (s_i + 1) - r_x$  relations de redondance analytiques sous la forme :*

$$w(\bar{y}, \bar{u}) = 0 \quad (4.3)$$

avec  $r_x = \text{rang} \left[ \frac{\partial G(x, \bar{u})}{\partial x} \right]$ .

Soit une classe de systèmes thermofluides non linéaires décrits par l'équation (4.4), une étude de leur forme est particulièrement importante pour l'étude de la surveillabilité.

$$\begin{cases} \dot{x}_H = f(x_H, u_H) \\ \dot{x}_T = g(x_H, x_T, u_H, u_T) \\ y_H = h(x_H) \\ y_T = l(x_H, x_T) \end{cases} \quad (4.4)$$

où  $f, g, h$  et  $l$  sont des fonctions analytiques non linéaires (ce qui correspond physiquement à un processus en régime sous saturé, voir chapitre 3). Les équations d'état en régime saturé sont plus complexes, quelques unes sont données dans *Ould Bouamama (2003)*.

Considérons quatre catégories de composants (actionneurs hydrauliques, actionneurs thermiques, capteurs hydrauliques et capteurs thermiques), l'objectif principal de cette section est de développer l'isolabilité des éléments cités: quel est le composant défaillant?

Dans le cadre de l'étude de la surveillabilité en génie des procédés, plusieurs théorèmes et corollaires peuvent être énoncés à partir de la proposition 14. *Ces résultats sont importants pour un placement optimal (nombre minimal) de capteurs dans les processus industriels.*

**Hypothèse 5.** Tous les actionneurs hydrauliques sont détectables par les capteurs hydrauliques et thermiques. Tous les actionneurs thermiques sont détectables par les capteurs thermiques.

**Théorème 9.** *En régime sous saturé, il suffit d'installer 1 seul capteur hydraulique pour que l'ensemble des actionneurs hydrauliques devienne surveillable avec l'ensemble des actionneurs thermiques.*

**Preuve.**

Appliquons dans un premier temps la proposition 14 à l'équation (4.4). Dans notre cas, chaque sortie hydraulique  $y_{iH}$  (resp. thermique  $y_{jT}$ ) est dérivée jusqu'à un ordre  $s_{iH}$  (resp.  $s_{jT}$ ). Un système de  $(\sum_i (s_{iH} + 1) + \sum_j (s_{jT} + 1))$  équations est obtenu (équation 4.5).

$$\begin{cases} \bar{y}_H = G_H(x_H, \bar{u}_H) \\ \bar{y}_T = G_T(x, \bar{u}_H, \bar{u}_T) = G_T(x_H, x_T, \bar{u}_H, \bar{u}_T) \end{cases} \quad (4.5)$$

Les  $\sum_{i,j} (s_{iH} + s_{jT} + 2) - r_{xH} - r_{xT}$  relations de redondance analytiques obtenues sont sous la forme :

$$RRA: w(\bar{y}_H, \bar{y}_T, \bar{u}_T, \bar{u}_H) = 0 \quad (4.6)$$

avec  $r_{xH} = \text{rang} \left[ \frac{\partial G_H(x_H, \bar{u}_H)}{\partial x_H} \right]$ ,  $r_{xT} = \text{rang} \left[ \frac{\partial G_T(x, \bar{u}_H, \bar{u}_T)}{\partial x} \right]$ ,  $s_{iH}$  l'ordre de dérivation de la sortie hydraulique  $h_i$  et  $s_{jT}$  l'ordre de dérivation de la sortie thermique  $l_j$ .

Parmi ces RRAs, quelques relations ne dépendent que de l'énergie hydraulique. Ce sont les RRAs associées aux capteurs hydrauliques. Au niveau hydraulique, on distingue les capteurs de pression (ou de niveau) et les capteurs de flux hydrauliques. Les équations d'état non linéaires en régime monophasique et les équations de mesure non linéaires sont écrites comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_H = f(x_H, u_H) \\ y_H = h(x_H) \end{cases} \quad (4.7)$$

Ce sous système hydraulique est un système indépendant. Les  $\sum_i (s_{iH} + 1) - r_{xH}$  relations de redondance analytiques obtenues sont sous la forme :

$$RRA_H: w_H(\bar{y}_H, \bar{u}_H) = 0 \quad (4.8)$$

Les  $\sum_i (s_{iT} + 1) - r_{xT}$  relations de redondance analytiques restantes sont les relations de redondance thermiques associées aux capteurs thermiques qu'on note :

$$RRA_T: w_T(\bar{y}_H, \bar{y}_T, \bar{u}_T, \bar{u}_H) = 0 \quad (4.9)$$

La matrice de signatures des fautes est donnée par le tableau 4.1. **RRA<sub>H</sub>** et **RRA<sub>T</sub>** forment l'ensemble des résidus déduits respectivement du modèle hydraulique et thermique. Un terme "1" ("0") dans la ligne  $i$  et la colonne  $j$  signifie que la RRA  $i$  est sensible (non sensible) à la faute  $j$ . Une "\*" signifie qu'on a au moins un terme non nul "1" dans chaque colonne, ce qui est vérifié par le fait qu'on suppose que tous les actionneurs sont détectables.

<b>RRAs</b>	$\bar{u}_H$	$\bar{u}_T$	$\bar{y}_H$	$\bar{y}_T$
<b>RRA<sub>H</sub></b>	*	0	*	0
<b>RRA<sub>T</sub></b>	*	*	*	*

**Tableau 4.1.** Matrice des Signatures des fautes.

Les vecteurs de signature booléens de la source hydraulique  $u_H$  et  $u_T$  sont différents et non nuls. En conséquence, les fautes pouvant les affecter sont détectables et isolables.

L'utilisation du modèle BG thermofluide pour la génération des RRAs conduit au même résultat. En effet, la génération des RRAs sur le bond graph est basée sur le parcours de chemins causaux. Partant d'une jonction à laquelle se rattache un capteur hydraulique conduit à une RRA qui ne fait apparaître que les actionneurs hydrauliques (puisque l'énergie hydraulique est indépendante de l'énergie thermique). Par contre, générer une RRA à partir d'une jonction thermique à laquelle se rattache un capteur, c'est exprimer les variables inconnues en fonction des variables connues hydrauliques et thermiques (l'énergie thermique dépend de l'énergie hydraulique). Pour les modèles linéarisés, il suffit de constater qu'il y a au moins un chemin causal liant une source hydraulique ( $u_H$ ) à un capteur thermique ou hydraulique (état thermique et hydraulique). Par contre, un actionneur thermique peut juste être lié par un chemin causal à un capteur thermique (ou à un état thermique). Basé sur les propriétés structurelles et causales exploitées dans *Ould Bouamama et al. (2000)*, il est facile de vérifier les vecteurs de signature booléenne pour les sources hydrauliques  $u_H$  et thermiques  $u_T$  donnés au tableau 4.1. □

**Corollaire 2.** *En régime sous saturé, l'ensemble des capteurs hydrauliques  $y_H$  est surveillable avec l'ensemble des capteurs thermiques  $y_T$ .*

La preuve mathématique est évidente: en se basant sur la matrice de signatures de fautes donnée par le tableau 4.1, on constate que le vecteur de signature booléen d'un détecteur thermique diffère de celui d'un détecteur hydraulique. En conséquence, les fautes pouvant les affecter sont isolables. La détectabilité n'a pas été considérée vu que tous les détecteurs respectent cette propriété.

Au sens d'un modèle BG, ceci s'explique par le fait qu'il ne peut pas y avoir une boucle causale entre un détecteur hydraulique et un autre thermique pour la simple raison que seule l'énergie hydraulique peut influencer sur l'énergie thermique. □

**Corollaire 3.** *En disposant d'un capteur thermique, l'ensemble des actionneurs thermiques  $u_T$  et l'ensemble des capteurs hydrauliques  $y_H$  deviennent surveillables.*

La preuve est évidente et découle du tableau 4.1. La présence d'un capteur thermique est obligatoire pour assurer la détectabilité des actionneurs thermiques. □

**Corollaire 4.** *En installant au moins un capteur hydraulique, l'ensemble des actionneurs hydrauliques  $u_H$  et l'ensemble des capteurs thermiques  $y_T$  deviennent surveillables.*

La preuve est évidente (voir le tableau 4.1). □

**Corollaire 5.** *L'ensemble des actionneurs hydrauliques  $u_H$  est surveillable avec l'ensemble des actionneurs thermiques  $u_T$  si on dispose d'au moins un capteur hydraulique et un capteur thermique.*

Pareillement, la preuve découle du tableau 4.1 et le détecteur thermique a été ajouté pour assurer la détectabilité des actionneurs thermiques. □

Pour les actionneurs, les composants physiques et les capteurs, leur surveillabilité dépend du processus considéré. Considérons plus particulièrement la surveillabilité des capteurs thermiques, un résultat important peut être énoncé :

**Théorème 10.** *Considérons les capteurs thermiques dans un système thermofluide bien calorifugé en régime sous saturé, toutes les fautes pouvant les affecter sont surveillables.*

**Preuve.**

Considérons un réservoir  $i$  dans un circuit thermofluide, le stockage d'énergie thermique dans le réservoir est donné par l'équation (4.10).

$$\dot{H}_{iC} = \dot{H}_i - \dot{H}_{i+1} + \sum Sf_{iT} \quad (4.10)$$

$\sum Sf_{iT}$  est la somme des sources de flux thermique par conduction ou provenant des flux par convection de type 1.

Le flux d'énergie thermique est donné par l'équation (4.11).

$$\dot{H}_i = \dot{m}_i \cdot \frac{x_{i-1T}}{x_{i-1H}} \quad (4.11)$$

L'équation (4.12) représente le flux d'énergie stockée dans un accumulateur  $i$ .

$$\dot{H}_{iC} = \dot{m}_{iC} \cdot \frac{x_{iT}}{x_{iH}} \quad (4.12)$$

On suppose que les capteurs sont numérotés comme les réservoirs sur lesquels ils sont installés (c.à.d. même si on ne dispose pas d'un capteur sur le réservoir 2, le détecteur au niveau du réservoir 3 est  $De_3$ ). Un détecteur thermique s'exprime en fonction des variables d'état selon l'équation (4.13).

$$De_{iT} = \frac{x_{iT}}{x_{iH} \cdot C_p} \Rightarrow x_{iT} = x_{iH} \cdot C_p \cdot De_{iT} \quad (4.13)$$

Pour un réservoir non chauffé et sans détecteur son état thermique est donné par l'équation (4.14).

$$x_{iT} = x_{iH} \cdot C_p \cdot \hat{De}_{iT} \quad (4.14)$$

avec  $\hat{De}_{iT}$  une estimation de  $T_{iC}$  telle que

$$\hat{De}_{iT} = De_{jT} \quad (4.15)$$

avec  $j < i$ ,  $j$  étant le premier réservoir possédant un détecteur en aval du réservoir  $i$  par rapport au circuit thermofluide.

Pour obtenir les RRAs thermiques, on considère les réservoirs dotés des capteurs. L'équation (4.10) nous permet d'écrire:

$$\dot{m}_{iC} \cdot C_v \cdot De_{iT} = \dot{m}_i \cdot C_p \cdot De_{jT} - \dot{m}_{i+1} \cdot C_p \cdot De_{iT} + \sum Sf_{iT} \quad \text{avec } j < i \quad (4.16)$$

avec  $j = i - 1$ ) si le réservoir en amont possède un capteur. En écrivant ces équations de  $i = (1 \dots n)$  avec  $De_{0T} = 0$ , on obtient la matrice de signatures des fautes donnée par le tableau 4.2.

		Capteurs thermiques								Capteurs hydrauliques	Sources	Composants	
		$De_{1T}$			$De_{(i-1)T}$	$De_{iT}$	$De_{iT}$	$De_{(i+1)T}$					
Signatures des fautes	<b>1</b>	<b>0</b>	..	..	..	..	..	..	..	<b>0</b>	*	*	*
	<b>1</b>	<b>1</b>	∴							∴	*	*	*
	<b>0</b>	<b>1</b>	∴	∴						∴	*	*	*
	∴	∴	∴	∴	∴					∴	*	*	*
	∴		∴	<b>1</b>	<b>1</b>	∴				∴	*	*	*
	∴			∴	<b>1</b>	<b>1</b>	∴			∴	*	*	*
	∴				∴	<b>1</b>	<b>1</b>	∴		∴	*	*	*
	∴					∴	<b>1</b>	∴	∴	∴	*	*	*
	∴							∴	∴	<b>0</b>	*	*	*
	<b>0</b>	..	..	..	..	..	..	..	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	*	*

**Tableau 4.2.** Matrice de Signatures des fautes sur les capteurs thermiques.

Comme on ne s'intéresse qu'à la surveillabilité des capteurs thermiques, les signatures des capteurs hydrauliques, sources et composants sont remplacées par « \* ». La matrice obtenue est triangulaire inférieure ce qui montre que tous les capteurs thermiques sont isolables.

La génération des RRAs basée sur le parcours de chemins causaux sur le bond graph conduit au même résultat. Par une approche bond graph, le résultat est justifié par la présence des liens d'information spéciaux empêchant un réservoir d'imposer sa température sur un autre réservoir se trouvant en amont par rapport au circuit thermofluide. De ce fait, partant d'une jonction à laquelle se rattache un capteur thermique  $De_i$  conduit à une RRA qui fait apparaître les capteurs hydrauliques, les sources, les composants mais seulement les capteurs thermiques  $De_j$  (avec  $j < i$  puisque l'énergie thermique stockée dans un accumulateur  $i$  ne dépend que de l'énergie thermique acquise en amont de l'accumulateur). La matrice de signatures des fautes obtenue est triangulaire inférieure et par conséquent les capteurs thermiques sont isolables. □

Les actionneurs thermiques peuvent se présenter sous forme des sources de flux thermique par conduction (réchauffeur) ou par convection (actionneur thermique au niveau d'une source thermofluide). En génie des procédés, des résultats intéressants concernant la surveillabilité des actionneurs thermiques peuvent être énoncés :

**Théorème 11.** *Un détecteur thermique placé au niveau d'un réservoir  $i$  permet d'isoler l'ensemble des défaillances affectant les sources thermiques en amont du réservoir de l'ensemble des fautes affectant les sources thermiques en aval du réservoir (amont et aval par rapport à la position du capteur thermique et la direction du flux thermofluide).*

La preuve est évidente et découle de l'équation (4.16). □

**Exemple 4.2.1.** Soit un réseau de composants interconnectés dans un système thermofluide sous forme d'une cascade de multiports **C** et **R**. On suppose que tous les accumulateurs sont équipés de capteurs thermiques. Cet exemple a pour but d'appliquer les théorèmes 10 et 11. Le



avec

$$T_i = \frac{\dot{H}_i}{\dot{m}_i \cdot C_p} \quad (4.18)$$

$$\dot{H}_{iC} = \dot{m}_{iC} \cdot C_p \cdot T_{iC} \quad (4.19)$$

En utilisant (4.17), (4.18) et (4.19), la génération des RRAs donne :

$$\begin{bmatrix} De_1 \\ De_2 \\ \vdots \\ De_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-1}{\dot{m}_1 C_p} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{-1}{\dot{m}_2 C_p} & \frac{-1}{\dot{m}_2 C_p} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \frac{-1}{\dot{m}_n C_p} & \frac{-1}{\dot{m}_n C_p} & \dots & \frac{-1}{\dot{m}_n C_p} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{m}_{C1} C_p De_1 \\ \dot{m}_{C2} C_p De_2 \\ \vdots \\ \dot{m}_{Cn} C_p De_n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\dot{m}_1 C_p} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{1}{\dot{m}_2 C_p} & \frac{1}{\dot{m}_2 C_p} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\dot{m}_n C_p} & \frac{1}{\dot{m}_n C_p} & \frac{1}{\dot{m}_n C_p} & \frac{1}{\dot{m}_n C_p} & \frac{1}{\dot{m}_n C_p} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} Sf_1 \\ Sf_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ Sf_m \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Nous pouvons ainsi déduire que tous les détecteurs thermiques sont isolables ce qui vérifie le théorème 10.

Le théorème 11 est aussi vérifié : un détecteur thermique isole l'ensemble des actionneurs thermiques en amont de l'ensemble des actionneurs thermiques en aval du réservoir où il est installé (ceci est le résultat de la forme particulière de la matrice des signatures des actionneurs au niveau thermique).

Cependant seulement certaines sources thermiques sont isolables et la surveillabilité des sources hydrauliques n'est pas considérée. C'est dans ce cadre que la section suivante introduit la platitude pour le système de diagnostic et plus précisément pour la surveillabilité des sources.

### 4.3. La platitude pour la surveillance des actionneurs en génie des procédés

Les actionneurs représentent les éléments principaux des boucles de régulation. Leur surveillance est alors importante car leur défaillance peut entraîner des catastrophes graves dans les procédés à risque (une vanne de gaz combustible dans un four restant ouverte peut provoquer une explosion). L'utilisation du BG pour la conception et l'amélioration de l'architecture d'instrumentation en vue de surveiller un système a déjà fourni des résultats intéressants dans le domaine linéaire. Cependant, peu de travaux dans la littérature traitent la surveillabilité des actionneurs dans le cas non linéaire *Ould Bouamama et al. (2001)*, *Ould Bouamama et al. (2002b)*. La détection et l'isolation d'un défaut actionneur sont en général basées sur la matrice de signature des fautes déduite par un calcul complexe de RRAs. Avec la méthodologie BG, les outils développés pour les systèmes linéaires ne sont plus valides en non linéaire. Pour traiter de tels modèles, la notion de platitude est introduite; elle apporte une contribution à l'étude des systèmes dans le domaine de la surveillance.

Les systèmes différentiels plats possèdent plusieurs propriétés utiles qui peuvent être exploitées pour établir une architecture de surveillance efficace pour les systèmes non linéaires. Une analyse de la diagnosabilité en utilisant la théorie de la platitude et sans génération des RRAs

est présentée. Basé sur une approche (BG) quantitative, la procédure de FDI développée concerne la surveillabilité des actionneurs (sources de commande) dans les systèmes non linéaires. Il est montré comment une conception convenable d'architecture d'instrumentation, c.à.d., un bon placement de capteurs, assure d'une manière générique la diagnosabilité des actionneurs. Dans un second temps, on montrera qu'il suffirait pour une classe des systèmes thermofluides que le sous modèle hydraulique soit plat pour assurer la platitude du processus thermofluide.

#### 4.3.1. La platitude et la surveillance

Basée sur la théorie de la platitude présentée par *Fliess et al. (1992 et 1995)*, cette section traite la surveillance des actionneurs pour les systèmes plats. Il est montré qu'un placement de capteurs au niveau des sorties plates fournit une meilleure visualisation de l'effet des défauts actionneurs et par conséquent leur diagnosabilité peut être facilement analysée. En outre, la technique proposée permet la détection et l'isolement de défauts simultanés. Le bond graph comme un outil multidisciplinaire de modélisation est utilisé pour la détermination des sorties plates et l'analyse de la surveillabilité des actionneurs.

Rappelons quelques définitions de base:

**Définition 13.** *Le système  $\dot{x} = f(x,u)$ ,  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ , est **plat** s'il existe  $m$  fonctions de l'état (sorties plates), des entrées et de leurs dérivées jusqu'à un ordre  $r \leq n$  telles que l'état et les entrées peuvent être exprimées en fonctions de ces sorties plates.*

C'est à dire s'il existe trois applications :

$$h : R^n \times \underbrace{R^m \times \dots \times R^m}_{r+1} \mapsto R^m, \quad \chi : \underbrace{R^m \times \dots \times R^m}_r \mapsto R^n \quad \text{et} \quad \vartheta : \underbrace{R^m \times \dots \times R^m}_{r+1} \mapsto R^m$$

telles que

$$y = h(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(r)}) \quad x = \chi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}) \quad u = \vartheta(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, y^{(r)})$$

Une propriété principale des modèles plats est que la sortie, le vecteur d'état (première condition de la platitude) et les variables d'entrée (deuxième condition de la platitude) peuvent être paramétrées en termes de sorties plates et un certain nombre de leurs dérivées, sans avoir à intégrer une équation différentielle. Cette propriété intéressante a conduit à de nombreuses applications de commande et encourage à exploiter cette propriété pour l'analyse de la surveillabilité et la synthèse des lois de commande dans les modèles BGs non linéaires.

Considérons la surveillabilité des actionneurs dans les systèmes non linéaires. Le théorème suivant est basé sur la définition d'un système plat; il est montré que la platitude assure d'une manière générique la diagnosabilité des actionneurs si les sorties plates sont mesurées. En outre, même les défauts simultanés sont concernés par cette procédure de FDI. Cependant, l'approche proposée exige autant de capteurs que d'actionneurs.

**Théorème 12.** *El Osta et al. (2005 c) Les  $m$  actionneurs d'un système plat sont surveillables si on dispose de  $m$  capteurs installés aux sorties plates. De plus, cette architecture de diagnosabilité concerne les défauts multiples ou simultanés.*

**Preuve.**

- $m = 1$

S'il n'y a qu'un seul actionneur, alors la relation  $u = \chi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, y^{(r)})$  relie la source (l'actionneur) à la sortie plate et ses  $r$  dérivées. Cette relation constitue une base de RRA ; alors toute autre relation de redondance est proportionnelle à cette relation faisant donc intervenir les mêmes variables (source et capteur). Comme on ne considère que la surveillabilité des actionneurs, une valeur non nulle du résidu impliquerait une faute au niveau de l'actionneur.

- $m > 1$

S'il y a au moins deux sorties plates, la relation  $u = \chi(y, \dot{y}, \dots, y^{(r-1)}, y^{(r)})$  constitue une base de relations de redondance analytique permettant la localisation des défaillances affectant les actionneurs car la signature de chaque actionneur est différente des signatures des autres variables (voir tableau 4.2). Le tableau 4.3 montre la matrice correspondante de signatures des fautes. "1" ("0") dans la  $i^{\text{ème}}$  ligne et la  $j^{\text{ème}}$  colonne signifie que la  $i^{\text{ème}}$  relation de redondance (RRA<sub>*i*</sub>) est sensible (non sensible) au  $j^{\text{ème}}$  défaut.  $u_j$  et  $\underline{y}_j$  ( $j=1..m$ ) désignent respectivement le  $j^{\text{ème}}$  actionneur du vecteur de commande  $u$  et la  $j^{\text{ème}}$  sortie ainsi que ses dérivées à un ordre  $r_j \leq n$ . Les vecteurs Booléens des signatures des fautes des sources de commande sont tous différents et non nuls, et par conséquent les fautes pouvant les affecter sont surveillables.

ARRs	$u_1$	$u_2$		$u_m$	$\underline{y}_1$	$\underline{y}_2$		$\underline{y}_m$
ARR <sub>1</sub>	1	0	...	0	1	1		1
ARR <sub>2</sub>	0	1	⋮	⋮	1	1		1
	⋮	⋮	⋮	0	1	1		1
ARR <sub>m</sub>	0	...	0	1	1	1		1

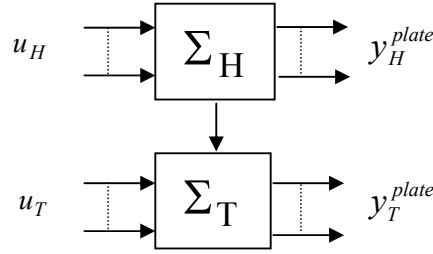
**Tableau 4.3.** Matrice des Signatures des fautes.

Comme déjà indiqué, la forme diagonale de la matrice des signatures des fautes au niveau des sources permet l'isolation des défauts sources multiples. □

### 4.3.2. La platitude et la surveillance

Cette section traite une classe particulière de systèmes thermofluides (familière en génie des procédés), il est montré qu'il suffit que *le sous modèle hydraulique soit plat pour assurer la platitude du processus thermofluide*. Comme la platitude d'un modèle linéaire signifie sa commandabilité (une équivalence entre ces deux notions est prouvée pour les modèles linéaires *Lévine & Nguyen (2003)*), on valide le résultat déjà obtenu sur la commandabilité des processus thermofluides linéarisés au chapitre 3: la commandabilité du sous système hydraulique implique celle du processus thermofluide.

Soient  $u_H$ ,  $u_T$ ,  $y_H^{plate}$  et  $y_T^{plate}$  respectivement le vecteur des entrées hydrauliques, des entrées thermiques, des sorties plates hydrauliques et des sorties plates thermiques. Considérons le cas sous saturé, où seulement le sous modèle hydraulique  $\Sigma_H$  peut influencer sur le sous modèle thermique  $\Sigma_T$  (figure 4.2), un résultat peut être énoncé:

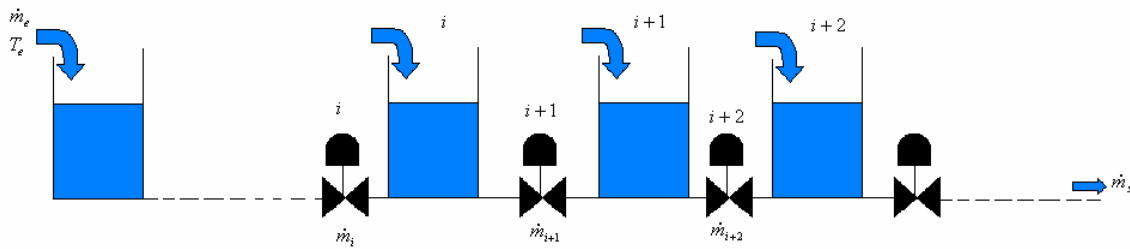


**Figure 4.2.** Echange de puissance couplée (hydraulique-thermique).

**Théorème 13.** (en régime sous saturé) *Tout système thermofluide complètement actionné par des sources de flux par convection de type 1 est plat s'il ne contient pas de source de flux par convection de type 2 (pompes branchées) ou de source thermique par conduction.*

**Preuve.**

Le schéma d'un système thermofluide ne contenant que des flux de convection de type 0 ou 1 est donné par la figure 4.3.



**Figure 4.3.** Système thermofluide complètement actionné par des sources de flux par convection de type 1.

La preuve découle de la forme particulière des équations d'état dans ce régime (annexe B):

$$\begin{cases} \dot{x}_H = f(x_H) + Bu_H \\ \dot{x}_T = g(x_H, u_H, x_T) + B'u_T \end{cases}$$

avec  $B_{ij}$  et  $B'_{ij} \in \{-1, 0, +1\}$ .

On considère que le système est complètement actionné, c'est à dire on a au moins un actionneur au niveau hydraulique et au niveau thermique de chaque accumulateur donc au moins un flux par convection de type 1 sur chaque accumulateur (aucune ligne de  $B$  et de  $B'$  ne peut être complètement nulle).

Cependant on pose comme hypothèse qu'on ne dispose pas d'actionneur redondant, c'est à dire un seul actionneur au niveau thermique et au niveau hydraulique. Dans le cas contraire un actionneur équivalent peut être défini. Dans ce cas, on peut écrire :

$$B = B' = I$$

Ce qui implique :

$$u_H = \dot{x}_H - f(x_H) \quad (4.21)$$

$$u_T = \dot{x}_T - g(x_H, u_H, x_T) \quad (4.22)$$

Pour  $n$  accumulateurs, on a  $2n$  actionneurs donc  $2n$  sorties plates sont à poser. La solution la plus évidente est de considérer les variables d'état comme des sorties plates :

$$y_H^{plate} = x_H \quad (4.23)$$

$$y_T^{plate} = x_T \quad (4.24)$$

En injectant (4.23) dans (4.21) on obtient :

$$u_H = h_1(y_H^{plate}, \dot{y}_H^{plate}) \quad (4.25)$$

Maintenant injectons (4.23) (4.24) et (4.25) dans (4.22) :

$$u_T = h_2(y_H^{plate}, \dot{y}_H^{plate}, y_T^{plate}, \dot{y}_T^{plate}) \quad (4.26)$$

avec  $h_1$  et  $h_2$  deux fonctions non linéaires.  $\square$

**Remarque 4.3.1.** *Dans le cas où on dispose de plusieurs actionneurs assurant la même fonction, ce sont les actionneurs équivalents qui remplissent les conditions de platitude et par conséquent sont surveillables. En d'autre terme, on remplace l'ensemble des actionneurs remplissant une fonction par un actionneur équivalent et la platitude est ensuite étudiée pour le système avec les actionneurs équivalents. Le théorème ci dessus reste donc valable. On peut se permettre d'avoir des sources de flux par conduction. Dans ce cas, la source équivalente  $Sf_{iT}^{eq} = \sum Sf_{iT}$  représentera la somme des sources de flux thermiques par conduction ou provenant des flux par convection de type 1 et la source équivalente  $Sf_{iH}^{eq} = \sum Sf_{iH}$ , la somme des éventuelles sources de flux hydraulique provenant des flux par convection de type 1 sur le composant  $i$ .*

En réalité, les systèmes thermofluides complètement actionnés sont rares. Ce genre d'hypothèses n'est pas réaliste. Dans la suite, un théorème plus général est proposé :

**Théorème 14.** (En régime sous saturé) *Un système thermofluide bien calorifugé d'ordre  $2n$  est plat si et seulement si le sous modèle hydraulique d'ordre  $n$  est plat. ( $n$  est le nombre d'éléments de stockage potentiels, de réservoirs par exemple). Dans ce cas, les sorties plates thermiques sont associées aux capteurs placés aux réservoirs chauffés) El Osta et al. (2005c), El Osta et al. (2005e).*

**Preuve.**

#### Condition Suffisante

Un processus thermofluide peut être considéré comme une interconnexion de composants. Considérons un système thermofluide bien calorifugé d'ordre  $2n$ , le vecteur d'état  $x = (x_H^t, x_T^t)'$  est associé aux composants de stockage (les  $n$  accumulateurs existants), où  $x_H$  et  $x_T$  sont

respectivement le vecteur des variables de masses et d'enthalpies stockées dans les  $n$  accumulateurs.

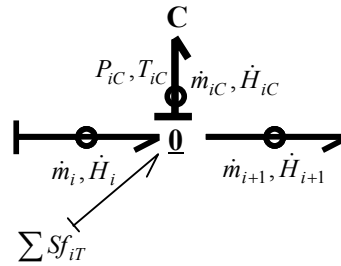
Si le sous modèle hydraulique est plat, il existe un vecteur de sorties plates au niveau hydraulique ( $y_H : y_H^{plate}$ ) vérifiant l'équation (4.27) avec  $r \leq n$ .

$$\begin{aligned} x_H &= \mathcal{X}_H(y_H, \dot{y}_H, \dots, y_H^{(r-1)}) \\ u_H &= \mathcal{G}_H(y_H, \dot{y}_H, \dots, y_H^{(r-1)}, y_H^{(r)}) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Dans les BGs thermodynamiques, les variables d'état hydrauliques et thermiques au niveau d'un accumulateur  $i$  sont liées par l'équation (4.28).

$$x_{iT} = x_{iH} C_P T_{iC} \quad (4.28)$$

où  $x_{iT}$ ,  $x_{iH}$  et  $T_{iC}$  sont respectivement la variable d'enthalpie stockée ( $H_{iC}$ ), la variable de masse stockée ( $m_{iC}$ ) et la température de l'accumulateur  $i$ . En se basant sur l'expression (4.28) et la définition (13), on conclut que la première condition de la platitude au niveau thermique est équivalente à exprimer  $T_{iC}$  en fonction des sorties plates pour  $i(1..n)$ . Ceci est possible si on dispose d'un capteur thermique (une sortie plate thermique) au niveau de chaque accumulateur muni d'une source de flux thermique par conduction ou d'un flux par convection de type 1.



**Figure 4.4.** Modèle BG à multi-liens d'un accumulateur (en causalité intégrale).

Rappelons le modèle BG d'un accumulateur  $i$  (figure 4.4), on peut écrire :

$$\dot{x}_{iT} = \dot{H}_{iC} = \dot{H}_i - \dot{H}_{i+1} + \sum Sf_{iT} \quad (4.29)$$

avec

- $\dot{H}_i$  le flux d'enthalpie (source de flux par convection de type 0) entrant à l'accumulateur  $i$  :  $\dot{H}_i = \dot{m}_i C_P T_{i-1C}$ ,
- $\sum Sf_{iT}$  la somme des variables des sources de flux thermique par conduction ou provenant des flux par convection de type 1 sur le composant  $i$ ,
- $\dot{H}_{iC} = \dot{m}_{iC} C_P T_{iC} = (\dot{m}_i - \dot{m}_{i+1}) C_P T_{iC}$  représente l'énergie thermique stockée dans l'accumulateur.

Ceci implique :



### 4.3.3. Application à un système thermofluide

Considérons l'exemple illustré par le système de trois réservoirs représenté sur le schéma 4.5, le modèle BG correspondant est donné sur le schéma 2.43 (b). Le réservoir  $C_1$ , alimenté par le débit massique  $\dot{m}_1$ , contient de l'eau chauffée par une résistance délivrant une puissance thermique  $\dot{Q}$ . Le réservoir  $C_2$  est alimenté par le débit massique  $\dot{m}_2$ . Les vannes  $R_1$  et  $R_2$  sont des vannes «tout ou rien».

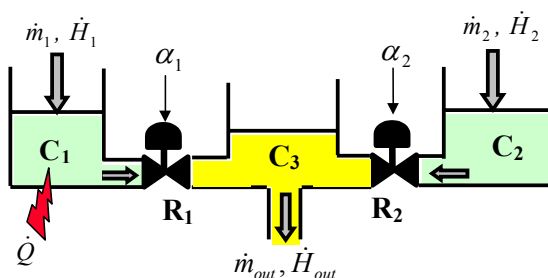


Figure 4.5. Schéma du système.

Quatre cas se manifestent selon que le flux thermique par convection  $\dot{H}_1(\dot{m}_1 C_p T_1, T_1$  est la température du fluide d'admission du réservoir 1) et  $\dot{H}_2(\dot{m}_2 C_p T_2)$  sont considérés comme des variables dépendantes ou indépendantes ( $T_1$  et  $T_2$  sont des paramètres ou des actionneurs réels (sources de commande)). Comme illustration de la méthodologie développée, seulement deux cas sont considérés :

#### Cas 1 ( $T_1$ et $T_2$ sont des paramètres)

- Alors que les vrais actionneurs dans ce cas sont les débits massiques d'admission  $Sf_1 : \dot{m}_1, Sf_3 : \dot{m}_2$  et le flux thermique par conduction  $Sf_5 : \dot{Q}$ , on peut vérifier que les sorties plates sont :

$$y_1 = x_{1H} = m_{1C}, y_2 = x_{3H} = m_{3C} \text{ et } y_3 = x_{1T} = H_{1C}.$$

En effet, les sorties plates hydrauliques sont directement déterminées à partir du modèle bond graph en utilisant les techniques développées dans *Achir et al. (2003)*. Au niveau thermique la sortie plate est au niveau de l'accumulateur actionné thermiquement (comme le montre le théorème précédent). Les capteurs correspondants  $De_1, De_2$  et  $De_3$  dans ce cas, les détecteurs d'effort  $De_1, De_2$  et  $De_3$  permettent la mesure de la pression (liée à la masse stockée dans le réservoir  $C_1$  et  $C_3$ ) et de la température (liée à l'enthalpie spécifique  $h$  stockée dans le réservoir  $C_1$ ). Selon le théorème 12, cette architecture d'instrumentation permet la surveillabilité des actionneurs.

#### Cas 2 ( $T_1$ et $T_2$ sont des sources de commande)

- Tous les actionneurs sont considérés (même les flux thermiques par convection  $\dot{H}_1$  et  $\dot{H}_2$ ), les sorties plates sont dans ce cas :

$$y_1 = x_{1H} = m_{1C}, y_2 = x_{3H} = m_{3C}, y_3 = x_{1T} = H_{1C} \text{ et } y_4 = x_{2T} = H_{2C}$$

Les sorties plates hydrauliques restent les mêmes. Les actionneurs  $\dot{H}_1$  et  $\dot{Q}$  sont redondants, l'actionneur équivalent est ainsi considéré dans l'étude de la surveillabilité (remarque 4.3.1). Les sorties plates thermiques ont été choisies au niveau des accumulateurs chauffés ( $C_1$  et  $C_2$ ). Un capteur thermique  $De_4$  doit être donc impérativement ajouté au niveau de  $C_2$ . Comme indiqué au théorème 12, la surveillabilité des actionneurs équivalents est assurée car on dispose de capteurs sur les sorties plates et par conséquent hormis  $\{\dot{H}_1, \dot{Q}\}$  tous les actionneurs sont surveillables. Par contre, l'actionneur équivalent de  $\{\dot{H}_1, \dot{Q}\}$  est surveillable.

Tous les capteurs sont supposés être idéaux et sont modélisés par des liens d'information indiquant qu'aucune puissance n'est transférée. □

#### Vérification par Génération des RRAs

Au niveau hydraulique les équations d'état sont écrites à partir du modèle BG (figure 2.45):

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1H} &= \dot{m}_1 - K_1 \sqrt{\frac{g x_{1H}}{A_1} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} \\ \dot{x}_{2H} &= \dot{m}_2 - K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} \\ \dot{x}_{3H} &= K_1 \sqrt{\frac{g x_{1H}}{A_1} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} + K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} - \dot{m}_{out}\end{aligned}\quad (4.33)$$

$K_1$  et  $K_2$  sont les constantes des vannes,  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$  sont les sections des réservoirs (considérées uniformes) et  $g$  est l'accélération de la gravité. Les sorties plates hydrauliques sont  $y_1 = x_{1H}$  et  $y_2 = x_{3H}$ .

$$\text{Soit } \varphi_{1/2}(y_i - y_j) = \sqrt{\frac{g \cdot y_i}{A_i} - \frac{g \cdot y_j}{A_j}}$$

A partir des équations (4.33):

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= \dot{y}_1 + K_1 \varphi_{1/2}(y_1 - y_2) \\ K_2 \varphi_{1/2}(x_{2H} - y_2) &= \dot{y}_2 - K_1 \varphi_{1/2}(y_1 - y_2) + \dot{m}_{out}\end{aligned}\quad (4.34)$$

On trouve:

$$x_{2H} = y_2 + \left( \frac{1}{K_2} (\dot{y}_2 - K_1 \varphi_{1/2}(y_1 - y_2) + \dot{m}_{out}) \right)^2 = F(y_1, y_2, \dot{y}_2)$$

Ceci implique:

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 &= \left( \frac{\partial F}{\partial y_1} \dot{y}_1 + \frac{\partial F}{\partial y_2} \dot{y}_2 + \frac{\partial F}{\partial \dot{y}_2} \ddot{y}_2 \right) + K_2 \varphi_{1/2}(F(y_1, y_2, \dot{y}_2) - y_2) \\ &= G(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2)\end{aligned}\quad (4.35)$$

La platitude est vérifiée donc au niveau hydraulique. Selon le théorème 14, si le sous modèle hydraulique est plat le système global l'est. En effet, Les équations d'état au niveau thermique sont:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1T} = \dot{H}_1 + \dot{Q} - K_1 \sqrt{\frac{g x_{1H}}{A_1} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} C_p \frac{x_{1T}}{x_{1H}} \\ \dot{x}_{2T} = \dot{H}_2 - K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} C_p \frac{x_{2T}}{x_{2H}} \\ \dot{x}_{3T} = K_1 \sqrt{\frac{g x_{1H}}{A_1} - \frac{g x_{2H}}{A_3}} C_p \frac{x_{1T}}{x_{1H}} + K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - \frac{g x_{3H}}{A_3}} C_p \frac{x_{2T}}{x_{2H}} - \dot{H}_{out} \end{cases}\quad (4.36)$$

### Cas 1

A partir des équations (4.36):

$$\dot{Q} = y_3 + K_1 \varphi_{1/2}(y_1 - y_2) C_p \frac{y_3}{y_1} - \dot{H}_1 \quad (4.37)$$

En utilisant l'équation (4.28), le vecteur d'état thermique peut être obtenu en calculant la température dans chaque réservoir :

$$T_{1C} = y_3 \Rightarrow x_{1T} = y_1 C_p y_3$$

Comme le deuxième réservoir n'est pas chauffé on peut écrire :

$$\dot{H}_2 = \dot{m}_2 C_p T_2$$

$$\begin{aligned} \text{avec } T_2 = T_{2C} = \frac{x_{2T}}{x_{2H} \cdot C_p} &\Rightarrow x_{2T} = x_{2H} \cdot \frac{\dot{H}_2}{\dot{m}_2} \\ &\Rightarrow x_{2T} = \frac{F(y_1, y_2, \dot{y}_2)}{G(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2)} \cdot \dot{H}_2 \end{aligned}$$

$T_{3C}$  peut être déterminée en écrivant l'équation d'énergie thermique au niveau du réservoir  $C_3$ :

$$((\dot{m}_1 - \dot{y}_1) + (\dot{m}_2 - \dot{F}) - \dot{m}_{out}) C_p T_{3C} = (\dot{m}_1 - \dot{y}_1) C_p T_{1C} + (\dot{m}_2 - \dot{F}) C_p T_{2C} - \dot{m}_{out} C_p T_{3C}$$

Ceci implique:

$$T_{3C} = H(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2, y_3)$$

$$\Rightarrow x_{3T} = y_2 C_p H(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, \ddot{y}_2, y_3)$$

Les RRAs données par les équations (4.34), (4.35) et (4.37) montrent que les vecteurs booléens des signatures des actionneurs sont différents. En conséquence, tous les actionneurs considérés  $Sf_1 : \dot{m}_1$ ,  $Sf_3 : \dot{m}_2$  et  $Sf_5 : \dot{Q}$  sont surveillables.

## Cas 2

A partir de l'équation (4.37):

$$\dot{H}_1 + \dot{Q} = y_3 + K_1 \phi_{1/2} (y_1 - y_2) C_p \frac{y_3}{y_1} \quad (4.38)$$

$$\dot{H}_2 = \dot{y}_4 - A(y_1, y_2, \dot{y}_2) y_4 \quad (4.39)$$

Les RRAs sont maintenant données par les équations (4.34), (4.35), (4.38) et (4.39). La matrice des signatures des fautes est donnée dans le tableau 4.4.

ARRs	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\dot{H}_1$	$\dot{H}_2$	$\dot{Q}$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
ARR <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	1	1	0	0
ARR <sub>2</sub>	0	1	0	0	0	1	1	0	0
ARR <sub>3</sub>	0	0	1	0	1	1	1	1	0
ARR <sub>4</sub>	0	0	0	1	0	1	1	0	1

Tableau 4.4. Matrice des Signatures des fautes.

Parmi les actionneurs considérés  $\{Sf_1 : \dot{m}_1, Sf_3 : \dot{m}_2, Sf_2 : \dot{H}_1, Sf_4 : \dot{H}_2, Sf_5 : \dot{Q}\}$ ,  $\dot{H}_1$  et  $\dot{Q}$  ne sont pas surveillables. Ceci est expliqué par le fait que  $\dot{H}_1$  et  $\dot{Q}$  sont “redondants” (ils assurent la même fonction, ils représentent physiquement un seul actionneur). □

La platitude a été introduite pour la surveillance des actionneurs du système à 3 réservoirs. L'intérêt est d'assurer la surveillabilité des actionneurs tout en évitant la génération des RRAs. Dans cet exemple les RRAs ont été générées juste dans le but de vérifier les résultats obtenus : l'approche proposée ne les exige pas. Cette approche considère la surveillabilité des défaillances multiples certes mais utilise autant de capteurs que d'actionneurs. En perspective d'autres approches doivent considérer les défaillances simples et par conséquent utiliser moins de capteurs. Toutefois, il est à noter que le système de surveillance doit respecter un cahier des charges bien défini où un critère coût- sûreté est optimisé.

## 4.4. Conclusion

Les systèmes thermodynamiques apparaissent dans des processus dangereux caractérisés par des modèles fortement non linéaires. Par conséquent, la surveillance de tels processus est intéressante. Différentes approches pour la conception des procédures de FDI ont été développées, selon le genre de connaissance employé pour décrire l'opération du processus. Une d'elles repose sur l'utilisation des modèles dynamiques quantitatifs, qui mènent à la

détermination de RRAs, permettant la surveillance en temps réel. Cependant, la génération de RRAs n'est pas facile pour des systèmes, où le processus surveillé est un modèle non linéaire complexe combinant plusieurs énergies. Les propriétés de la platitude sont utilisées dans ce chapitre pour la surveillance des actionneurs dans les processus thermodynamiques plats. Pour les systèmes plats, l'étude de la surveillance des actionneurs est ramenée à un problème de déterminations des sorties plates. Cette tâche est résolue en utilisant aussi le même outil « le modèle bond graph ». En effet, pour une classe de processus thermofluides, certaines sorties plates sont facilement fixées (les sorties plates thermiques). La détermination des sorties plates hydrauliques est par contre plus compliquée mais il existe une technique qui aide à les trouver directement à partir du sous modèle hydraulique BG. La méthode est appliquée à un système thermofluide de trois réservoirs, des résultats équivalents à ceux obtenus par les méthodes classiques sont trouvés.

Cette approche présente l'avantage qu'elle permet la **surveillabilité des actionneurs d'une façon directe** (sans calcul préalable) tout en considérant les défaillances multiples.

Les modèles n'étant pas toujours plats, une autre approche basée sur **l'algèbre différentielle et les degrés de transcendance** est actuellement en cours de développement (voir l'annexe e):

- On sait calculer les degrés de transcendance à partir d'un modèle BG
- Contrairement à la platitude, cette méthode n'exige pas d'avoir autant de capteurs que d'actionneurs.

Dans ce cadre, dans *El Osta et al. (2005b)* est développée une approche basée sur le langage de l'algèbre différentielle en utilisant une approche bond graph. Cette méthodologie ne peut être appliquée que pour la classe de systèmes non linéaires où les entrées et leurs dérivées n'apparaissent que sous forme polynomiale. Les systèmes thermofluides peuvent être transformés (mise de leurs équations d'état sous forme polynomiale) permettant ainsi d'appliquer les techniques de surveillance.

# Chapitre 5

## ***Application***

### **5.1. Introduction**

Le but de ce chapitre est d'illustrer les méthodes d'analyse et de surveillance développées dans la thèse à un site pilote d'une installation de génération de vapeur (GV). Dans un premier temps, une partie d'une installation de générateur de vapeur est considérée; le PID a été établi puis le modèle BG non linéaire en interconnectant d'une façon modulaire les modèles BGs des composants. *Le modèle dynamique linéarisé* a été généré permettant de faire de l'analyse structurelle : commandabilité, observabilité et surveillabilité des fautes additives (sources, capteurs). Pour linéariser le modèle BG global, il a suffi de remplacer dans le modèle bond graph non linéaire chaque composant par son modèle bond graph linéarisé. Le modèle BG linéarisé ainsi que l'analyse structurelle faite à partir de ce modèle ont été validés en écrivant les équations d'état par une approche classique. Notons que les équations d'état du modèle BG linéarisé peuvent être écrites facilement (par un simple parcours des chemins causaux). Cette technique de déduction systématique de modèles à partir du bond graph est considérée en annexe B.

L'étude de surveillabilité des composants se base sur le *modèle dynamique bond graph linéarisé en mode défaillant*. Les résultats sur la surveillabilité structurelle (sans calcul préalable) ont été validés par comparaison avec la matrice de surveillabilité déduite par un calcul fastidieux des RRAs par une méthode de redondance analytique.

L'organigramme suivi pour l'analyse de la surveillabilité du système thermofluide (représenté dans cette application par le GV) est montré par la figure 5.1. On distingue les deux méthodes utilisées en fonction du type de modèle disponible (linéaire ou non linéaire). Une exploitation des propriétés causales et structurelles pour le modèle linéarisé et la platitude pour la diagnosabilité des actionneurs dans le cas des modèles non linéaires.

Toutes ces méthodes seront appliquées à l'installation pilote.

Grâce aux propriétés graphiques du modèle bond graph, il est aisé d'automatiser les procédures de génération des modèles dynamiques linéaires formels. La deuxième partie de ce chapitre applicatif sera consacrée à l'informatisation des algorithmes de génération des modèles linéarisés. Ce travail représente une continuité d'un travail de recherche développé dans le cadre du projet européen (6<sup>ème</sup> PCRD) *CHEM CHEM (2001)* où une boîte à outil « model builder » a été fournie pour la génération de modèles non linéaires en vue de la conception de systèmes de supervision *Ould Bouamama et al (2005 a et b)*. Ces procédures d'informatisation ont été développées dans le logiciel SYMBOLS-2000 *Mukherjee & Samantaray (2001)* afin d'exploiter quelques fonctionnalités existantes déjà.

L'outil informatique développé dans ce travail permettra alors de générer automatiquement le modèle global linéarisé de procédé énergétique complexe en connectant des sous modèles (que nous appellerons **capsules**) de composant formant le processus, à partir d'une base de données (bibliothèque des composants).

Les fonctionnalités de l'algorithme développé peuvent être résumées comme suit :

- Sur la base du Plan d'Instrumentation Détaillé (PID), le modèle architectural est réalisé suivant une approche fonctionnelle par une simple connexion des différents composants. A chaque composant est associé un sous modèle bond graph.
- L'analyse structurelle du modèle global linéarisé permet alors d'obtenir la surveillabilité du processus (basée sur une étude du parcours des chemins causaux) en fonction 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 fixé.

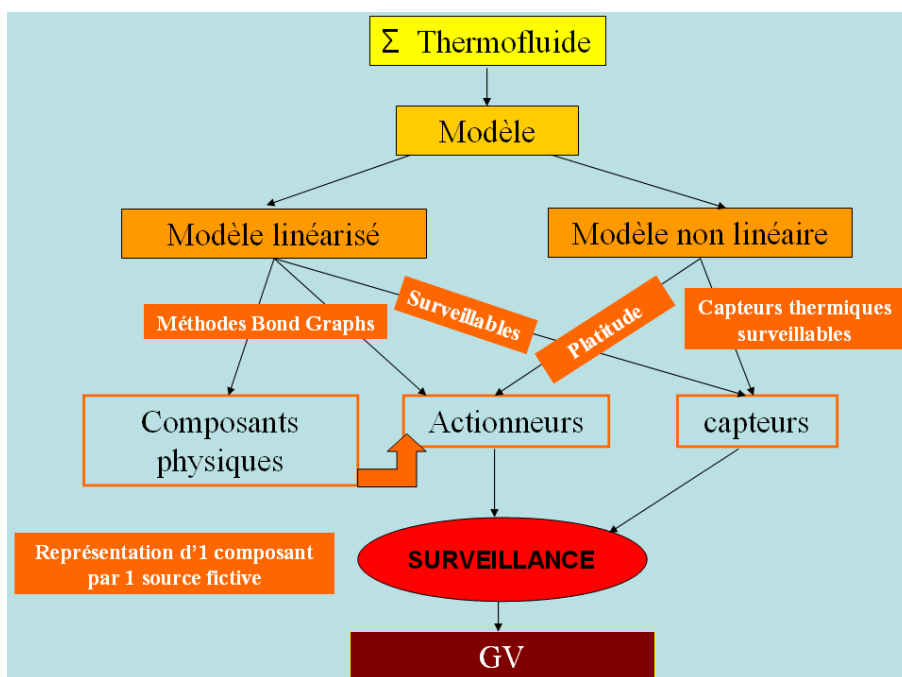


Figure 5.1. Organigramme des méthodes de surveillance développées.

## 5.2. Application au site pilote de générateur de vapeur

### 5.2.1. Description du processus

Le processus technologique est une installation pilote qui représente le fonctionnement à échelle réduite d'une partie d'une centrale nucléaire. Elle est située à l'université de Lille (France) et appartient au Laboratoire d'Automatique Génie Informatique et Signal (LAGIS), unité CNRS 8146. La vue générale est présentée sur la figure 5.2. Pour des raisons de commodité le circuit primaire d'une installation réelle est assuré dans notre cas par un

thermoplongeur électrique et la turbine est remplacée par un ensemble de vannes de détente pour absorber l'énergie produite par le générateur de vapeur.

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.

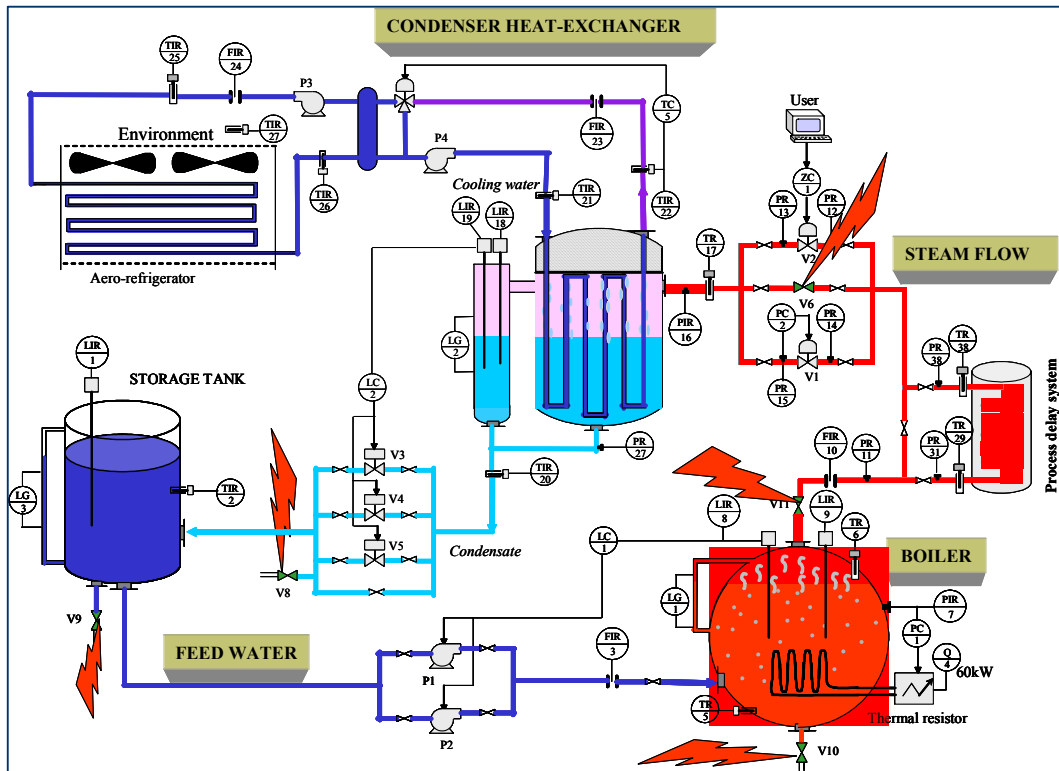


Figure 5.2. Schéma technologique de l'installation.

La vapeur d'eau produite subit une détente isenthalpique par un ensemble de vannes modulantes. Elle est ensuite condensée dans un échangeur condenseur à l'aide d'un circuit de refroidissement d'eau. Le condensât est stocké dans une bache alimentaire pour boucler le circuit. L'eau d'alimentation est refoulée par une pompe à vitesse constante vers la chaudière.

### 5.2.2. Bond graph de l'installation

Le bond graph à mots est donné par la figure 5.3. A l'entrée et sortie de chaque sous système de l'installation nous avons représenté les puissances mises en jeu. Les désignations des différents indices sont données par le tableau 5.1.

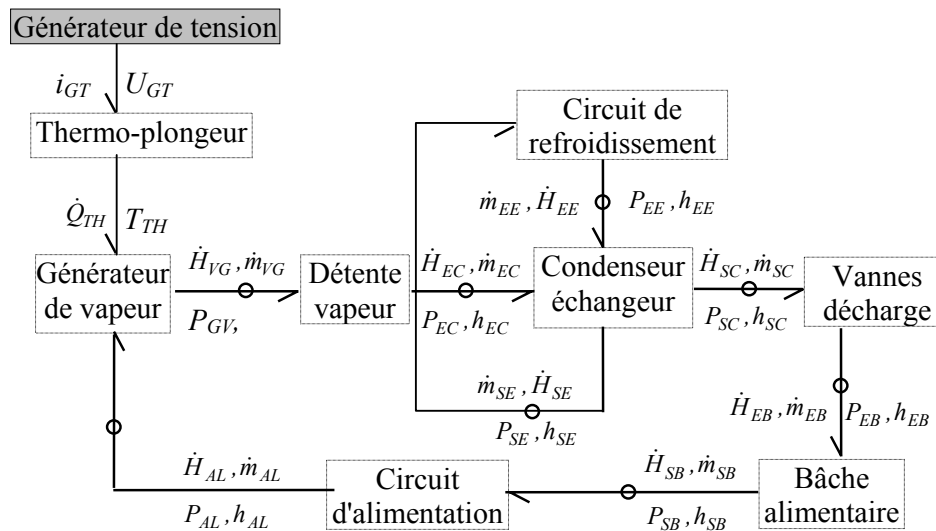
On s'intéresse au sous système défini par la bache alimentaire (recevant de l'eau par une source de flux), le circuit d'alimentation de l'installation comprenant la pompe, la vanne et la conduite, le générateur de vapeur avec le thermoplongeur (supposé débiter vers l'extérieur à travers une résistance).

Indice	Désignation	Observations
--------	-------------	--------------

<i>AL</i>	circuit d'Alimentation	Pompe, vanne et conduite
<i>GV</i>	Générateur de Vapeur	Accumulateur de vapeur
<i>TH</i>	Thermoplongeur	Élément chauffant électrique
<i>GT</i>	Générateur de Tension	Alimente le thermoplongeur
<i>VG</i>	Vapeur sortie du Générateur de vapeur	Entrée de la détente
<i>EC</i>	Entrée du Condenseur	Sortie de la détente
<i>SC</i>	Sortie du Condenseur	Entrée des vannes de décharge
<i>EB</i>	Entrée de la Bâche	Sortie des vannes de décharge
<i>SB</i>	Sortie de la Bâche	Entrée du circuit d'alimentation
<i>EE</i>	Entrée de l'Echangeur	Entrée eau de refroidissement
<i>SE</i>	Sortie de l'Echangeur	Sortie eau de refroidissement

**Tableau 5.1.** Désignation des indices des variables du bond-graph à mots

La partie détente de la vapeur constituée d'un ensemble de vannes modulantes et le condenseur couplé à l'échangeur de chaleur avec les vannes de décharge ne sont pas pris en compte.



**Figure 5.3.** Bond graph à mots de l'installation.

On adopte les hypothèses de modélisation suivantes :

1. Pour le circuit d'alimentation, le liquide dans le circuit est incompressible (eau à température ambiante);
2. Pour le générateur de vapeur, l'eau et la vapeur sont en équilibre thermodynamique, les propriétés thermodynamiques sont calculées en équilibre thermodynamique (justifié par le fait qu'il se produit une bonne homogénéisation de l'émulsion eau-vapeur). Le mélange est à une pression uniforme  $P_{GV}$ , i.e. on néglige l'effet des tensions superficielles des bulles de la vapeur d'eau qui provoque alors la variation de la pression du mélange. Le GV possède une capacité thermique et subit des pertes par conduction vers l'extérieur.
3. On considère enfin que toutes les variables sont à paramètres localisés.

Le système à modéliser possède un comportement nettement non linéaire dû principalement au couplage des différents phénomènes de natures diverses. Nous sommes en effet en présence d'énergie électrique (générateur de tension), hydraulique (écoulement des fluides dans les conduites), thermodynamique (production de vapeur, échange thermique ...), mécanique (pompe, vanne).

L'approche développée est maintenant appliquée à un système thermofluide donné par la représentation iconique (figure 5.4). Il se compose d'un réservoir de stockage  $C_1$  (bâche alimentaire) rempli par une source de flux de débit massique  $\dot{m}_1$  et à la température  $T_1$ , un circuit d'alimentation et un réservoir chauffé par un thermoplongeur de puissance thermique  $\dot{Q}$ . Le circuit d'alimentation est constitué d'une pompe  $P_1$  et d'une tuyauterie  $R_1$  (une seule pompe est considérée car la deuxième est redondante et installée pour des raisons de sécurité). L'eau chauffée du réservoir  $C_2$  passe à travers une vanne  $R_2$  au détendeur «Steam Flow  $\Sigma$ » imposant la pression  $P_S$  et la température  $T_S$ . Les vannes  $R_1$  et  $R_2$  sont supposées être tout ou rien. La partie de l'installation à modéliser peut être représentée par la figure suivante:

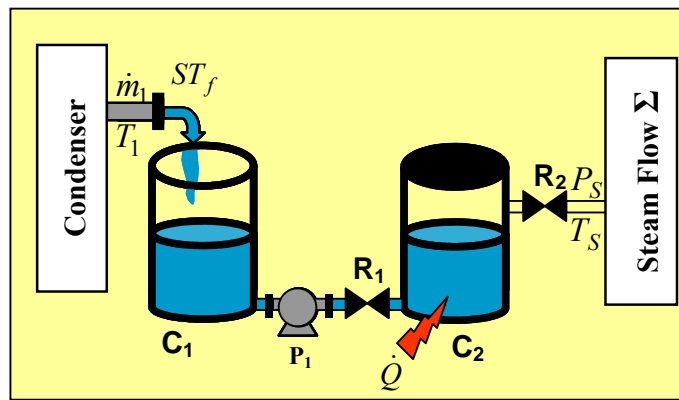


Figure 5.4. Schéma de l'installation.

Le modèle bond graph multiénergie et non linéaire est montré sur la figure 5.5.

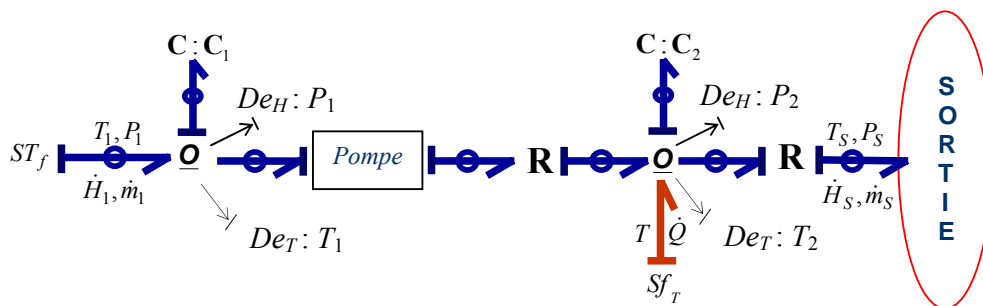


Figure 5.5. Modèle Bond Graph Multiénergie du système.

$ST_f$  est la source de flux thermofluide (supposée connue) précédemment et  $Sf_T$  est le flux thermique de la thermorésistance chauffant le générateur de vapeur, elle est alimentée par un générateur de tension d'une puissance de 60 kW.

Le modèle BG non linéaire éclaté avec les multiports détaillés (causalité intégrale) est représenté dans la figure 5.6. Les liens 28, 29 et 31 sont les liens d'informations spéciaux.

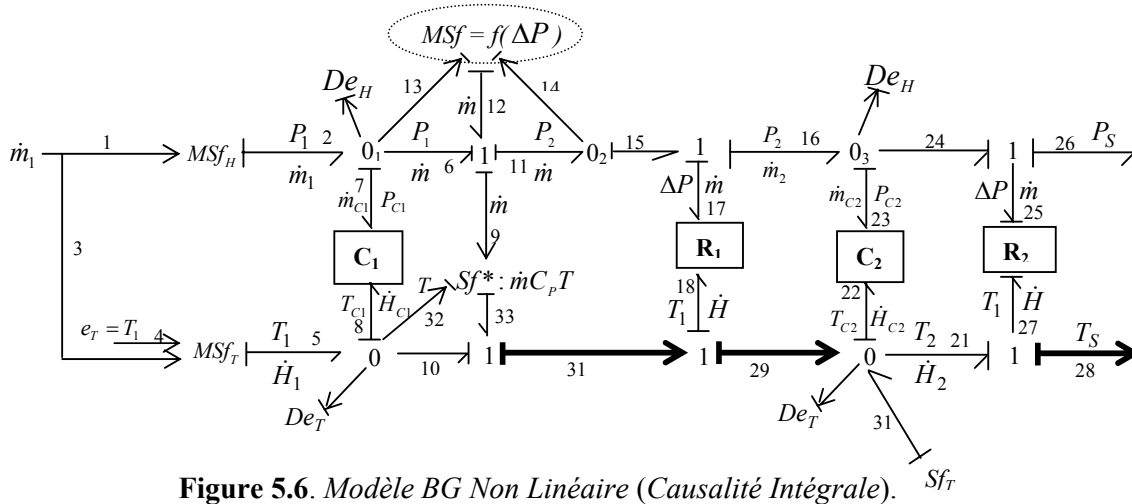


Figure 5.6. Modèle BG Non Linéaire (Causalité Intégrale).

Les capteurs d'effort  $De_T$  et  $De_H$  permettent la mesure de la température (associée à l'enthalpie  $h$ ) et la pression (associée à la masse dans le réservoir). On dispose de deux capteurs thermiques permettant la mesure de la température dans la bache alimentaire ( $T_1$ ) et dans le réservoir chauffé ( $T_2$ ) et de deux capteurs hydrauliques mesurant la pression au niveau de  $C_1$  ( $P_1$ ) et  $C_2$  ( $P_2$ ). Ils sont supposés être idéaux, et sont modélisés par des liens de signaux (pas de puissance transférée).

Les équations d'état sont données sous la forme non linéaire :  $\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t), d(t))$ , avec :

$$x(t) = \begin{pmatrix} m_{C_1} \\ m_{C_2} \\ H_{C_1} \\ H_{C_2} \end{pmatrix}, \quad u = \begin{pmatrix} \dot{m}_1 \\ T_1 \\ \omega \\ \dot{Q} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad d(t) = \begin{pmatrix} P_S \\ T_S \end{pmatrix}.$$

$x(t)$  est le vecteur d'état,  $u(t)$  est le vecteur d'entrée et  $d(t)$  le vecteur de perturbation.

Rappelons que les variables d'état employées par une approche bond graph sont celles liées au stockage d'énergie : les masses et les enthalpies totales (énergies internes) stockées dans les accumulateurs dans notre cas.

### 5.2.3. Linéarisation du modèle Bond Graph couplé

Le modèle BG linéarisé global peut être obtenu en remplaçant chaque composant dans le modèle BG non linéaire par son modèle linéarisé. Dans ce but, la linéarisation des composants par bond graph est le sujet de la section suivante. Nous allons ainsi traiter la linéarisation d'une source thermofluide, d'une pompe branchée, d'un multiport  $C$  en causalité intégrale et d'un multiport  $R$  en causalité résistance. La linéarisation du multiport  $R$  en causalité conductance a été déjà considérée au chapitre 2, le modèle linéarisé correspondant en

causalité résistance ne peut pas être directement déduit par un simple changement de causalité (propriété 4, chapitre 2), la procédure de linéarisation a été reprise dès le début.

### 5.2.3.1. Modèles Bond Graphs linéarisés des composants thermofluides

#### 5.2.3.1.1. Multiport **R** (Causalité Résistance)

Changer la causalité d'un multiport dans des domaines multiénergies doit être fait soigneusement. Par exemple, pour la causalité résistance, la dérivation des relations constitutives nous ramène à des relations algébriques entre des variables d'effort (au lieu des variables de flux pour la causalité conductance). C'est pourquoi, les jonctions 0 du schéma 2.47 sont remplacées par des jonctions 1 (voir le schéma 5.7).

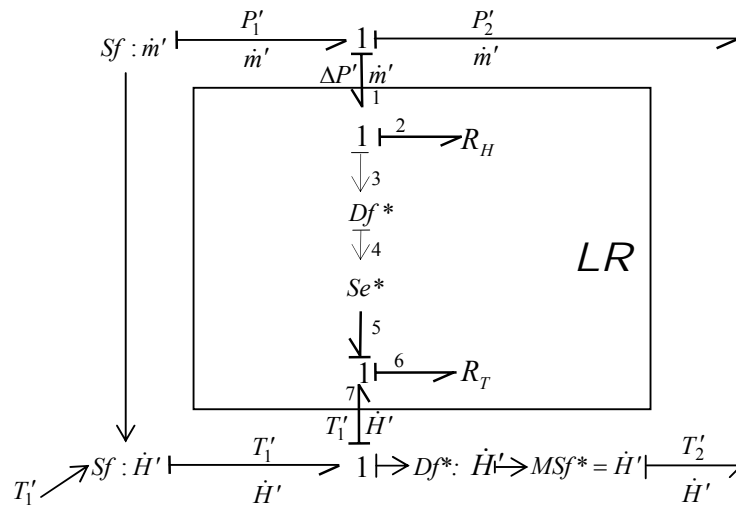


Figure 5.7. BG Linéarisé d'un multiport **R** (causalité résistance).

En conséquence, la source fictive de flux est remplacée par une source fictive d'effort et le détecteur fictif d'effort par un détecteur fictif de flux. Le schéma 5.7 ressemble au schéma 2.12 mis à part le multiport **R** qui a été remplacé par son modèle linéarisé.

On a :  $Df^* = \dot{m}'$  et  $Se^* = -\left(\frac{\partial T_1}{\partial \dot{m}}\right)_{(\bar{m}, \bar{H})} \dot{m}'$ . Comme  $De^* : \Delta P'$  et  $Df^* : \dot{m}'$  sont

proportionnelles (équation (2.42)), on aurait pu garder la jonction 0 au niveau hydraulique avec le capteur d'effort fictif. Ceci dit, un simple changement de causalité est suffisant au niveau des sous modèles hydrauliques. Evidemment, ce résultat provient du fait que l'énergie hydraulique est indépendante de l'énergie thermique en régime sous saturé.

Par conséquent, pour construire le modèle linéarisé d'un multiport mixte, de type 1 par exemple, il suffit de considérer le multiport **R** linéarisé en causalité résistance et passer à la causalité conductance au niveau hydraulique par un simple changement de causalité.

#### 5.2.3.1.2. Multiport **C** (le modèle linéarisé)

Suivant la causalité intégrale assignée, les sorties de l'accumulateur sont l'effort thermique  $T_C$  et l'effort hydraulique  $P_C$ . L'équation (2.16) étant linéaire, la linéarisation de Taylor de

l'équation constitutive thermique (équation 2.17) autour du point de fonctionnement  $(\bar{H}_C, \bar{m}_C)$  donne l'équation (5.1).

$$T'_C = \left( \frac{\partial F_T}{\partial H_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)} \cdot H'_C + \left( \frac{\partial F_T}{\partial m_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)} \cdot m'_C \quad (5.1)$$

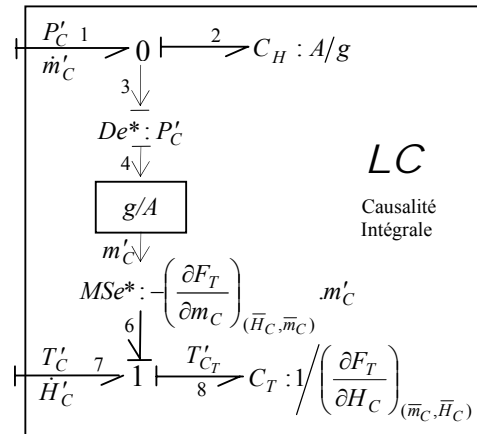
Pour déterminer les paramètres  $\left( \frac{\partial F_T}{\partial H_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)}$  et  $\left( \frac{\partial F_T}{\partial m_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)}$  de ce multiport, on doit dériver

la relation  $(T_C = \frac{H_C}{m_C \cdot C_P})$ . La linéarisation conduit à l'équation (5.2).

$$T'_C = \frac{1}{\bar{m}_C \cdot C_P} H'_C - \frac{\bar{H}_C}{(\bar{m}_C)^2 C_P} m'_C \quad (5.2)$$

On peut déduire que  $\left( \frac{\partial F_T}{\partial H_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)} = \frac{1}{\bar{m}_C C_P}$  et  $\left( \frac{\partial F_T}{\partial m_C} \right)_{(\bar{H}_C, \bar{m}_C)} = -\frac{\bar{H}_C}{(\bar{m}_C)^2 C_P}$ .

La figure 5.8 montre le BG thermodynamique linéarisé d'un élément C à 2 ports.



**Figure 5.8** Modèle Bond Graph linéarisé d'un Multiport C.

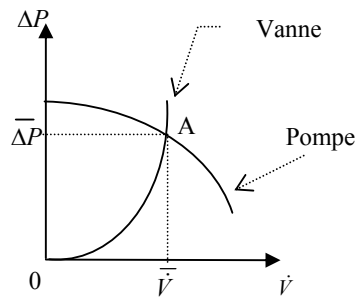
$C_H$  et  $C_T$  sont respectivement les capacités hydrauliques et thermiques.

### 5.2.3.1.3. Source Thermofluide Linéarisé (LTS)

La linéarisation de l'équation (2.33) autour d'un point de fonctionnement  $(\bar{m}, \bar{T}, \bar{H})$  donne les équations (5.3) et (5.4):

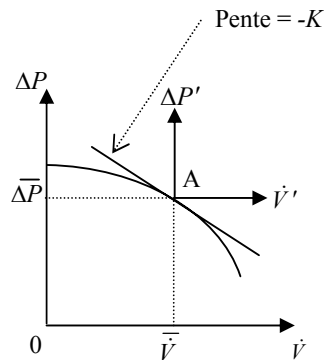


intersection de la courbe caractéristique de la pompe avec celle d'une vanne se trouvant sur le même circuit), (figure 5.10).



**Figure 5.10.** Détermination du point de fonctionnement (Intersection des courbes caractéristiques).

Une fois le point de fonctionnement  $(\overline{\Delta P}, \overline{V})$  déterminé, la linéarisation se fait autour de ce point A (figure 5.11).



**Figure 5.11.** Linéarisation de la courbe caractéristique autour du point de fonctionnement.

En écrivant la série de Taylor au premier ordre, pour la pompe tournant à une vitesse uniforme, on obtient l'équation (5.5),

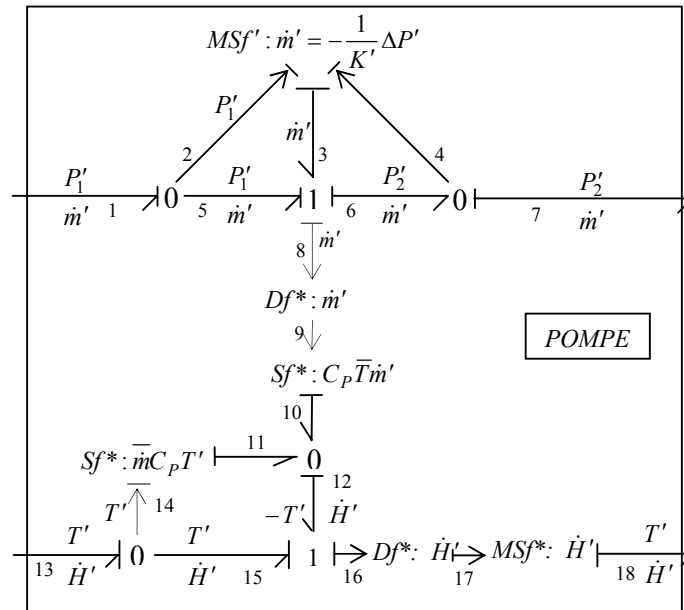
$$\Delta P = \overline{\Delta P} + \frac{d\Delta P}{d\dot{V}}(\overline{V}) \cdot \dot{V}' \quad (5.5)$$

avec  $\Delta P' = \frac{d\Delta P}{d\dot{V}}(\overline{V}) \cdot \dot{V}' = -K \cdot \dot{V}' = -K' \cdot \dot{m}'$ ,  $K$  et  $K'$  sont des constantes positives.

La pompe transporte aussi l'énergie thermique du fluide qui dépend directement du débit volumique de la pompe. En dérivant l'équation thermique de couplage ( $\dot{H} = \dot{m} \cdot C_p \cdot T$ ), on obtient la même équation de la source thermofluide (équation 5.4).

En considérant la figure 2.35, alors que la structure est linéaire, la procédure de linéarisation doit couvrir la source de flux modulée de la pompe  $MSf$  et la source fictive  $Sf^*$ . La source de flux modulée  $MSf$  est remplacée par  $MSf' : \dot{m}' = -\frac{1}{K'} \Delta P'$ . Cette source modulée (attachée à une jonction 1) imposera son flux  $\dot{m}$  valeur à  $\dot{m}'_1$  et  $\dot{m}'_2$ . En linéarisant la source fictive  $Sf^*$ , le

modèle BG donné par la figure 5.12 est obtenu. Une nouvelle source fictive est alors ajoutée (équation 5.4).



**Figure 5.12.** Modèle BG Linéarisé d'une pompe (source de flux modulée).

Une autre alternative est de modéliser la pompe par une résistance non linéaire  $R_p$ .

Les deux propositions de modélisation utilisent des éléments bond graphs non classiques mais dans les deux cas une explication peut être donnée. La figure 5.12 fait apparaître une source de flux qui dépend de la variable complémentaire d'effort  $\Delta P'$  ce qui est contradictoire avec la définition habituelle d'une source de flux. La modélisation de la pompe par une résistance non linéaire conduit à un modèle linéarisé faisant apparaître une résistance négative. En effet, comme le montre la figure 5.11, la résistance hydraulique est négative autour du point de fonctionnement. Cette résistance n'est pas une résistance classique, sa valeur négative provient du fait qu'elle est active, elle ne dissipe pas de l'énergie mais au contraire elle la fournit (une source d'énergie).

Dans la suite, on retiendra le modèle donné par la figure 5.12 car les bond graphs représentent les éléments actifs par des sources.

Il est à noter qu'en réalité, la pompe et la conduite (sur laquelle la pompe est branchée) forment un seul composant thermofluide. Ce composant est représenté par un sous modèle bond graph en annexe B (figure B.2). Dans cette représentation, il est possible de ne pas modéliser la partie thermique car elle est prise en considération au niveau de la conduite.

### 5.2.3.2. Modèle Bond Graph linéarisé de l'installation

Le modèle BG linéarisé de l'installation est donné par le schéma 5.13. Les sources linéarisées sont les nouveaux éléments actifs. Les sources d'effort hydraulique et thermique  $P'_s$  et  $T'_s$  sont considérées comme des perturbations. Il y a quatre éléments actifs : le débit massique et le

débit d'enthalpie d'admission (la source hydraulique  $\dot{m}'_1$  et la source thermique  $T'_1$  de la source thermofluide  $ST_f$ ), la pompe  $MSf$  et la source thermique par conduction  $Sf_T$  au niveau du réservoir  $C_2$ . Les vrais capteurs mesurent la variation de la température au niveau de  $C_2$   $De_T : T'_{C_2}$  (lien 86), la variation de la température au niveau de la bache  $De_T : T'_{C_1}$  (lien 87) et la variation de la pression dans le réservoir  $De_H : P'_{C_1}$  (lien 85). Les éléments actifs sont encerclés alors que les capteurs sont encadrés.

Les liens 28, 53 et 73 (figure 5.13) sont les liens d'information spéciaux. Nous distinguons quatre éléments dynamiques, deux capacités hydrauliques et deux thermiques en causalité intégrale et donc l'ordre du système est égal à quatre. Les équations d'état non linéaires sont données dans la suite.

### 5.2.3.3. Vérification des modèles BG linéarisés

Soient  $C_{1H}$ ,  $C_{2H}$ ,  $C_{1T}$ ,  $C_{2T}$ ,  $R_{1H}$ ,  $R_{2H}$ ,  $R_{1T}$ ,  $R_{2T}$  les capacités hydrauliques et thermiques de  $C_1$  et  $C_2$  respectivement les résistances hydrauliques et thermiques de  $R_1$  et  $R_2$ . En appliquant les équations (2.16) et (2.17) ( $P_C = \frac{m_C}{C_H}$  et  $T_C = \frac{H_C}{m_C \cdot C_p}$ ) au niveau de  $C_1$  et  $C_2$  (figure 5.6), on obtient:

$$e_7 = P_{C_1} = \frac{m_{C_1}}{C_{1H}}, \quad e_{23} = P_{C_2} = \frac{m_{C_2}}{C_{2H}}, \quad e_8 = T_{C_1} = \frac{H_{C_1}}{m_{C_1} C_p} \quad \text{et} \quad e_{22} = T_{C_2} = \frac{H_{C_2}}{m_{C_2} C_p} \quad \text{avec} \quad C_{1H} : \frac{A_1}{g} \quad \text{et} \quad C_{2H} : \frac{A_2}{g}.$$

En suivant la notation donnée dans l'hypothèse 4 (chapitre 3):  $x_1$  et  $x_3$  sont respectivement la masse et l'enthalpie dans le réservoir en amont,  $x_2$  et  $x_4$  représentent la masse et l'enthalpie dans le réservoir en aval du circuit thermofluide.  $K$ ,  $K_1$  et  $K_2$  sont respectivement les constantes de la pompe, de la vanne  $R_1$  et de la vanne  $R_2$ . Les équations non linéaires dérivées à partir de la figure 5.6 sont :

$$\dot{x}_1 = \dot{m}_{C_1} = \dot{m}_1 - MSf \quad (5.6)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{m}_{C_2} = f_{16} - f_{24} = f_{15} - K_2 \sqrt{e_{25}} = MSf - K_2 \sqrt{e_{24} - e_{26}} = MSf - K_2 \sqrt{\frac{x_2}{C_{2H}} - P_S} \quad (5.7)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{H}_{C_1} = f_8 = f_5 - f_{10} = \dot{m}_1 C_p T_1 - MSf \cdot C_p \frac{H_{C_1}}{m_{C_1} C_p} = \dot{m}_1 C_p T_1 - MSf \cdot \frac{x_3}{x_1} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 = \dot{H}_{C_2} &= f_{29} + Sf_T - f_{21} = MSf \cdot \frac{x_3}{x_1} + Sf_T - K_2 \sqrt{\frac{x_2}{C_{2H}} - P_S} \cdot C_p \cdot \frac{x_4}{x_2 C_p} \\ &= MSf \cdot \frac{x_3}{x_1} + Sf_T - K_2 \sqrt{\frac{x_2}{C_{2H}} - P_S} \cdot \frac{x_4}{x_2} \end{aligned} \quad (5.9)$$

La linéarisation de ces équations autour d'un point de fonctionnement conduit à:

$$\begin{aligned}
\dot{x}'_1 &= \dot{m}'_1 - MSf' \\
\dot{x}'_2 &= MSf' - \frac{K_2}{2\sqrt{\frac{\bar{x}_2}{C_{2H}} - \bar{P}_S}} \left( \frac{x'_2}{C_{2H}} - P'_S \right) = MSf' - \frac{1}{R_{2H}} \left( \frac{x'_2}{C_{2H}} - P'_S \right) \\
\dot{x}'_3 &= \dot{m}'_1 C_P \bar{T}_1 + \bar{m}'_1 C_P T'_1 - MSf' \cdot \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1} - \overline{MSf} \cdot C_P \left[ \frac{1}{C_{1T}} x'_3 - \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1^2} x'_1 \right] \\
\dot{x}'_4 &= MSf' \cdot \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1} + \overline{MSf} \cdot C_P \left[ \frac{1}{C_{1T}} x'_3 - \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1^2} x'_1 \right] + Sf'_T - \frac{1}{R_{2H}} \left( \frac{x'_2}{C_{2H}} - P'_S \right) \frac{\bar{x}_4}{\bar{x}_2} \\
&\quad - K_2 \sqrt{\frac{\bar{x}_2}{C_{2H}} - \bar{P}_S} \cdot C_P \left[ \frac{1}{C_{2T}} x'_4 - \frac{\bar{x}_4}{\bar{x}_2^2} x'_2 \right]
\end{aligned}$$

On obtient ce qu'on appelle le modèle linéarisé tangent.

Ces équations d'état sont directement obtenues à partir modèle BG global linéarisé (figure 5.13). En effet, l'écriture des équations aux jonctions ou la méthode directe montrée en annexe B (par calcul des gains de chemins causaux) conduit au même résultat. Cette propriété a été démontrée dans *Rimaux (1995)* et vérifiée ici.

Les équations linéarisées peuvent être écrites sous la forme:

$$\dot{X}' = A \cdot X' + B \cdot \begin{pmatrix} \dot{m}'_1 \\ T'_1 \\ Sf'_T \end{pmatrix} + \Omega_a \cdot MSf' + \Omega_d \cdot \begin{pmatrix} P'_S \\ T'_S \end{pmatrix}$$

1. Si la pompe est considérée comme une source de commande:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{2H} C_{2H}} & 0 & 0 \\ \overline{MSf} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1^2} & 0 & -\overline{MSf} \frac{C_P}{C_3} & 0 \\ -\overline{MSf} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1^2} & \left( -\frac{1}{R_{2H} C_{2H}} \frac{\bar{x}_4}{\bar{x}_2} + \bar{m}'_S \frac{\bar{x}_4}{\bar{x}_2^2} \right) & \overline{MSf} \frac{C_P}{C_{1T}} & -\bar{m}'_S \frac{C_P}{C_{2T}} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ C_P \bar{T}_1 & \bar{m}'_1 C_P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \Omega_a = \begin{pmatrix} -1 \\ \frac{1}{\bar{x}_3} \\ -\frac{1}{\bar{x}_1} \\ \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1} \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad \Omega_d = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{R_{2H}} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\bar{x}_4}{R_{2H} \bar{x}_2} & 0 \end{pmatrix}.$$

Avec  $\bar{m}'_S = K_2 \sqrt{\frac{\bar{x}_2}{C_{2H}} - \bar{P}_S}$  le débit de sortie en régime stationnaire.

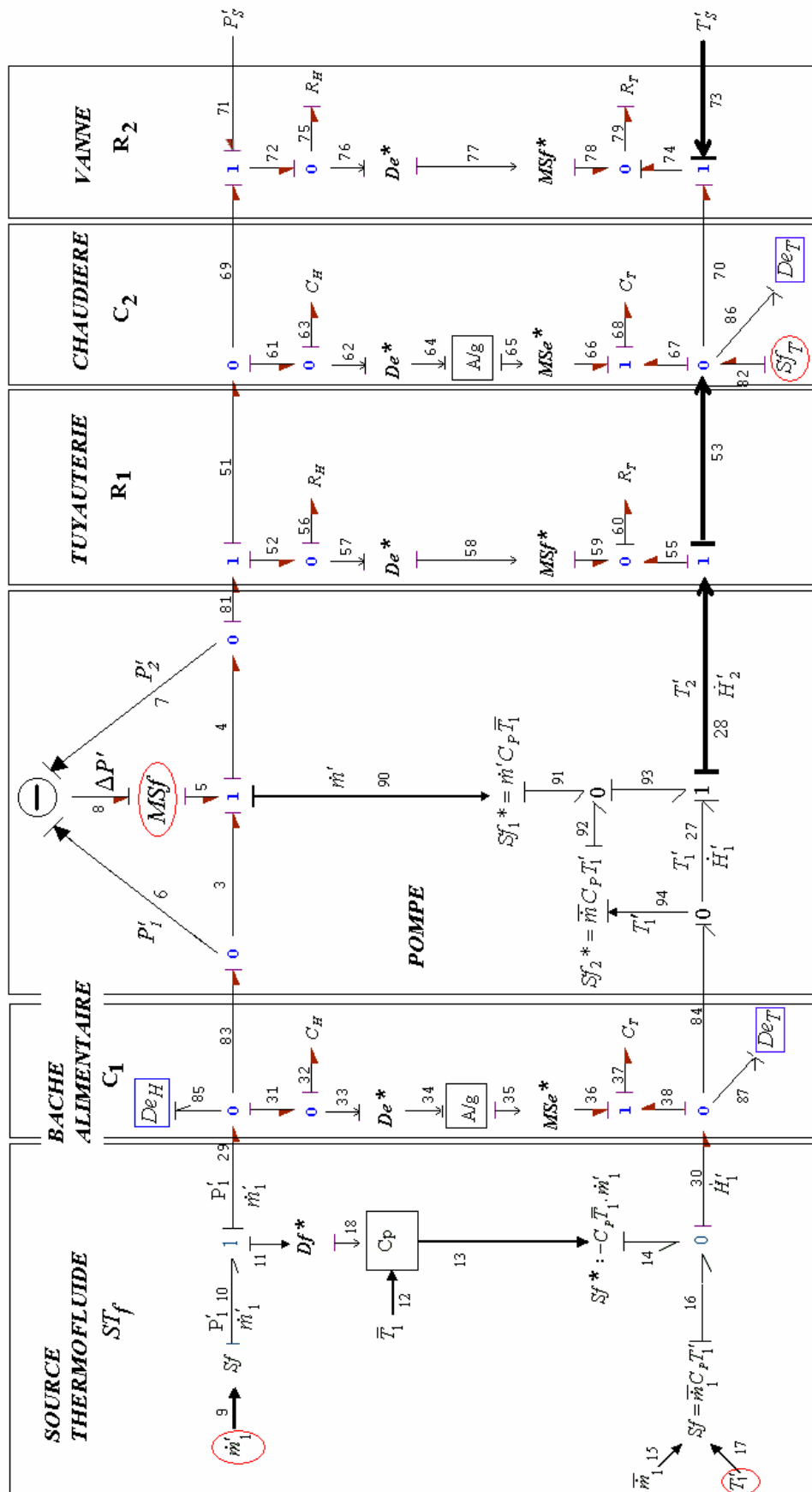


Figure 5.13. Modelé Bond Graph Linearisé.

A partir de la figure 5.13, on peut écrire  $MSf' = -K \left( R_{1H} MSf' + \frac{x'_2}{C_{2H}} - \frac{x'_1}{C_{1H}} \right)$ . Une réécriture de cette équation implicite, exprime explicitement  $MSf'$  :

$$MSf' = -\frac{K}{1 + KR_{1H}} \left( \frac{x'_2}{C_{2H}} - \frac{x'_1}{C_{1H}} \right)$$

2. Si la pompe n'est pas considérée comme une source de commande:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{1H}} & \frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{2H}} & 0 & 0 \\ \frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{1H}} & \left( -\frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{2H}} - \frac{1}{R_{2H} C_{2H}} \right) & 0 & 0 \\ (\overline{MSf} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1^2} - \frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{1H}} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1}) & \frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{2H}} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1} & -\overline{MSf} \frac{C_P}{C_{1T}} & 0 \\ -(\overline{MSf} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1^2} - \frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{1H}} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1}) & \left( -\frac{1}{R_{2H} C_{2H}} \frac{\bar{x}_4}{\bar{x}_2} + \overline{m}_s \frac{\bar{x}_4}{\bar{x}_2^2} - \frac{K}{1 + KR_{1H}} \frac{1}{C_{2H}} \frac{\bar{x}_3}{\bar{x}_1} \right) & \overline{MSf} \frac{C_P}{C_{1T}} & -\overline{m}_s \frac{C_P}{C_{2T}} \end{pmatrix}$$

**Remarque 5.2.1.** Dans le deuxième cas, en déduisant les équations d'état du modèle BG global linéarisé par le calcul des gains des chemins causaux, la constante de la pompe  $K$  devrait être remplacée par  $\frac{K}{1 + KR_{1H}}$  à cause de l'équation implicite reliant  $MSf'$  et  $R_{1H}$  (illustrée sur le bond graph par une boucle causale entre  $MSf'$  et  $R_{1H}$ ).

## 5.2.4. Analyse structurelle du modèle BG linéarisé

Des propriétés structurelles de commandabilité, d'observabilité et de surveillabilité sont abordées directement à partir bond graph linéarisé. Au niveau FDI, chacun des sous ensembles d'éléments (actionneurs, composants et capteurs) est considéré à part en supposant qu'aucun élément des autres sous ensembles ne tombe en panne (faute simple). Concernant les défauts actionneurs, leur surveillabilité a été considérée à partir du modèle linéarisé ou directement à partir du modèle non linéaire en utilisant la platitude. Les résultats obtenus par les deux approches ont été comparés.

### 5.2.4.1. Rang structurel

On a vu que le rang d'une matrice d'état dans un système thermofluide linéarisé dépend des sources modulées. En effet, si les sources modulées sont ou pas des sources de commande le rang peut changer (Propriété 5, chapitre 3). Le modèle donné par la figure 5.13 est en causalité intégrale. Selon que la pompe est considérée comme une source de commande ou pas, le modèle en causalité dérivée est différent. Les deux modèles en causalité dérivée sont donnés en annexe (Annexe C).

A. La pompe est considérée comme une source de commande

Le modèle est d'ordre quatre, il y a quatre éléments dynamiques. Trois éléments dynamiques peuvent avoir la causalité dérivée lors de l'application de la causalité dérivée préférentielle. Par contre, la capacité hydraulique (lien 32) conserve la causalité intégrale et par suite :  $\text{Rang}_s[A]=3$ .

#### B. La pompe comme une source modulée

Le modèle est toujours d'ordre quatre. Désormais, la capacité hydraulique du lien 32 passe en causalité dérivée en changeant la causalité de la résistance hydraulique du lien 56 et en parcourant le chemin causal suivant:

$C_H$  (bâche alimentaire) - 32 - 31 - 83 - 6 - 8 - 5 - 4 - 81 - 52 - 56 -  $R_H$ .

Par conséquent,  $\text{Rang}_s[A] = 4$ .

#### 5.2.4.2. Commandabilité structurelle

On commence par vérifier si le système remplit la condition de l'atteignabilité : pour cela il faut que des chemins causaux liant les éléments dynamiques aux sources existent:

Les capacités hydrauliques  $C_H$  sont atteignables par les sources hydrauliques  $\dot{m}'_1$  (source thermofluide  $ST_f$ ) et  $MSf$  (source de flux de la pompe). Les capacités thermiques  $C_T$  sont atteignables par les deux sources hydrauliques mais pas par toutes les sources thermiques. La capacité thermique  $C_T$  de  $C_1$  n'est atteignable que par la source thermique  $T'_1$  alors que la variable d'état thermique associée à  $C_2$  est atteignable par les sources thermiques  $\dot{Q}$  et  $T'_1$  (la proposition 5 peut ainsi être vérifiée).

La condition d'atteignabilité est satisfaite, car tous les éléments dynamiques sont causalement connectés à au moins une source. A titre d'illustration, on cite seulement un chemin causal pour tout élément dynamique.

Pour la capacité thermique (lien 37), le chemin causal partant de la source de flux thermofluide est:  $Se_T : T'_1 - 17 - 16 - 30 - 38 - 37 - C_T$ .

Pour la capacité thermique (lien 68), le chemin causal partant de la source thermique de la chaudière est:  $Sf_T - 82 - 67 - 68 - C_T$ .

Pour la capacité hydraulique (lien 32), le chemin causal partant de la source de flux thermofluide est:  $Sf : \dot{m}'_1 - 9 - 10 - 29 - 31 - 32 - C_H$ .

Pour la capacité hydraulique (lien 63), le chemin causal partant de la pompe est:  $MSf - 5 - 4 - 81 - 51 - 61 - 63 - C_H$ .

Une fois ces chemins causaux déterminés, on doit vérifier que ces éléments dynamiques passent en causalité dérivée quand on applique la causalité préférentielle dérivée.

**Remarque 5.2.2.** *D'après la proposition 5, on aurait pu se contenter de vérifier qu'il existe une source hydraulique pour la propriété d'atteignabilité.*

La pompe étant considérée comme une source modulée, deux cas existent selon que la pompe est ou non une source de commande :

- La pompe considérée comme une source de commande  
Le  $\text{Rang}_s[A]$  est de trois, le système nécessite au moins une source de commande indépendante bien placée pour satisfaire la propriété de la commandabilité. En dualisant  $MSf$  la capacité hydraulique du lien 32 passe en causalité dérivée (voir l'Annexe C), on déduit alors que le modèle linéarisé est structurellement commandable par la pompe. Les équations d'état obtenues vérifient les propriétés structurelles déterminées en utilisant une approche BG. En effet, dans ce premier cas le rang structurel de  $A$  est de 3 mais  $\text{rang}_s\langle A|\Omega\rangle = 4$  (rang structurel) et par conséquent le modèle est commandable en utilisant la pompe comme une source de commande.

- B. La pompe comme une source modulée  
Le  $\text{Rang}_s[A]$  est de quatre, le système a besoin d'au moins une source hydraulique de commande indépendante pour la commandabilité et évidemment le système serait commandable par la source  $Sf : \dot{m}'_1$  (source thermofluide).  
A partir des équations d'état : le rang structurel de  $A$  est égal à 4 et par conséquent le modèle est commandable par n'importe quelle source indépendante atteignable par le système. Ceci peut être assuré par n'importe quelle source hydraulique indépendante puisqu'il n'y a aucune contrainte d'atteignabilité sur les sources hydrauliques. Le système est commandable par la source thermofluide.

En appliquant le théorème 5, on aurait pu se contenter de faire l'étude au niveau hydraulique.

### 5.2.4.3. Observabilité structurelle

Pour la propriété d'observabilité, la procédure graphique habituelle est employée. Toutes les capacités sont accessibles par le détecteur d'effort thermique  $De_T$  installé à  $C_2$  (proposition 6), alors qu'il n'y a que les capacités hydrauliques qui sont accessibles par le détecteur d'effort hydraulique  $De_H$  installé au niveau du réservoir de stockage  $C_1$ . Toutes les capacités hydrauliques et seulement la capacité thermique du réservoir de stockage sont accessibles par le détecteur d'effort thermique installé au niveau du réservoir de stockage.

Puisque toutes les capacités sont accessibles par le détecteur d'effort thermique  $De_T$  au niveau de  $C_2$  (réservoir en aval du circuit thermofluide), ce détecteur assure la condition d'accessibilité. Les chemins causaux liant les différentes capacités à ce détecteur sont :

Pour la capacité thermique (lien 37, réservoir de stockage  $C_1$ ), le chemin causal vers le détecteur de température est :

$C_T$  (bâche) - 37 - 38 - 84 - 94 - 92 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 -  $C_T$  (réservoir chauffé  $C_2$ ) - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

Pour la capacité thermique du (lien 68  $C_2$ ), le chemin causal est :

$C_T$  (réservoir chauffé) - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

Pour la capacité hydraulique (lien 63  $C_2$ ), le chemin causal est :

$C_H$  (réservoir chauffé) - 63 - 62 - 64 - 65 - 66 - 67 - 86 -  $De_T$ .

Et finalement, pour la capacité hydraulique (lien 32  $C_1$ ), le chemin causal est :

$C_H$  (bâche) - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 - 38 - 84 - 94 - 92 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 -  $C_T$  (réservoir chauffé) - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

Quand la causalité dérivée préférentielle est affectée, tous les éléments dynamiques admettent une causalité dérivée et le rang de  $A$  ( $\text{Rang}_s[A]$ ) est égal à quatre. Le système a besoin d'au moins un capteur thermique bien placé pour satisfaire la propriété d'observabilité et par conséquent le système linéarisé est structurellement observable par le détecteur thermique d'effort installé à  $C_2$ .

**Remarque 5.2.3.** *En considérant le détecteur d'effort thermique  $De_T$  installé à  $C_2$  (par qui toutes les capacités sont accessibles), l'application du théorème 6 revient à se contenter d'étudier la propriété d'observabilité au niveau hydraulique seulement.*

Pour l'étude de l'observabilité à partir des équations d'état, nous considérons évidemment la deuxième matrice d'état, le rang de  $A$  est égale à quatre et le système est observable par n'importe quel détecteur assurant l'accessibilité du système. Le seul détecteur vérifiant cette condition est le détecteur d'effort thermique placé au niveau du réservoir chauffé.

### 5.2.5. Surveillabilité des défauts additifs à partir du modèle BG linéarisé

Cette section traite la surveillabilité des fautes sur les capteurs et sur les actionneurs. Dans un premier temps, la surveillabilité des quatre capteurs hydrauliques et thermiques (figure 5.13) est considérée. Pour la surveillabilité des actionneurs  $Sf_H : \dot{m}'_1$  (source thermofluide),  $MSf$  (pompe),  $T'_1$  (source thermofluide) et  $Sf_T : \dot{Q}$  (chaudière), deux cas sont traités selon que l'on considère les capteurs hydrauliques et thermiques ou uniquement les capteurs thermiques.

#### 5.2.5.1. Surveillabilité des capteurs

Comme nous avons plus d'un capteur nous déduisons de la section 3.5.3 que tous les capteurs sont surveillables.

#### 5.2.5.2. Surveillabilité des actionneurs en utilisant les capteurs hydrauliques et thermiques

Pour l'étude de la surveillabilité, il faut déterminer les chemins causaux liant l'ensemble des sources à l'ensemble des capteurs. On distingue quatre sources : deux sources hydrauliques et deux sources thermiques.

Pour l'étude de la surveillabilité des sources hydrauliques, considérons les détecteurs  $De_H$  (85) et  $De_T$  (lien 86).

- Chemin causal liant la source  $Sf_H : \dot{m}'_1$  au détecteur de pression  $De_H$  :

$Sf_H : \dot{m}'_1 - 9 - 10 - 29 - 31 - 32 - C_H - 32 - 31 - 85 - De_H$ .

- Chemin causal liant la source  $Sf_H : \dot{m}'_1$  au détecteur de température  $De_T$ :

$Sf_H : \dot{m}'_1 - 9 - 10 - 29 - 31 - 33 - 34 - 35 - 36 - 38 - 84 - 94 - 92 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 - C_T - 68 - 67 - 86 - De_T$ .

Pour la pompe  $MSf$ :

- Chemin causal liant la source  $MSf$  au détecteur de pression :

$MSf - 5 - 3 - 83 - 31 - 32 - C_H - 32 - 31 - 85 - De_H$ .

- Chemin causal liant la source  $MSf$  au détecteur de température:

$MSf - 5 - 4 - 81 - 51 - 61 - 62 - 64 - 65 - 66 - 67 - 86 - De_T$ .

Les chemins causaux non communs ne restent pas les mêmes *en considérant un autre capteur* et par conséquent les sources hydrauliques sont surveillables (corollaire 1).

Pareillement les deux actionneurs thermiques sont surveillables en considérant les deux détecteurs d'effort thermiques, en effet :

- Chemin causal liant la source  $Sf_T : T'_1$  au détecteur de température  $De_T$  (87)

$T'_1 - 17 - 16 - 30 - 38 - 37 - C_T - 37 - 38 - 87 - De_T$ .

- Chemin causal liant la source  $Sf_T : T'_1$  au détecteur de température  $De_T$  (86)

$T'_1 - 17 - 16 - 30 - 38 - 37 - C_T - 37 - 38 - 84 - 94 - 92 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 - C_T - 68 - 67 - 86 - De_T$ .

Pour  $Sf_T : \dot{Q}$  :

- Pas de chemin causal liant la source  $Sf_T : \dot{Q}$  au détecteur de température  $De_T$  (87)

- Chemin causal liant la source  $Sf_T : \dot{Q}$  au détecteur de température  $De_T$  (86)

$Sf_T - 82 - 67 - 68 - C_T - 68 - 67 - 86 - De_T$ .

D'après la proposition 8, toutes les sources de flux thermiques ont des signatures de faute différentes et par suite elles sont isolables. Grâce au détecteur hydraulique, l'ensemble des actionneurs hydrauliques est surveillable avec l'ensemble des actionneurs thermiques (proposition 9) et par conséquent tous les actionneurs deviennent surveillables avec les capteurs considérés.

**Remarque 5.2.4.** *En appliquant le théorème 7, notre étude sur la surveillabilité des actionneurs hydrauliques aurait pu se limiter à une étude de la surveillabilité des sources fictives actives au niveau thermique  $Sf^*$  et  $Sf_1^*$ .*

### 5.2.5.3. Surveillabilité des actionneurs avec uniquement des capteurs thermiques

Le sous modèle BG thermique est donné par la figure 5.14. Pour les actionneurs : en se basant sur les théorèmes 7 et 8, notre étude se limite à  $Sf^*$  et  $Sf_1^*$  (sources fictives actives) pour les actionneurs hydrauliques et à  $T_1'$  et  $Sf_T$  pour les actionneurs thermiques. Considérons les chemins causaux parcourus entre les sources considérées et chacun des capteurs thermiques, ce qui mène à :

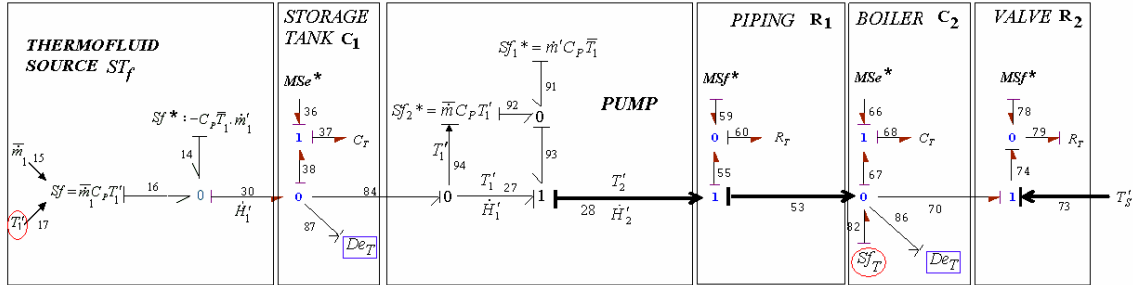


Figure 5.14. Sous Modèle Bond Graph Thermique.

Pour  $Sf_H^*$  :

$Sf^*$  - 14 - 30 - 38 - 37 -  $C_T$  - 37 - 38 - 87 -  $De_T$ .

$Sf^*$  - 14 - 30 - 38 - 37 -  $C_T$  - 37 - 38 - 84 - 94 - 92 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 -  $C_T$  - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

$Sf_1^*$  - 91 - 93 - 27 - 84 - 38 - 37 -  $C_T$  - 37 - 38 - 87 -  $De_T$ .

$Sf_1^*$  - 91 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 -  $C_T$  - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

Sur la base de la proposition 8, il suit que les sources hydrauliques sont surveillables. Pareillement, les actionneurs thermiques  $T_1'$  et  $Sf_T$  sont aussi surveillables:

$T_1'$  - 17 - 16 - 30 - 38 - 37 -  $C_T$  - 37 - 38 - 87 -  $De_T$ .

$T_1'$  - 17 - 16 - 30 - 38 - 37 -  $C_T$  - 37 - 38 - 84 - 94 - 92 - 93 - 28 - 53 - 67 - 68 -  $C_T$  - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

$Sf_T$  - 82 - 67 - 68 -  $C_T$  - 68 - 67 - 86 -  $De_T$ .

Par conséquent, tous les actionneurs sont surveillables avec seulement deux capteurs thermiques.

### 5.2.6. Surveillabilité des défauts multiplicatifs (composants) à partir du modèle BG linéarisé

Les défauts en génie des procédés peuvent résulter d'un composant défectueux actif ou passif : une source, un détecteur ou un composant technologique. Considérons seulement les défauts composants dans les systèmes thermofluides, comme illustration de la méthodologie.

### 5.2.6.1. Description des défauts

Considérons par exemple quatre défauts suspects (seulement les défauts multiplicatifs sont considérés) et étudions la propriété d'isolabilité.

#### *Défauts paramétriques*

- L'accumulateur 1 est déformé  $\Delta C_1$
- Une variation  $\Delta R_2$  représentant la modification de la caractéristique de la vanne

#### *Défauts structurels*

- Accumulation de saleté (entartrage) au niveau de  $C_2$  : variation  $\Delta C_m$  de la capacité modélisant l'énergie calorifique stockée par le métal de l'accumulateur
- Un phénomène de fuite (modélisé par  $\Delta R_h$ ) au niveau du tuyau  $R_1$ , le point intermédiaire  $m$  représentant le point de la fuite est supposé être à l'extrémité du tuyau du côté de la pompe. En conséquence, le multiport  $R$  modélisant la perte de pression ( $P_1 - P_m$ ) sur le schéma 3.11 disparaît.

En considérant les défauts composants, le modèle non linéaire avec les Multiports détaillés (causalité intégrale) est représenté sur le schéma 5.15. Le flux thermique par conduction est modélisé par bond graph simple (il y a un seul type d'énergie). Cependant, le flux thermique par convection est modélisé d'une manière vectorielle comme représenté sur le schéma 5.15. Une telle représentation non linéaire ne peut pas être utilisée pour faire de l'analyse, c'est pourquoi on propose ci-dessous une linéarisation du modèle BG (modèle bien adapté pour l'analyse causale).

### 5.2.6.2. Linéarisation du modèle Bond Graph en mode défaillant

Le modèle BG linéarisé global est simplement obtenu en interconnectant les modèles BGs linéarisés de chaque composant. Pour le réservoir  $C_1$  avec le défaut paramétrique  $\Delta C_1$  le modèle linéarisé est donné sur le schéma 3.20 (la source fictive obtenue est  $Se_{C_1}^*$ ). Pour la vanne  $R_2$  avec le défaut paramétrique  $\Delta R_2$ , le modèle linéarisé est donné par le schéma 3.19 (b) (nous avons choisi cette représentation puisqu'elle fournit seulement une source fictive  $Sf_R^*$ ). Pour le réservoir chauffé  $C_2$ , le modèle linéarisé est déduit du schéma 3.20 en supprimant la source fictive  $Se_C^*$ . En considérant un phénomène d'entartrage au niveau de  $C_2$ , la linéarisation fait apparaître la source fictive  $Se_{C_m}^*$ . La linéarisation de la fuite d'écoulement à l'extrémité de la tuyauterie  $R_1$  (à la sortie de la pompe) introduit la source fictive  $Se_{R_h}^*$  comme le montre le schéma 3.21. De la même manière et en suivant la technique illustrée de linéarisation, les modèles BG linéarisés des sources d'énergie (la pompe centrifuge et la source thermofluide  $ST_f$ ) et du multiport  $R_1$  en causalité résistance sont obtenus. Après avoir déterminé pour chaque multiport le sous modèle BG linéarisé correspondant nous pouvons facilement construire le "modèle global en fonctionnement défaillant" en remplaçant les multiports non linéaires par leurs formes linéarisées et en prenant en compte les défauts présumés (schéma 5.16).

Les sources linéarisées sont les nouveaux éléments actifs. Alors que la source d'effort hydraulique  $P'_S$  et thermique  $T'_S$  sont considérées comme des perturbations, il y a quatre éléments actifs: le débit massique d'admission et le débit d'enthalpie (la source hydraulique

$\dot{m}'_1$  et la source thermique  $T'_1$  de la source thermofluide  $ST_f$ ), la pompe  $MSf$  et la source de flux thermique  $Sf_T$  au niveau du réservoir  $C_2$ . Les vrais capteurs mesurent la variation de la température dans le réservoir  $C_2$   $De_T : T'_{C_2}$  (lien 86), la variation de la température dans le réservoir de stockage  $De_T : T'_{C_1}$  (lien 87), la variation de pression dans le réservoir 1  $De_H : P'_{C_1}$  (lien 85) et dans le réservoir 2  $De_H : P'_{C_2}$  (lien 116). Les éléments actifs sont encadrés et les capteurs sont encadrés. Notez que les sources fictives définies pour l'étude de la surveillabilité sont encadrées pour les distinguer des vraies sources.

Les liens 28, 53 et 73 (figure 5.16) sont les liens d'information spéciaux définis précédemment et utilisés pour simplifier la représentation. Nous distinguons quatre éléments dynamiques, deux capacités hydrauliques et deux capacités thermiques en causalité intégrale et donc l'ordre du système est égal à quatre.

### 5.2.6.3. Surveillance des composants du modèle BG linéarisé

Cette section montre qu'en raison de la présence des deux détecteurs hydrauliques au niveau des réservoirs  $C_1$  et  $C_2$ , les défauts paramétriques considérés sur les composants  $C_1$  et  $R_2$  ainsi que la fuite d'écoulement considérée sont surveillables.

Notre étude est limitée aux sources fictives  $Se_{C_1}^*$ ,  $Sf_{Rh}^*$  et  $Se_{Rh}^*$ . Considérons les chemins causaux liants les sources fictives considérées à chacun des capteurs hydrauliques, ce qui donne :

$$Se_{C_1}^* - 102 - 31 - 85 - De_H.$$

$$Se_{C_1}^* - 102 - 31 - 83 - 6 - 8 - MSf - 5 - 4 - 104 - 116 - 51 - 61 - 63 - C_H - 63 - 61 - 116 - De_H.$$

-----

$$Se_{Rh}^* - 108 - 109 - R_h - 109 - 107 - 105 - 116 - 52 - 56 - R_H - 56 - 52 - 116 - 104 - 7 - 8 - MSf - 5 - 3 - 83 - 31 - 103 - 32 - \bar{C}_H - 32 - 103 - 31 - 85 - De_H.$$

$$Se_{Rh}^* - 108 - 109 - R_h - 109 - 107 - 105 - 116 - 51 - 61 - 63 - C_H - 63 - 61 - 116 - De_H.$$

-----

$$Sf_{Rh}^* - 100 - 101 - 72 - 69 - 61 - 63 - C_H - 63 - 61 - 51 - 116 - 104 - 7 - 8 - MSf - 5 - 3 - 83 - 31 - 103 - 32 - \bar{C}_H - 32 - 103 - 31 - 85 - De_H.$$

$$Sf_{Rh}^* - 100 - 101 - 72 - 69 - 61 - 63 - C_H - 63 - 61 - 116 - De_H.$$

Sur la base de la proposition 11, il suit que toutes les sources fictives considérées sont surveillables et par conséquent, les défauts paramétriques considérés sur les composants  $C_1$  et  $R_2$  ainsi que la fuite d'écoulement considérée sont surveillables. L'ajout d'un détecteur thermique au niveau de  $C_2$  assure la surveillabilité du défaut lié au phénomène d'entartrage au niveau de  $C_2$  avec les autres défauts. Alors que les sources fictives  $Se_{C_1}^*$ ,  $Se_{Rh}^*$ ,  $Sf_{Rh}^*$  sont toutes accessibles par les capteurs hydrauliques et thermiques, le défaut lié au phénomène

d'entartrage au niveau de  $C_2$  représenté par la source fictive  $Se_{C_m}^*$  (source au niveau thermique) est accessible seulement par le capteur thermique ajouté au niveau de  $C_2$ .

#### 5.2.6.4. Vérification par la génération des RRAs et les signatures des fautes

Considérons le modèle BG non linéaire donné sur la figure 5.6. La perte thermique au niveau de  $C_2$  n'est pas considérée mais elle peut facilement être introduite en ajoutant le sous-modèle correspondant donné sur le schéma 3.14. Basé sur le modèle BG non linéaire du processus, les RRAs sont écrites au niveau hydraulique. Considérons le défaut structurel "fuite de débit à l'extrémité de la tuyauterie  $R_1$ " comme une détérioration de la relation constitutive par  $f(0_2)$ , c.à.d:

$$\sum f_i - \sum f_o \neq 0 \quad \sum f_i - \sum f_o + f(0_2) = 0$$

La première équation est obtenue à partir de la source hydraulique modulée de la pompe, la variable de modulation dépend de la source modulée, qui conduit à une RRA. Ceci est matérialisé par la boucle causale  $MSf - 12 - 11 - 15 - 17 - R_{1H} - 17 - 15 - 14 - MSf$  sur le schéma 5.6.

Pour la pompe :  $MSf = f(R_{1H}(MSf + f(0_2)) + De_{2H} - De_{1H})$  où  $R_{1H}$  est une fonction non linéaire.

En écrivant les relations constitutives pour les jonctions 0 au niveau de la bêche alimentaire et la chaudière respectivement :

$$0_1: De_{1H} = \frac{1}{C_{1H}} \int (\dot{m}_1 - MSf) dt$$

$$0_3: De_{2H} = \frac{1}{C_{2H}} \int (MSf + f(0_2) - R_{2H}(De_{2H} - P_s)) dt \text{ où } R_{2H} \text{ est une fonction non linéaire.}$$

La linéarisation de ces équations nous conduit à :

$$R_{1h} : MSf' = -K(R_{1H}(MSf' + f'(0_2)) + De_{2H} - De_{1H})$$

$$R_{2h} : C_{1H}sDe_{1H} = \dot{m}'_1 - MSf'$$

$$R_{3h} : C_{2H}sDe_{2H} = MSf' + f'(0_2) - \frac{1}{R_{2H}}(De_{2H} - P'_s)$$

où  $K$  est la constante de la pompe obtenue à partir d'une linéarisation autour du point de fonctionnement.  $R_{1H}$  et  $R_{2H}$  sont maintenant les résistances hydrauliques simples linéarisées.

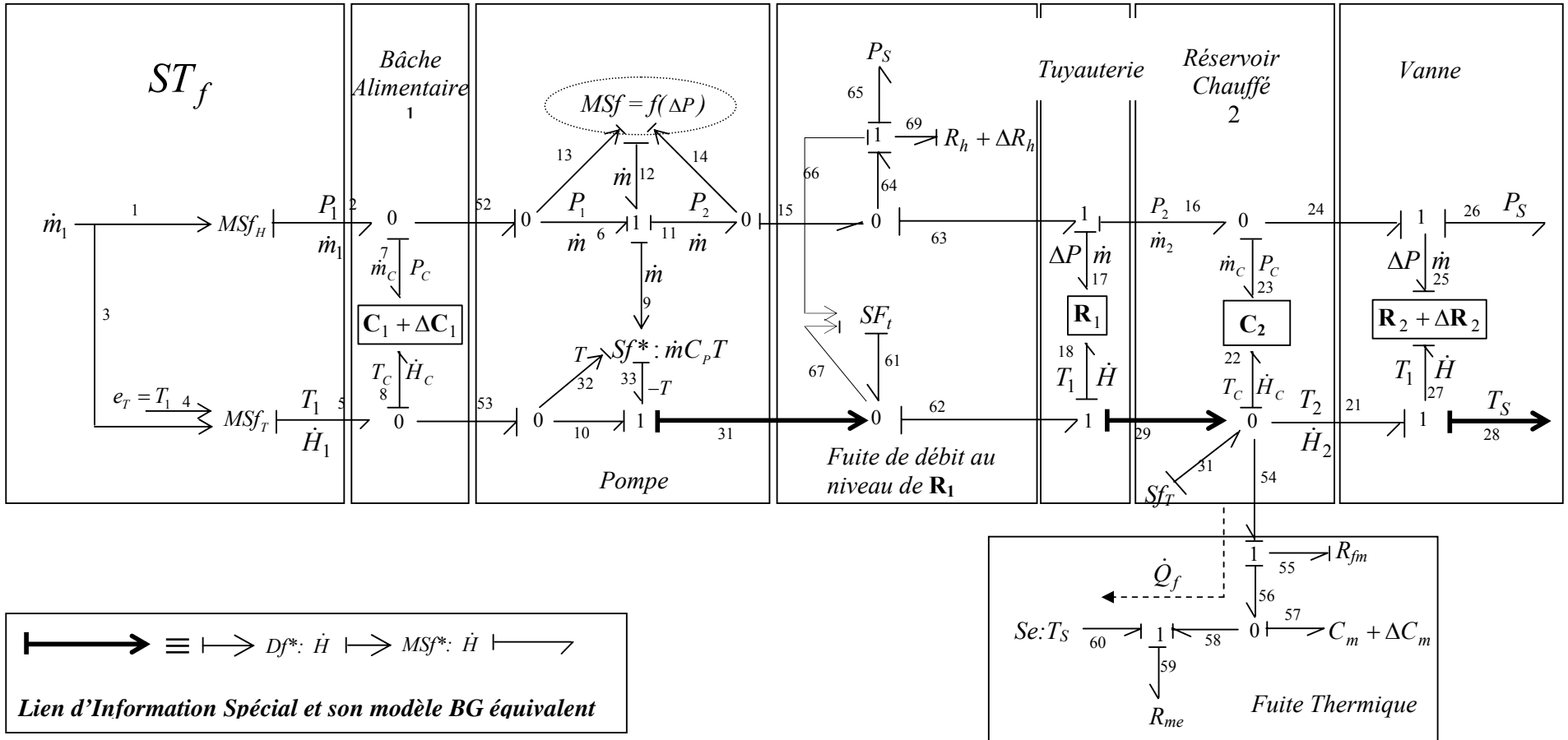


Figure 5.15. Modèle non linéaire éclaté (Causalité Intégrale).

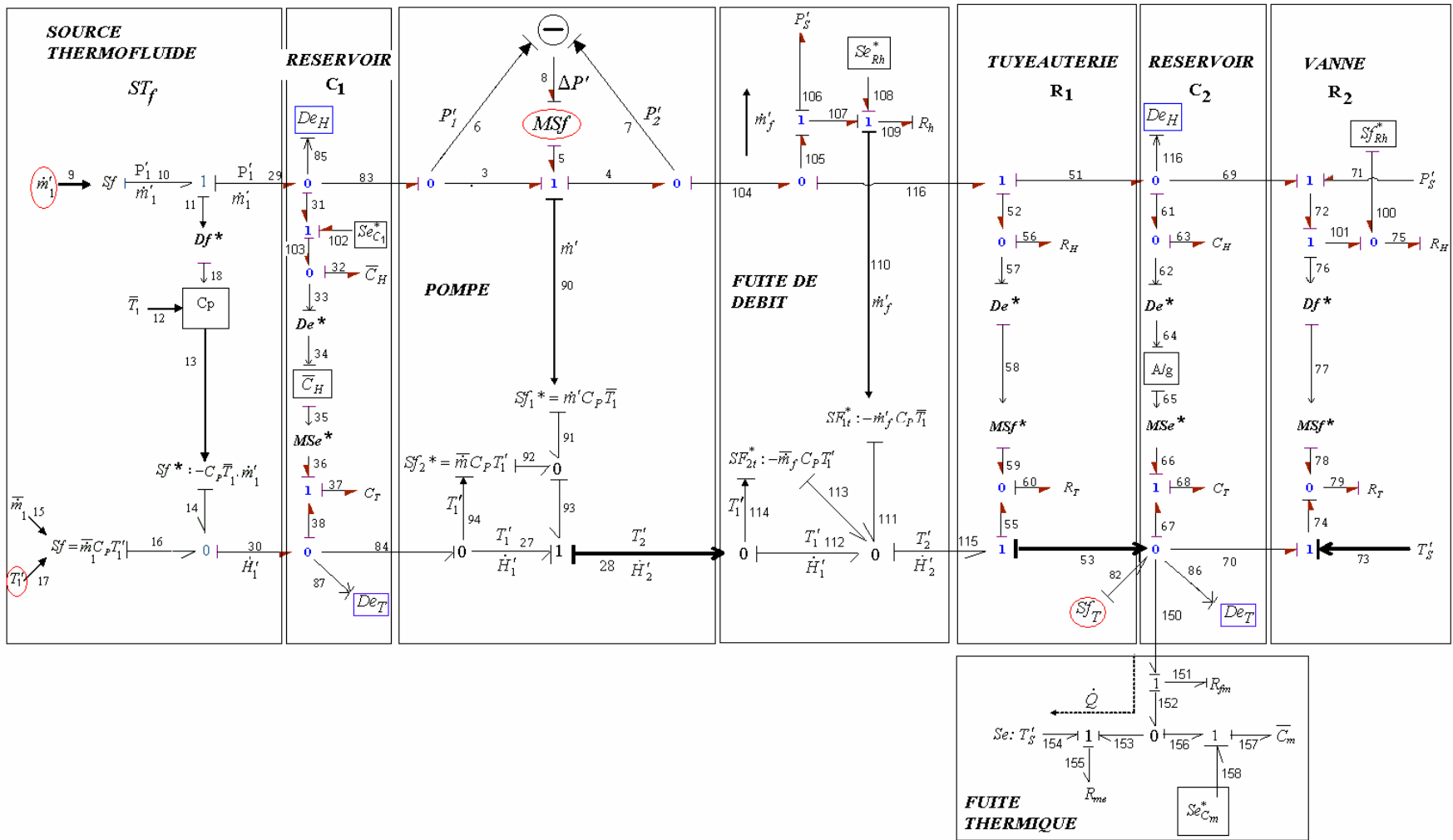


Figure 5.16. Modèle bond graph global linéarisé en mode défaillant.

Soit  $\dot{m}'_f$  représentée par  $f'(0_2)$  la fuite de débit considérée et  $DA$  le défaut lié à l'entartrage (Dirt Accumulation) au niveau de  $C_2$ . Puisque les RRAs sont écrites au niveau hydraulique, ni une perte thermique  $\dot{Q}'_f$  au niveau de  $C_2$  et par conséquent ni un  $DA$  n'apparaît. Le tableau résultant de signature de fautes est donné ci-dessous :

	$C_{1H}$	$C_{1T}$	$C_1$	$R_{2H}$	$R_{2T}$	$R_2$	$\dot{m}'_f$	$\dot{Q}'_f$
$R_{1h}$	0	0	0	0	0	0	1	0
$R_{2h}$	1	0	1	0	0	0	0	0
$R_{3h}$	0	0	0	1	0	1	1	0

**Tableau 5.2.** Tableau de signatures des fautes.

Les signatures de  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $\dot{m}'_f$  et  $\dot{Q}'_f$  sont différentes. Cependant, la perte thermique  $\dot{Q}'_f$  (ou  $DA$ ) ne peut pas être détectée. Un détecteur thermique placé au niveau de  $C_2$  assurera la détectabilité de ce défaut et par conséquent  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $\dot{m}'_f$  et  $\dot{Q}'_f$  (ou  $DA$ ) deviennent surveillables, ce qui coïncide avec les résultats obtenus par l'approche proposée.

### 5.2.7. La platitude pour la surveillance des actionneurs basée sur une approche bond graph

Cette section montre comment la platitude est introduite pour la surveillabilité des actionneurs en utilisant les bond graphs par une application sur la partie du GV considérée précédemment.

#### 5.2.7.1. Surveillabilité des actionneurs par approche bond graph

Considérons la surveillabilité des actionneurs de la figure 5.6. Quatre cas sont traités selon que la source de flux par convection  $\dot{H}_1(\dot{m}_1 C_p T_1)$  et la source de flux  $MSf$  modélisant la pompe sont considérées comme des variables dépendantes ou indépendantes ( $T_1$  est un paramètre ou un vrai actionneur (source de contrôle),  $MSf$  est ou n'est pas une source de contrôle) *El Osta et al. (2005f)*. Comme illustration de la méthodologie développée, les deux cas suivants sont considérés:

- **Cas 1** ( $MSf$  est une source de contrôle et  $T_1$  un paramètre)

Ce cas est considéré si la température à l'entrée est constante. Alors que les vrais actionneurs sont dans ce cas  $MSf_H : \dot{m}_1$ ,  $MSf$  (modélisant la pompe) et la source de flux thermique par conduction  $Sf_T : \dot{Q}$ , les sorties plates hydrauliques sont :

$$y_1 = x_{1H} = m_{1C} \text{ et } y_2 = x_{2H} = m_{2C}$$

Basé sur le modèle BG éclaté (découplé) montré par la figure 5.6, ce résultat peut être facilement vérifié en utilisant les techniques développées dans *Achir et al. (2003)* pour la détermination des sorties plates à partir d'un modèle bond graph. Selon le théorème 14, si le sous modèle hydraulique est plat alors le modèle global l'est et les sorties plates thermiques sont celles placées au niveau des réservoirs chauffés. On peut alors écrire :

$$y_3 = x_{2T} = H_{2C}$$

Les capteurs correspondants  $De_1$ ,  $De_2$  et  $De_3$  permettent la mesure de la pression (associée à la masse stockée dans les réservoirs  $C_1$  et  $C_2$ ) et de la température (associée à l'enthalpie spécifique  $h$ ) du réservoir  $C_2$ . Basée sur le théorème 12, les vrais actionneurs  $MSf_H : \dot{m}_1$ ,  $MSf$  et  $Sf_T : \dot{Q}$  sont surveillables car on dispose de trois capteurs placés sur les sorties plates.

- **Cas 2** ( $MSf$  n'est pas une source de contrôle et  $\dot{H}_1$  est un actionneur ( $T_1$  est une variable indépendante))

Dans ce cas, les vrais actionneurs sont  $MSf_H : \dot{m}_1$ ,  $MSf_T : \dot{H}_1$  et  $Sf_T : \dot{Q}$ . Basé sur le modèle bond graph montré par la figure 5.6, on peut trouver une sortie plate au niveau hydraulique  $y_1 = x_{2H} = m_{2C}$ . Comme la platitude est vérifiée au niveau hydraulique, le modèle global est par conséquent plat et les sorties plates thermiques associées aux réservoirs chauffés sont :

$$y_2 = x_{1T} = H_{1C} \text{ et } y_3 = x_{2T} = H_{2C}$$

Alors qu'un seul capteur hydraulique est utilisé dans ce cas, une nouvelle sortie thermique plate a été introduite (le réservoir  $C_1$  est actionné thermiquement). En plaçant des capteurs sur les sorties plates, tous les actionneurs seront surveillables.

Un tableau récapitulatif (tableau 5.3) montre les quatre cas avec les actionneurs et les sorties plates correspondantes.

	Vrais actionneurs	Sorties plates
<b>Cas 1</b>	$MSf_H : \dot{m}_1$ , $MSf$ et $Sf_T : \dot{Q}$	$y_1 = x_{1H} = m_{1C}$ , $y_2 = x_{2H} = m_{2C}$ et $y_3 = x_{2T} = H_{2C}$
<b>Cas 2</b>	$MSf_H : \dot{m}_1$ , $MSf_T : \dot{H}_1$ et $Sf_T : \dot{Q}$	$y_1 = x_{2H} = m_{2C}$ , $y_2 = x_{1T} = H_{1C}$ et $y_3 = x_{2T} = H_{2C}$
<b>Cas 3</b>	$MSf_H : \dot{m}_1$ et $Sf_T : \dot{Q}$	$y_1 = x_{2H} = m_{2C}$ et $y_2 = x_{2T} = H_{2C}$
<b>Cas 4</b>	$MSf_H : \dot{m}_1$ , $MSf$ , $MSf_T : \dot{H}_1$ et $Sf_T : \dot{Q}$	$y_1 = x_{1H} = m_{1C}$ , $y_2 = x_{2H} = m_{2C}$ , $y_3 = x_{1T} = H_{1C}$ et $y_4 = x_{2T} = H_{2C}$

**Tableau 5.3.** Tableau Récapitulatif: Vrais actionneurs / Sorties plates.

### 5.2.7.2. Vérification des résultats par la génération des RRAs

Cette section représente une vérification d'abord de l'identification des sorties plates et en second lieu de la surveillabilité des actionneurs. Pour chacun des cas 1 et 2, les sorties plates sont identifiées à partir des équations d'état déduites du modèle bond graph. La platitude permet d'écrire les variables d'entrée en termes de sorties plates et un certain nombre de leurs dérivés. Comme les sorties plates sont mesurées, ces équations deviennent les RRAs utiles pour l'étude de la surveillabilité. Basé sur les RRAs obtenues, la surveillabilité des actionneurs est vérifiée.

Les équations (5.6), (5.7), (5.8) et (5.9) représentent les équations d'état non linéaires.  $MSf$  et  $\dot{H}_1$  sont remplacées respectivement par  $f(x_{1H}, x_{2H})$  et  $\dot{m}_1 C_p T_1$  si les actionneurs ne sont pas réels.

- **Cas 1**

Les sorties plates hydrauliques sont  $y_1 = x_{1H}$  et  $y_2 = x_{2H}$ . L'équation (5.7) nous permet d'écrire :

$$MSf = \dot{y}_2 + K_2 \sqrt{\frac{g \cdot y_2}{A_2} - P_s} \quad (5.10)$$

A partir des équations (5.6) et (5.10) :

$$\dot{m}_1 = \dot{y}_1 + \dot{y}_2 + K_2 \sqrt{\frac{g \cdot y_2}{A_2} - P_s} = F(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2) \quad (5.11)$$

La platitude est vérifiée au niveau hydraulique. La sortie plate thermique est  $y_3 = x_{2T} = H_{2C}$ . En effet, comme l'accumulateur  $C_1$  n'est pas chauffé on peut écrire :

$$\dot{H}_1 = \dot{m}_1 C_p T_1$$

avec  $T_1 = T_{1C} = \frac{x_{1T}}{x_{1H} \cdot C_p}$

$$x_{1T} = x_{1H} \cdot \frac{\dot{H}_1}{\dot{m}_1} = \frac{y_1}{F(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2)} \cdot \dot{H}_1 \quad (5.12)$$

En utilisant l'équation ( $x_{2T} = x_{2H} C_p T_{2C}$ ), le vecteur d'état thermique peut être obtenu en calculant la température de chaque réservoir :

$$T_{2C} = y_3 \Rightarrow x_{2T} = y_2 C_p y_3 \quad (5.13)$$

En utilisant les équations (5.10), (5.12) et (5.13), on peut trouver les variables inconnues de l'équation (5.9) et la RRA est déduite:

$$Sf_T = G(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2, y_3, \dot{y}_3) \quad (5.14)$$

Les RRAs sont données par les équations (5.10), (5.11) et (5.14), la matrice de signature de fautes (tableau 5.4) montre que les signatures booléennes des actionneurs sont différentes ce qui coïncide avec le théorème 1. Par conséquent, tous les actionneurs considérés  $MSf_H : \dot{m}_1$ ,  $MSf$  et  $Sf_T : \dot{Q}$  sont surveillables.

RRAs	$\dot{m}_1$	$MSf$	$Sf_T$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
<b>RRA<sub>1</sub></b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	1	1	0
<b>RRA<sub>2</sub></b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	0	1	0
<b>RRA<sub>3</sub></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	1	1	1

**Tableau 5.4.** Matrice de signatures de fautes.

- **Cas 2**

Dans ce cas on a une sortie plate hydraulique  $y_1 = x_{2H} = m_{2C}$ . Alors que  $MSf$  n'est pas une source de contrôle, elle doit être remplacée par  $f(\frac{g \cdot x_{2H}}{A_2} - \frac{g \cdot x_{1H}}{A_1})$  dans les équations d'état non linéaires; où  $f$  est une fonction inversible modélisant la caractéristique de la pompe à vitesse de rotation uniforme *El Osta et al. (2003b)*. Par conséquent, les équations d'état hydrauliques sont :

$$\dot{x}_{1H} = \dot{m}_1 - f\left(\frac{g \cdot x_{2H}}{A_2} - \frac{g \cdot x_{1H}}{A_1}\right) \quad (5.15)$$

$$\dot{x}_{2H} = f\left(\frac{g \cdot x_{2H}}{A_2} - \frac{g \cdot x_{1H}}{A_1}\right) - K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - P_S} \quad (5.16)$$

Il est facile de vérifier que la sortie plate hydraulique est  $y_1 = x_{2H} = m_{2C}$ . A partir de l'équation (5.16) :

$$\begin{aligned} \frac{g \cdot x_{1H}}{A_1} &= \frac{g \cdot x_{2H}}{A_2} - f^{-1}\left(\dot{x}_{2H} + K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - P_S}\right) \\ \Rightarrow x_{1H} &= H(y_1, \dot{y}_1) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Les équations (5.15) et (5.17) donnent :

$$\Rightarrow \dot{m}_1 = K(y_1, \dot{y}_1, \ddot{y}_1) \quad (5.18)$$

La platitude est vérifiée au niveau hydraulique. On peut vérifier que les sorties plates thermiques sont :  $y_2 = x_{1T} = H_{1C}$  et  $y_3 = x_{2T} = H_{2C}$ .

$\dot{H}_1$  est un actionneur ( $T_1$  est une variable indépendante), on peut écrire à partir de l'équation (5.8) :

$$\dot{H}_1 = \dot{x}_{1T} + MSf \cdot \frac{x_{1T}}{x_{1H}} = \dot{x}_{1T} + f\left(\frac{g \cdot x_{2H}}{A_2} - \frac{g \cdot x_{1H}}{A_1}\right) \cdot \frac{x_{1T}}{x_{1H}} \quad (5.19)$$

$$\dot{H}_1 = L(y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2) \quad (5.20)$$

Equation (5.9) donne :

$$Sf_T = \dot{x}_{2T} - f\left(\frac{g \cdot x_{2H}}{A_2} - \frac{g \cdot x_{1H}}{A_1}\right) \cdot \frac{x_{1T}}{x_{1H}} + K_2 \sqrt{\frac{g x_{2H}}{A_2} - P_s} \cdot \frac{x_{2T}}{x_{2H}} \quad (5.21)$$

$$Sf_T = M(y_1, \dot{y}_1, y_2, y_3, \dot{y}_3) \quad (5.22)$$

Les RRAs sont données par les équations (5.18), (5.20) et (5.22). Les signatures booléennes des actionneurs sont différentes et par conséquent les actionneurs  $MSf_H : \dot{m}_1$ ,  $MSf_T : \dot{H}_1$  et  $Sf_T : \dot{Q}$  sont surveillables. □

**Remarque 5.2.5.** *Le cas 4 a été traité en se basant sur le modèle BG linéarisé (section 5.2.5.2), les actionneurs ont été surveillés avec uniquement deux capteurs thermiques alors qu'il en faut quatre par une approche non linéaire (la méthode de la platitude). Ce résultat vient du fait que la surveillabilité des actionneurs en se basant sur une approche non linéaire implique leur surveillabilité à partir du modèle linéarisé et que le contraire n'est pas toujours vrai.*

### 5.3. Création et incorporation des capsules sous Symbols 2000

L'outil bond graph permet la linéarisation d'un modèle global **par simple interconnexion des sous modèles Bond graphs linéarisés des composants**. Dans ce but, les éléments constitutifs linéarisés en génie des procédés ont été introduits sous forme de capsules dans le logiciel Symbols-2000.

Mais qu'appelle-t-on capsule ?

Les capsules sont des modèles qu'on a créé pour faciliter la tâche de la modélisation. Deux raisons significatives de la création et l'incorporation de ces capsules :

- a) Un modélisateur peut s'embarquer dans la création d'un modèle ayant des composants qui sont au delà de son expertise. Par exemple, un ingénieur mécanique peut avoir besoin d'un modèle secondaire d'un système électrique. De telles situations sont courantes dans la pratique. Ainsi, si ces composants ont déjà été modélisés par d'autres experts et stockés dans une bibliothèque modèle, ils peuvent facilement être incorporés plus tard pour d'autres applications et par d'autres modélisateurs. Ceci est rendu possible par la création et l'incorporation des capsules. Ces sous-ensembles pré-modélisés (les capsules) ont été installés dans la bibliothèque de capsules de Symbols-2000 « Bond Pad ». Les utilisateurs peuvent s'en servir directement dans leurs modèles ou créer leurs propres capsules selon les besoins.
- b) Un système complexe peut ainsi être modélisé sous forme modulaire en créant des capsules modélisant des sous-systèmes et en les interconnectant pour créer le modèle global du système. Les modèles des grands systèmes sont ainsi plus ordonnés et plus faciles à construire.

Une capsule générique est un groupe de capsules d'un même modèle mais avec des causalités différentes. Une capsule est donc dite générique lorsqu'elle tient compte de toutes les causalités possibles du sous modèle d'un composant. De telles capsules sont désormais prêtes

à être incorporées pour la modélisation et la simulation des systèmes thermofluides. Plus précisément lors de l'implantation d'une capsule générique, c'est la capsule ayant la causalité adéquate (adaptée à la causalité du modèle, c.à.d, imposée par les autres sous modèles du système) qui sera chargée. Les valeurs des paramètres du sous modèle doivent être précisées. Ainsi pour faciliter ce travail, ces paramètres ont été formulés et il ne reste à l'utilisateur qu'à déterminer les valeurs numériques.

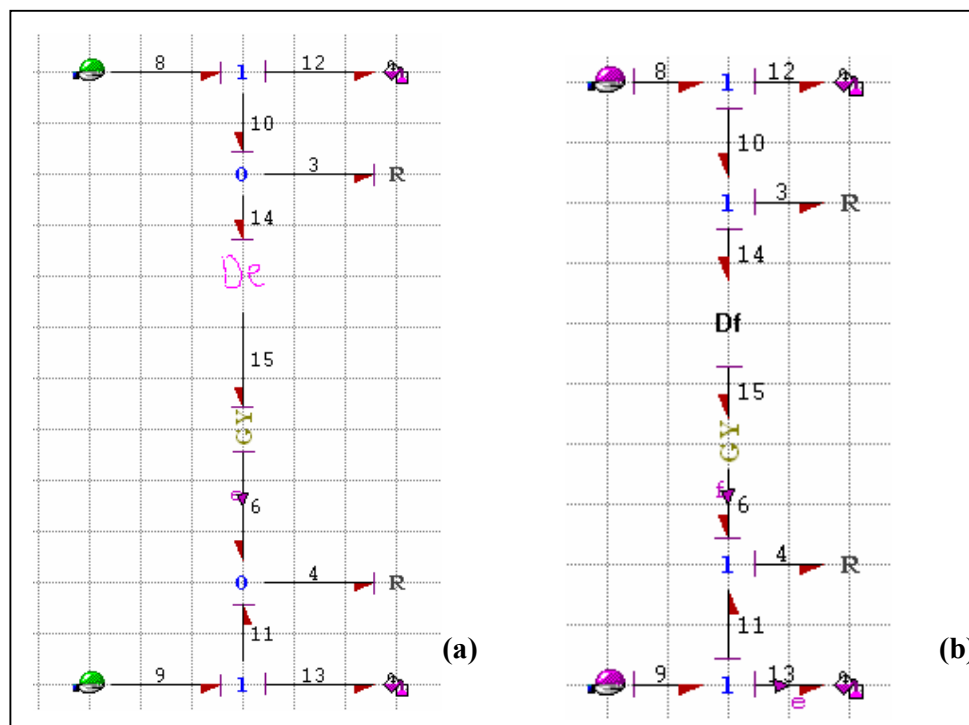
SYMBOLS-2000 permet la création de capsules avec les caractéristiques suivantes :

- Une capsule peut être incorporée dans un modèle avec un nombre quelconque d'occurrences.
- Une capsule peut en contenir d'autres.
- Une capsule doit être complète, c'est à dire les paramètres de ses équations constitutives non linéaires doivent être décrits soit directement par des expressions ou par des appels de fonction de la bibliothèque.
- La numérotation des capsules est faite selon la direction du transfert d'énergie.
- La modélisation acausale est faite par le biais de capsules génériques. Ces capsules représentent les différents choix de causalités possibles. Lors de l'implantation dans le modèle, la capsule adéquate est insérée.

Ensuite, nous présentons à titre illustratif quelques capsules qu'on trouve dans les systèmes thermofluides:

### **Multiport R :**

La capsule d'une conduite thermofluidie en régime sous saturé est représentée par la figure 5.17.



**Figure 5.17.** Capsule du multiport **R** en causalité conductance (a), en causalité résistance (b).

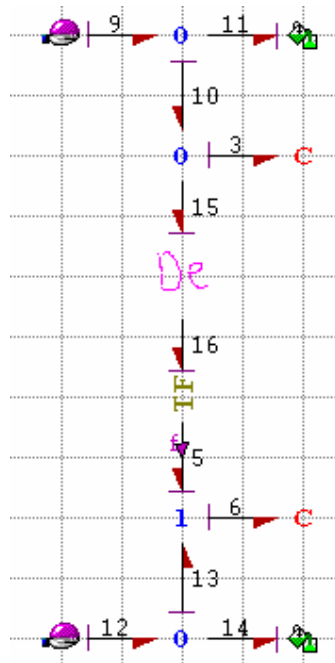
La capsule est connectée au modèle parent par l'intermédiaire des portes collantes. En effet, les liens qui relient une capsule à d'autres objets, éléments ou capsules possèdent ce que l'on appelle des portes collantes, comme c'est le cas des liens 8 et 9 dans notre exemple.

Dans la figure 5.17(a), ces portes collantes sont du type effort dites en anglais Effort Input Glue Port (EIGP). Du point de vue BG, ces portes ne sont ni des sources d'effort, ni des sources de flux. 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. Ici, elles permettent seulement le couplage du modèle au niveau des jonctions 1 (hydraulique et thermique) avec d'autres capsules.

Pour la causalité résistance, les jonctions 0 de la figure 5.17(a) sont remplacées par des jonctions 1 (figure 5.17(b)). Le modèle bond graph en causalité résistance possède des portes collantes de flux (FIGP).

Dans nos capsules, on fait appel à des détecteurs fictifs et à des sources modulées. Les liens d'information ou de signal sont représentés par des liens bond graphs qui ne peuvent être traversés causalement que dans un seul sens. Par conséquent, le retour de la variable d'effort ou de flux est interdit.

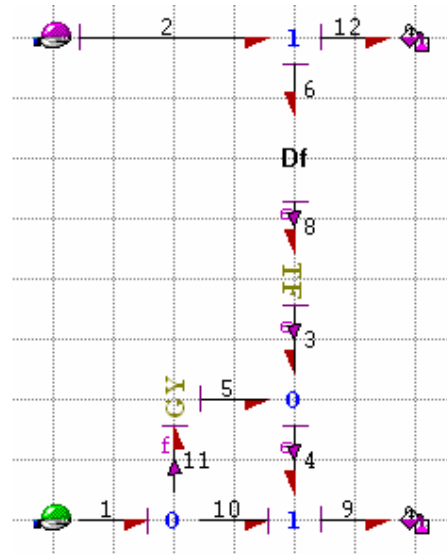
La capsule résultante pour un élément C à 2 ports est montrée dans Symbols par la figure 5.18.



**Figure 5.18.** Capsule d'un multiport C.

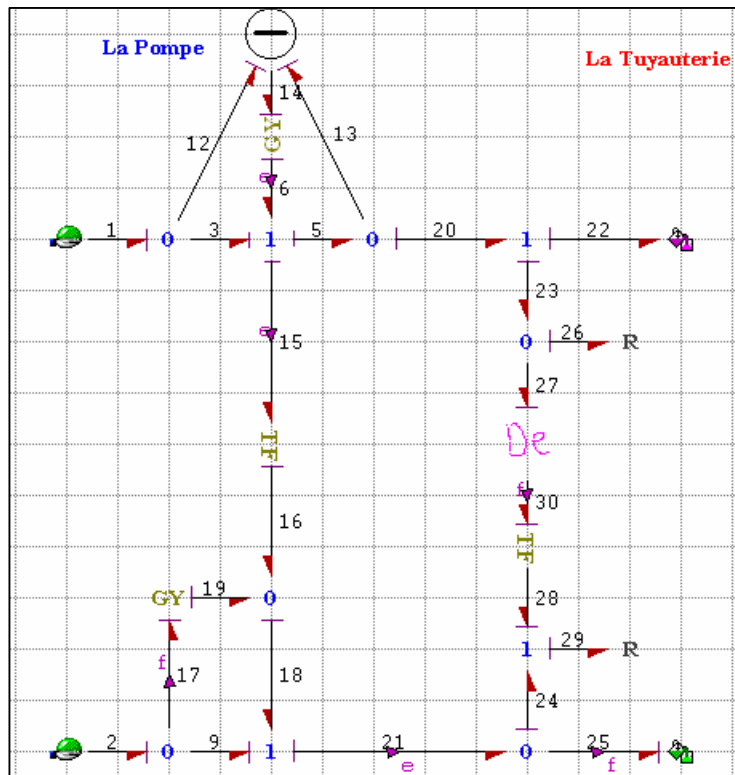
Dans notre application, ce multiport modélise la classe des processus d'accumulation d'énergie. En particulier, il peut s'agir d'un réservoir de stockage ou un accumulateur de vapeur (la chaudière).

On se propose de représenter la source thermofluide comme dans la figure 5.19. Nous allons utiliser cette capsule dans notre application :



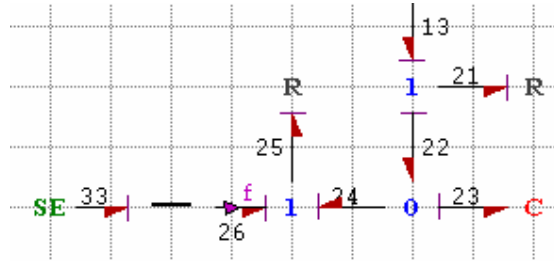
**Figure 5.19.** Capsule d'une source thermofluide.

La pompe a été introduite dans le logiciel Symbols en tant que source de flux. Dans notre cas, la pompe est suivie par une conduite modélisée par un multiport **R** en causalité mixte (causalité conductance au niveau hydraulique et causalité résistance au niveau thermique), figure 5.20.



**Figure 5.20.** Capsule de la pompe suivie d'une conduite en causalité mixte.





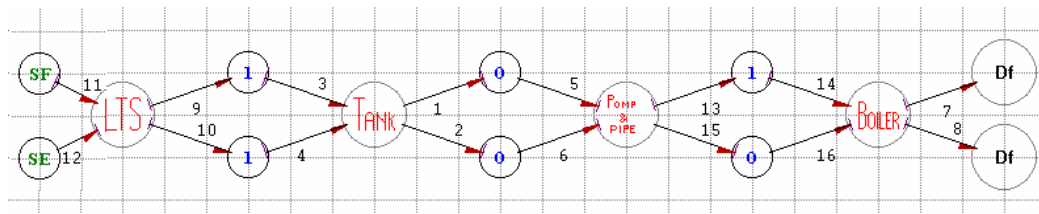
**Figure 5.22.** Liens thermiques pour les phénomènes de conduction.

Des icônes ont été faites pour distinguer les différentes causalités des différentes capsules installées dans la librairie. Ces icônes ont été faites en utilisant « Icon Editor », un outil accessoire dans Symbols.

Chaque capsule créée a été enregistrée dans la librairie des composants après avoir décrit ses différents paramètres.

Après avoir informatisé ces capsules avec toutes les causalités possibles, des capsules génériques ont été créées.

Le BG de notre installation est représentée dans Symbols par la figure 5.23. LTS, TANK, PUMP & PIPE et BOILER sont respectivement des capsules représentatives de la source thermofluide, la bache alimentaire, la pompe et une conduite et finalement la chaudière. Symbols ne reconnaît pas les jonctions vectorielles et par conséquent deux jonctions (hydraulique et thermique) sont nécessaires pour relier deux capsules.



**Figure 5.23.** Modèle BG à capsules du générateur de vapeur.

Des sous modèles BG non linéaires se cachent derrière ces capsules. La linéarisation du modèle globale en utilisant le logiciel Symbols donne le modèle BG de la figure 5.24.

### *Analyse Structurale avec Symbols 2000*

Les propriétés structurelles d'un système peuvent être déterminées à partir du modèle BG sans la dérivation des équations d'état et l'application des outils théoriques de commande. Symbols 2000 analyse non seulement les propriétés structurelles du modèle, mais propose également un placement de sondes (détecteurs) et/ ou d'actionneurs (sources) pour une conception optimale vis à vis du système de commande.

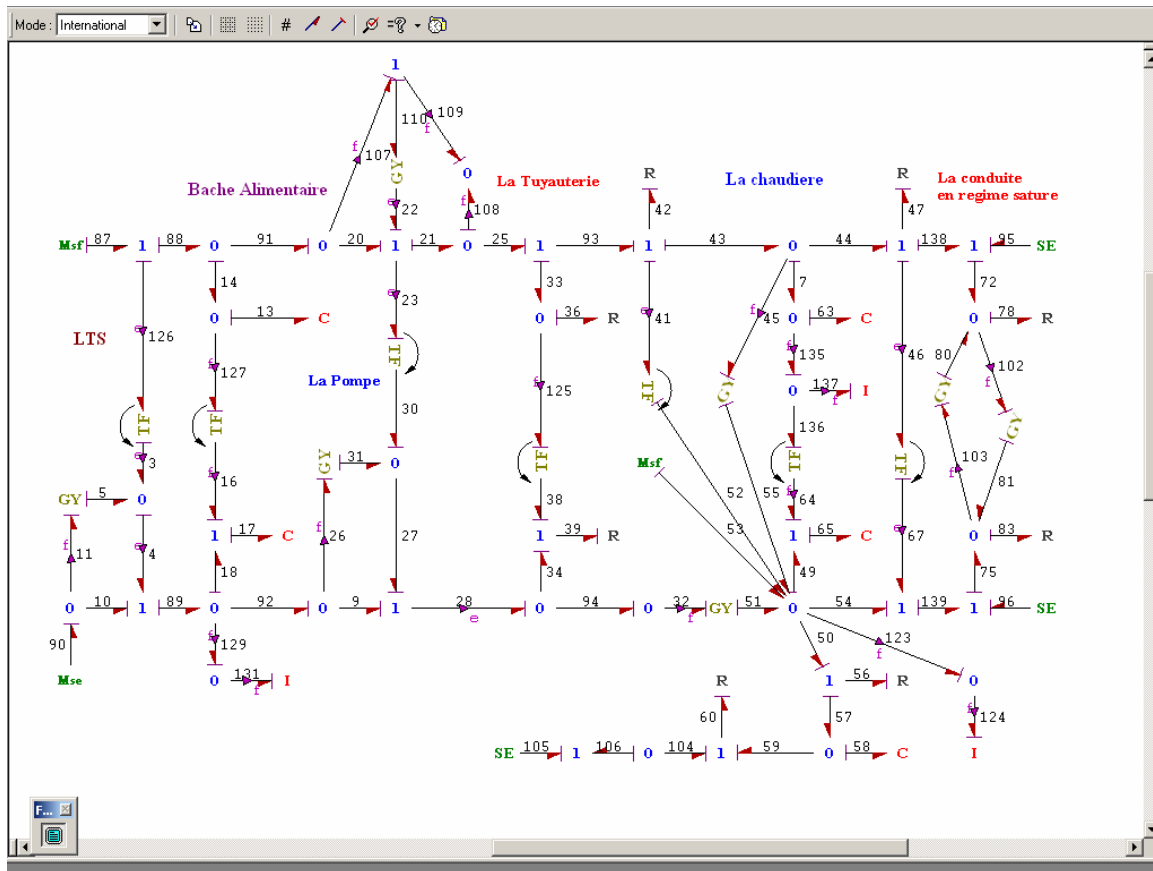


Figure 5.24. *Modèle Bond Graph Linéarisé.*

Pour qu'un système puisse être analysé structurellement par Symbols 2000

- il doit être représenté par un modèle BG pur, c.à.d le modèle BG à analyser ne fait pas apparaître des capsules et des ports externes;
- le modèle peut avoir des sources de commande modulées **MSe** ou **MSf**, toutefois les fonctions de modulation doivent être précisées;
- les observateurs réels dans le modèle sont causalement liés à des éléments *I* avec activation du flux au niveau des jonctions 0 ou à des éléments *C* avec activation d'effort au niveau des jonctions 1; *aucun autre lien activé ne peut être pas être considéré comme un port d'observation*; les éléments *I* et *C* de la classe ci-dessus sont respectivement les éléments **De** (détecteurs d'effort) et **Df** (détecteurs de flux);

Le choix des actionneurs, des sondes et de leurs positionnements joue un rôle principal dans la conception d'un système de commande. Souvent la configuration peut mener à un modèle non commandable ou non observable et le système doit être re-modélisé. Cette tâche de modélisation est évitée avec l'approche BG car le modèle BG ne dépend pas du placement d'actionneurs et de capteurs. De plus, ces stratégies de commande peuvent être facilement vérifiées sur le modèle BG représentant le système avec ses actionneurs et ses observateurs. Les propriétés structurelles, mises en évidence, dépendent seulement sur la structure du modèle (structure de jonction) et sur les éléments qui le composent mais pas sur les valeurs numériques des paramètres.

Pour analyser les propriétés structurelles nous pouvons considérer deux cas :

- a) la pompe est considérée comme une source de commande
- b) la pompe n'est pas considérée comme une source de commande ;

Le rang BG du système est de 4 dans le premier cas et de 5 dans le deuxième cas. Considérons à titre d'exemple le deuxième cas, Symbols 2000 donne les résultats suivants:

#### Essai de Mode

- l'ordre du système est : **5**
- le rang Bond Graph du système est : **5**
- il n'y a aucun mode structurellement nul dans le système

#### Essai de Commandabilité

- le nombre des sources de commande dans le système est : **3**
- tous les états sont liés par un chemin causal à au moins une source de commande
- le système est structurellement commandable

#### Essai de Observabilité

- le nombre des détecteurs dans le système est : **3**
- tous les états sont liés par un chemin causal à au moins un détecteur
- le système est structurellement observable

Les résultats obtenus coïncident avec ceux trouvés à la section 5.2.4.

Les équations constitutives données par Symbols sont :

```

ID1=1/(1+R83*Ktf6/Kgy6)
ID2=ID1*R83*Ktf6/R78*(SE95+K63*Q63)+ID1*R83/Kgy7*(SE95+K63*Q63)
e131=-1/Ktf2*K13*Q13+K17*Q17
e137=K63*Q63
e124=-1/Ktf7*K63*Q63+K65*Q65
f13=SF87-SF140
f58=1/R56*(-1/Ktf7*K63*Q63+K65*Q65-K58*Q58)-1/R60*(K58*Q58-SE105)
f17=Ktf1*SF87+1/Kgy1*SE90-Ktf3*SF140-1/Kgy2*(-1/Ktf2*K13*Q13+K17*Q17)
f63=SF140-1/R78*(SE95+K63*Q63)+1/Kgy6*ID2
f65=-1/R56*(-1/Ktf7*K63*Q63+K65*Q65-K58*Q58)+1/Kgy4*(-1/Ktf4*R36*SF140+R39*(Ktf3*SF140+1/Kgy2*(-1/Ktf2*K13*Q13+K17*Q17)))+Ktf8*SF140+SF53-Ktf6*(1/R78*(SE95+K63*Q63)-1/Kgy6*ID2)+1/Kgy5*K63*Q63

```

L'exploitation de ces équations donne les équations d'état linéarisés calculées à la section 5.2.3.3.

## **5.4. Conclusion**

Les techniques développées pour la modélisation des systèmes en génie des procédés sont appliquées dans ce chapitre sur un site pilote de générateur de vapeur. La génération dynamique de modèles non linéaires et linéarisés est présentée dans un premier temps. Ensuite les techniques d'analyse et de surveillance se basant sur le modèle linéarisé ou directement à partir du modèle non linéaire ont été considérées sur le GV.

La procédure de création et d'incorporation des Capsules sous Symbols 2000 a été expliquée.

## Chapitre 6

### ***Conclusions générales et Perspective***

Les travaux présentés dans ce mémoire représentent une contribution de l'outil bond graph pour l'analyse des conditions de surveillabilité des modèles décrivant la dynamique des systèmes présents en génie des procédés. Ce type de procédé présent dans l'industrie à risque (chimique, nucléaire, ..) est caractérisé par le couplage de plusieurs énergies (introduisant des non linéarités), un caractère non stationnaire et la difficulté de connaître les valeurs numériques des paramètres du modèle. Dans le présent travail, nous avons considéré les processus thermofluides mettant en œuvre le domaine hydraulique et le domaine thermique. Les phénomènes de transformation de la matière (chimie) ne sont pas considérés.

En vue de la surveillance ou de la commande de ces systèmes, il est important de déterminer les propriétés structurelles comme la commandabilité, l'observabilité, et la surveillabilité directement du modèle bond graph sans faire un calcul préalable. Pour pouvoir profiter des travaux réalisés au sein du laboratoire LAGIS pour les modèles bond graph linéaires, il a fallu linéariser les modèles autour d'un point d'équilibre et puis appliquer les méthodes développées pour les systèmes linéaires.

La stratégie de diagnostic et la forme sous laquelle la connaissance est disponible conditionnent les méthodes utilisées pour concevoir les algorithmes de surveillance. Selon le type de la connaissance, le critère de classification des méthodes de surveillance distingue entre deux types d'approches : les méthodes avec ou sans modèle. Notre contribution concerne les méthodes à base de modèle pour la surveillance des processus thermofluides en utilisant un outil unique le **bond graph**. Celui-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).

L'outil bond graph, par ses propriétés structurelles et causales d'une part et par son caractère multidisciplinaire pour la réalisation de modèles d'une manière générique d'autre part, est donc introduit en génie des procédés pour l'analyse et la surveillance des processus.

Deux types de modèles ont été analysés : linéaires et non linéaires.

Dans le cadre de la modélisation, nous avons commencé par définir et classer les différents composants pouvant constituer un système thermofluide. Cette approche nous

a tout naturellement conduit à définir le système global comme un ensemble de sous-systèmes dont les modèles bond graphs, plus simple à réaliser, ont été étudiés séparément. Une démarche systématique grâce à un choix judicieux des variables de puissance (pseudo bond graph) et une modélisation modulaire a permis de modéliser des systèmes complexes (comme la chaudière avec ses différentes configurations et la pompe).

Au niveau analyse, afin d'appliquer les propriétés structurelles déduites du bond graph **linéaire** (commandabilité, observabilité, surveillabilité), nous avons étendu les méthodes de linéarisation des bond graph monoénergie aux bond graph multiport couplés. Il a été montré que le triplet  $(A, B, C)$  du modèle linéarisé tangent obtenu par une approche classique est équivalent à celui obtenu en linéarisant les composants du bond graph non linéaire. Nous avons alors exploité cette propriété pour la linéarisation des modèles complexes (au sens du couplage des deux phénomènes hydraulique et thermique) des processus thermofluides à partir uniquement des bond graphs linéarisés de chaque composant. Le modèle global linéarisé est alors obtenu en connectant chaque composant permettant d'appliquer les propriétés structurelles du bond graph linéaire. En effet, les propriétés structurelles et causales développées pour les vrais bond graphs restent également valides pour les pseudos bond graphs.

L'analyse des modèles bond graphs linéarisés permet de déterminer la surveillabilité des fautes additives (actionneurs et capteurs) ainsi que la surveillabilité des fautes multiplicatives (composants physiques).

- Pour déterminer la surveillabilité des actionneurs d'un processus thermofluide linéarisé, on doit littéralement obtenir les équations d'état linéarisées de tout le système, générer les RRAs puis le tableau des signatures de fautes et enfin analyser la surveillabilité des actionneurs. L'application des techniques développées aux bond graphs à énergies couplées permet de déduire la surveillabilité des actionneurs directement du bond graph global sans avoir à générer les RRAs. De plus le bond graph par sa structure graphique permet de définir le placement de capteurs afin de rendre l'actionneur surveillable.
- La surveillabilité des fautes physiques (fuite, bouchage,...) ou composants demande littéralement le même travail que pour les actionneurs, elle est donc basée sur une génération complexe des RRAs. L'analyse de la surveillabilité des composants est ensuite déduite à partir du tableau des signatures de fautes. En utilisant l'outil BG, la diagnosabilité des composants a été traitée quantitativement et d'une manière directe (sans besoin de calcul). La technique proposée se base sur une linéarisation des modèles BG de manière à fournir une meilleure visualisation de l'effet des changements de paramètres et ceci en les visualisant par des sources fictives où la diagnosabilité peut être analysée en appliquant les méthodes classiques de surveillance pour les actionneurs.

Ces études ont été appliquées au site de génération de vapeur pilote que le LAGIS 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 nos méthodes, ce qui les prête bien à une informatisation.

En se basant directement sur les bond graphs multiénergies **non linéaires**, l'étude de la surveillance en génie des procédés fournit quelques résultats originaux : la propriété

d'isolabilité par sous ensemble de composants est développée. Pour augmenter le pouvoir distinctif et associer ainsi une faute à un seul composant, nous avons ensuite développé une méthode générique qui évite la génération d'indicateurs de défauts (difficile car le processus à surveiller est un modèle non linéaire complexe combinant plusieurs énergies). Basée sur la topologie de la platitude, cette technique peut être facilement intégrée pour la surveillance des actionneurs dans n'importe quel processus plat. Ainsi pour les systèmes plats, l'étude de la surveillabilité des actionneurs devient une question de trouver les sorties plates. Plus particulièrement, ces méthodes se sont ensuite attaquées à la mise en oeuvre de la surveillabilité des actionneurs au sein des systèmes rencontrés en génie des procédés, c'est-à-dire prenant en compte les phénomènes de conduction et convection thermiques, ainsi que les phénomènes d'écoulement de matière. Elles ont été appliquées à un système thermofluide de trois réservoirs, des résultats équivalents à ceux obtenus par les méthodes classiques ont été trouvés.

Ainsi, en génie des procédés, la localisation d'une défaillance au sein du système est circonscrite au composant incriminé, ce qui limite grandement les manipulations de maintenance.

Pour la modélisation en génie des procédés par la méthodologie bond graph, les principales contributions sont les suivantes :

- Classification des processus thermofluides.
- Le choix et l'analyse systématique des variables de puissance pour la modélisation et la simulation des processus en génie des procédés.
- Modélisation et représentation des systèmes thermodynamiques.
- La linéarisation des bond graphs couplés.

Les outils de modélisation développés sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes d'analyse et de surveillance. La contribution dans ce domaine concerne :

- Utilisation d'un seul outil pour la modélisation, l'analyse et la surveillance.
- Pour les processus en génie des procédés, l'étude des propriétés structurelles des modèles bond graph couplés linéarisés en fonction du régime considéré (saturé, sous saturé).
- La surveillabilité des fautes comprenant les fautes additives (actionneurs et capteurs) et les fautes multiplicatives (fautes composants) à partir des modèles bond graph couplés linéarisés sans la détermination préalable des RRAs.
- Introduction de la platitude pour le problème de la surveillabilité des actionneurs.

Ce travail de recherche a permis d'ouvrir les perspectives suivantes :

#### Dans le domaine applicatif

Les résultats de cette thèse peuvent être appliqués à des processus réels (générateur de vapeur, processus de reformage, centrale nucléaire et thermique, ...). Dans ce cadre, une boîte à outil a été développée dans le logiciel SYMBOLS-2000 pour l'implémentation de ces procédures. Les composants thermofluides ont été introduits sous forme de capsules génériques afin de générer le modèle dynamique global linéaire. Ces capsules sont désormais prêtes à être

incorporées, le nombre de fois qu'on le souhaite lors de la simulation des systèmes thermofluides.

Ce caractère de réutilisabilité des modèles linéarisés développé dans ce travail complète une recherche déjà finalisée dans le cadre du projet CHEM et sera poursuivi pour l'étendre à des processus chimiques. A cet effet, un projet sur la modélisation et le diagnostic des moteurs à Hydrogène soutenu par l'Agence National de la Recherche ANR servira de plateforme expérimentale.

### Dans le domaine théorique

- Analyser le degré de commandabilité et observabilité dans le cas de présence de plusieurs chemin causaux afin d'optimiser le placement des capteurs en fonction du « degré de surveillabilité ».
- Considération des incertitudes paramétriques la modélisation bond graph en caractérisant chaque élément bond graph  $(R, C, I, \dots)$  par sa valeur nominale  $(\overline{R}, \overline{C}, \overline{I}, \dots)$  et l'incertitude  $(\Delta R, \Delta C, \Delta I, \dots)$ . 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 développé dans la cadre de la thèse de Casimir *Casimir (2001)* (thèse encadrée par le prof. G. Dauphin-Tanguy).
- Extension des résultats obtenus pour la surveillabilité des actionneurs par la théorie de la platitude pour la surveillance des composants physiques ainsi que pour le système d'instrumentation.
- Identification des sorties plates directement à partir du modèle BG dans le but d'être utilisées par le système de diagnostic. Dans le cadre de la thèse de Ali Achir *Achir et al. (2003)*, un nouveau point de vue des BGs en termes d'algèbre différentielle, des modules et des champs différentiels a été présenté pour l'identification des sorties plates dans les systèmes non linéaires. Les BGs semblent bien adaptés pour l'étude de la platitude, les prochains travaux devraient appliquer les techniques d'identification des sorties plates développées, sur les systèmes multiénergies couplés modélisés par BGs afin de les surveiller par nos méthodes.
- Etude de la robustesse des systèmes de surveillance (voir annexe D): des indices de surveillabilité ont été définis dans le but d'établir une architecture d'instrumentation assurant un niveau prédéfini de sûreté de fonctionnement *El Osta et al. (2005e)*. Facilement calculés à partir d'une matrice de signatures des fautes, ces indices permettent d'avoir une mesure de l'efficacité d'un système de surveillance en présence d'une non détection d'un défaut ou d'une fausse alarme. L'outil BG conventionnel ne permettant pas une détermination directe de la matrice des signatures des fautes, les bond graphs à 2 traits causaux - Bond Graphs Bicausaux sont ainsi utilisés.
- Les modèles en génie des procédés n'étant pas toujours plats, une autre approche basée sur l'**algèbre différentielle** est actuellement en cours de développement. Elle permet l'étude de la diagnosabilité par calcul direct des degrés de transcendance différentiels à partir du modèle BG *El Osta et al. (2005b)*. Contrairement à la platitude, cette méthode n'exige pas d'avoir autant de capteurs que d'actionneurs. Par contre, elle ne concerne que la classe de systèmes non linéaires où les entrées et leurs dérivées n'apparaissent que sous forme polynomiale. En perspective, les systèmes thermofluides seront transformés pour une mise de leurs équations d'état sous forme polynomiale afin de pouvoir appliquer les techniques de surveillance.

## **ANNEXE A**

### **LES BOND GRAPHS, PRINCIPES, CONCEPTS ET LANGAGE**

#### **A.1. Niveaux de modélisation**

Les méthodes de modélisation pour la représentation des systèmes sont nombreuses. Il n'existe pas dans l'absolu de méthodes meilleures que d'autres. Le concepteur cherche en pratique la méthode la mieux adaptée au problème posé. Toutefois, chaque méthode de modélisation peut être classée selon son niveau de langage. On distingue quatre niveaux de modélisation : technologique, physique, mathématique, et algorithmique *Lorenz (1996)*. Ces quatre niveaux peuvent être représentées par le bond graph.

Le niveau technologique de la modélisation est présenté en bond graph par le bond graph à mots (Word Bond Graph en anglais). Ce niveau de modélisation consiste à construire l'architecture du système par l'assemblage de différents sous-systèmes qui échangent de la puissance. L'interconnexion des composants est assurée par un couple de variables effort-flux. Les éléments de base sont des processus technologiques simples (échangeur de chaleur, bouilleur, conduite...). Ce type de modélisation, facile à mettre en oeuvre, conduit à un modèle fonctionnel *Feliot (1997)*, en remplaçant les blocs "fonction" par des blocs "organe technologique remplissant cette fonction". L'adéquation du modèle avec la réalité n'est pas vérifiée et les phénomènes physiques ne sont pas pris en considération. Le modèle est de type "boite noire". Il est à noter que cette représentation est "physique" déjà à ce niveau car à l'entrée de chaque composant nous mettons en évidence les variables de liaison ainsi que leur direction (par le sens des demi-flèches), ainsi que les variables d'information.

Le niveau physique consiste à analyser les phénomènes physiques qui seront pris en considération dans la modélisation (inertie, frottement, compressibilité,...) et reproduire l'architecture du système graphiquement, avec un langage unique pour tous les domaines physiques où apparaissent les échanges de puissance entre éléments. A ce niveau, la modélisation s'appuie sur une description énergétique des phénomènes physiques. On introduit les concepts fondamentaux de la physique: dissipation d'énergie, transformation, accumulation, sources, etc.. Les variables manipulées ont une sémantique physique forte : énergie, puissance, effort, flux, etc... C'est à ce niveau qu'intervient la prise en compte des bilans d'énergies, de matières, de quantités de mouvements...

Le niveau mathématique en bond graph consiste à écrire les lois constitutives des composants ou des phénomènes, en tenant compte des causalités affectées. Les éléments de base de ce

niveau sont des opérateurs mathématiques: intégrateurs, dérivateurs et les fonctions algébriques. Le modèle mathématique est sous forme d'équations (algébriques, différentielles ou algébro-différentielles) ou de matrice de transfert dans le cas linéaire. Les modèles obtenus sont linéaires ou non linéaires, et la propriété de non-linéarité du modèle peut être identifiée comme liée à la structure et/ou aux composants, ce qui permet d'introduire par exemple une linéarisation partielle. Les équations d'état sont déduites directement en parcourant le bond graph.

Le niveau algorithmique est lié directement au traitement de l'information. Les concepts manipulés sont donc des concepts informatiques. Ce niveau nous indique comment sont calculés les modèles. C'est pourquoi nous considérons que ce niveau se confond presque avec le niveau mathématique. Les notions de causalité (relation de cause et effet) jouent un rôle important à ce niveau et permettent d'orienter la programmation du modèle vers une simulation plus robuste. Tout concepteur sait par exemple qu'il est plus simple de calculer numériquement la valeur de la température connaissant le flux thermique que le contraire : la résolution numérique d'une intégrale est plus robuste que celle d'une dérivée, et insensible aux bruits. Ce niveau nous permet donc de représenter l'algorithme du modèle et la manière dont celui-ci doit être calculé. Ce problème est résolu en bond graph par une assignation systématique de la causalité représentée par un trait perpendiculaire au lien. L'analyse de la structure graphique du modèle bond graph fournit donc une connaissance a priori sur la résolution mathématique du problème *Dauphin Tanguy (2000), Mukherjee & Karmakar (2000)*. L'affectation des causalités n'est pas une procédure naturelle mais souvent imposée par l'ingénieur pour résoudre les problèmes numériques. Il faut toutefois noter qu'en génie des procédés une analyse fonctionnelle permet de déduire une causalité naturelle pour les multiports **C** ou les processus de stockage d'énergie (en causalité intégrale) et une causalité quelconque pour les processus de transformation et de transport d'énergie modélisés en bond graph principalement par des multiports **R** *Ould Bouamama (2001)*.

## A.2. Les transferts de puissance

Un modèle bond graph est une représentation graphique de type réseau du système physique. Cette représentation est fondée sur l'hypothèse de réticulation qui permet une décomposition du système en un ensemble de sous systèmes élémentaires échangeant de la puissance entre eux. Cette puissance est transmise de manière à assurer la conservation de l'énergie, mais aussi sa continuité *Paynter (1961)*. Le transfert de puissance (ou flux d'énergie) entre deux sous-systèmes est représenté par une demi flèche qui correspond au « bond » du bond graph. La puissance instantanée échangée se calcule par le produit d'une variable de flux  $f$  et d'une variable d'effort  $e$  indépendamment du domaine considéré. Le sens de la demi flèche et celui correspondant au sens positif de la puissance et de la variable de flux (figure A.1).

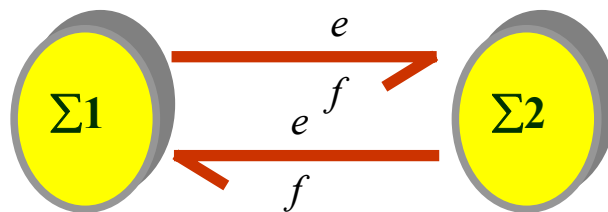


Figure A.1. Représentation des transferts de puissance.

### A.3. Variables mises en jeu

Deux types de variables sont utilisés dans la théorie bond graph indépendamment du domaine de la physique considéré. Le premier type est constitué des variables de puissance. Les variables de puissance associées à chaque lien sont l'effort  $e(t)$  et le flux  $f(t)$ . Le deuxième type concerne les variables d'énergie qui sont le moment généralisé  $p(t)$  pour un élément  $I$  de type inertiel et le déplacement généralisé  $q(t)$  pour un élément  $C$  de type capacitif.

Les variables d'énergie sont liées aux variables de puissance par les relations :

$$p(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau + p(0)$$

$$q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau + q(0)$$

Elles sont également choisies comme variables d'état associées respectivement aux éléments  $I$  et  $C$  qui les font intervenir dans leurs relations caractéristiques. L'interprétation physique de chacune des variables généralisées est donnée par le domaine physique du système modélisé (tableau A.1).

	Variables de Puissance		Variables d'énergie	
	Effort $e$	Flux $f$	Moment $p$	Déplacement $q$
Mécanique transl.	Force, $F$	Vitesse, $v$	Impulsion, $p$	Elongation, $x$
Mécanique rot.	Couple, $\tau$	Vit. Angulaire, $\omega$	Impulsion ang., $\eta$	Angle, $\theta$
Electrique	Tension, $u$	Courant, $i$	Flux magn, $\Phi$	Charge, $q$
Hydraulique	Pression, $P$	Débit vol. $\dot{V}$	Impulsion press.	Volume, $V$
Thermique	Température, $T$	Flux d'entropie, $\dot{S}$	--	Entropie, $S$
Chimique	Potentiel chim., $\mu$	Flux Molaire	--	Masse molaire

Tableau A.1. Tableau récapitulatif des variables bond graphs

### A.4 Eléments BG

Les éléments bond graphs simples se classifient en éléments passifs (au nombre de trois), éléments actifs (au nombre de deux) et éléments de jonction (au nombre de 4). Ces neuf éléments constituent le langage bond graph.

#### A.4.1. Eléments passifs

Les éléments  $R$ ,  $C$ ,  $I$  sont dits éléments passifs car ils transforment la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée sous forme de chaleur ( $R$ ), ou stockée (éléments  $C$  et  $I$ ). La puissance est fournie aux éléments, ce qui impose d'orienter le sens de la demi flèche du lien vers l'élément.

L'élément  $R$  est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort à la variable de flux dans le domaine physique considéré. A titre d'exemples, citons les résistances électriques, les éléments de commutation en électronique, les amortisseurs, les conduites, tout phénomène de frottement mécanique et les réactions chimiques. Il est caractérisé par la loi générique  $\Phi_R(e_R, f_R) = 0$ .

L'élément  $C$  est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort à la variable de déplacement dans le domaine considéré. A titre d'exemples, citons les condensateurs, les ressorts, les réservoirs hydrauliques. Il est caractérisé par la loi générique  $\Phi_C(e_C, q_C) = 0$ .

L'élément  $I$  est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable de flux à la variable de moment dans le domaine physique considéré. A titre d'exemples, citons les bobines, les masses, l'inertie hydraulique et tout phénomène inertiel en mécanique. Il est caractérisé par la loi générique  $\Phi_I(p_I, f_I) = 0$ .

#### A.4.2. Eléments actifs

Les sources  $Se$  et  $Sf$  sont dites éléments actifs car elles contribuent à fournir de la puissance au système. Ainsi, un générateur de tension (supposé idéal), modélisé par  $Se$ :  $E$ , applique une tension  $E$  aux bornes du circuit électrique auquel il est connecté, ce qui entraîne la circulation d'une courant  $i$ . L'orientation de la demi flèche est fixée, elle est représentée sortant de la source.

La variable d'effort (pour  $Se$ ) ou flux (pour  $Sf$ ) fournie par la source est supposée indépendante de la variable complémentaire flux (pour  $Se$ ) ou effort (pour  $Sf$ ) qui dépend des caractéristiques du système et de la variable appliquée.

#### A.4.3. Eléments de jonction

Les éléments de jonction, notés 1, 0,  $TF$  et  $GY$  servent à coupler les éléments  $R$ ,  $C$ ,  $I$  et les sources, et composent la structure de jonction correspondant à l'architecture du modèle étudié. Ils sont conservatifs de puissance.

La jonction 0 sert à coupler des éléments soumis au même effort. Les relations qui la caractérisent sont :

- égalité des efforts pour tous les liens ayant une extrémité sur la jonction
- somme algébrique des puissances = 0

La jonction 1 sert à coupler des éléments parcourus par le même flux. Les relations qui la caractérisent sont :

- égalité des flux pour tous les liens ayant une extrémité sur la jonction
- somme algébrique des puissances=0

Ces relations constitutives des jonctions 0 et 1 correspondent à la généralisation à tout domaine physique des lois de *Kirchoff* en électricité (loi des noeuds, loi des mailles).

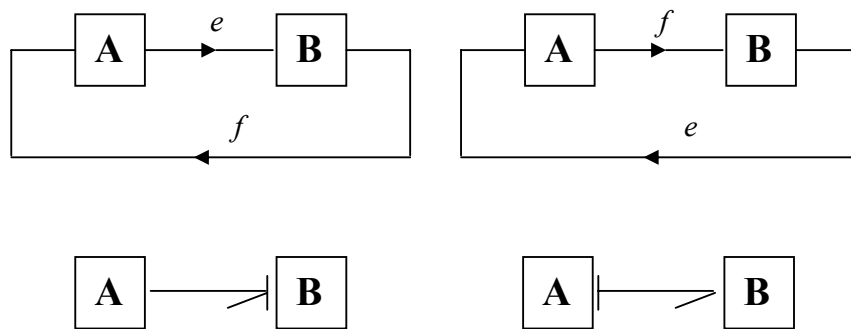
L'élément  $TF$  est un élément 2-port, conservatif de puissance, il intervient dans la modélisation des transformateurs électriques, des leviers, des systèmes d'engrenages, des systèmes de poulies... Il est aussi utilisé pour modéliser les changements de domaines physiques qui se font sans perte de puissance.

L'élément  $GY$  est aussi un élément 2-port, conservatif de puissance, il intervient dans la modélisation des gyroscopes, des capteurs à effet Hall.. Il est aussi utilisé pour modéliser les changements des domaines physiques qui se font sans perte de puissance.

### A.5. Causalité

L'ajout d'un trait perpendiculaire au lien indique la causalité qui exprime la relation de cause à effet entre les variables. Par convention, le trait causal est placé de la manière suivante :

1. Le trait causal est placé *près de l'élément* pour lequel *l'effort* est imposé.
2. Le trait causal est placé *loin de l'élément* pour lequel *le flux* est imposé.



**Figure A.2.** *Equivalence entre causalité sur un bond graph et un schéma-bloc.*

L'affectation de la causalité est non arbitraire, mais soumise à des règles rassemblées dans la procédure SCAP : Procédure Séquentielle d'Affectation de la Causalité *Rosenberg & Karnopp (1983)*. Cette procédure a été élaborée dans l'optique d'affecter la causalité au bond graph en maximisant le nombre d'éléments en causalité intégrale.

Les règles d'affectation de la causalité ainsi que les éléments bond graphs sont données par les tableaux A.2 et A.3. La procédure suivante en détaille les étapes :

1. affecter la causalité obligatoire aux sources et aux éléments R non linéaires et répercuter sur l'environnement en respectant les restrictions de causalité des jonctions;
2. affecter une causalité intégrale préférentielle aux éléments I et C et répercuter sur l'environnement en respectant les restrictions de causalité aux jonctions ;
3. compléter la causalité sur les éléments R linéaires en respectant les restrictions de causalité aux jonctions ;

4. en cas de conflit à une jonction, rechercher l'élément I ou C cause de conflit et lui affecter une causalité dérivée. Boucler sur l'étape 3 ;

Eléments Bond graphs	Symboles	Loi générique	Exemples physiques	Causalités
Eléments actifs (sources)	$Se \xrightarrow{e} f$	$e$ indépendant de $f$	pesanteur, générateur de tension...	$Se \xrightarrow{e} f$ $e$ donné
	$Sf \xrightarrow{f} e$	$f$ indépendant de $e$	Générateur de courant, pompe...	$Sf \xrightarrow{f} e$ $f$ donné
Eléments passifs 1-port	$\xrightarrow{e} R$	$\Phi_R(e, f) = 0$	amortisseur, résistance, restriction hydraulique, frottement...	$\xrightarrow{e} R$ $e = F_R(f)$ ( $e = R \cdot f$ ) $\xrightarrow{f} R$ $f = F_R^{-1}(e)$ ( $f = 1/R \cdot e$ )
	$\xrightarrow{e} C$	$\Phi_C(e, q) = 0$	ressort, condensateur, réservoir, élasticité...	$\xrightarrow{e} C$ $e = F_C(q)$ ( $e = q/C$ ) $\xrightarrow{q} C$ $q = F_C^{-1}(e)$ ( $q = Ce$ )
	$\xrightarrow{e} I$	$\Phi_I(p, f) = 0$	masse, inertie, inductance, bobine...	$\xrightarrow{e} I$ $p = F_I^{-1}(f)$ ( $e = If$ ) $\xrightarrow{f} I$ $f = F_I(p)$ ( $f = p/I$ )

Tableau A.2. Les éléments bond graphs de base et leurs propriétés.

Eléments BGs	Symboles	Loi générique	Exemples physiques	Causalités
Eléments de Jonction	$\xrightarrow{1} 0 \xrightarrow{n}$	$e_1 = \dots = e_n$ $\sum_{i=1}^n a_i f_i = 0$ ( $a_i = \pm 1$ )	connexion série en mécanique connexion parallèle en électrique	$\xrightarrow{1} 0 \xrightarrow{n}$ Un seul trait causal près d'une jonction 0 $e_1 = e_3 = \dots = e_n = e_2$ $f_2 = a_2 \sum_{i=1, i \neq 2}^n a_i f_i$
	$\xrightarrow{1} 1 \xrightarrow{n}$	$f_1 = \dots = f_n$ $\sum_{i=1}^n a_i e_i = 0$ ( $a_i = \pm 1$ )	connexion parallèle en mécanique connexion série en électrique	$\xrightarrow{1} 1 \xrightarrow{n}$ Un seul trait causal loin d'une jonction 1 $f_1 = f_3 = \dots = f_n = f_2$ $e_2 = a_2 \sum_{i=1, i \neq 2}^n a_i e_i$
Conservatifs de puissance	$\xrightarrow{f_1} TF_m \xrightarrow{f_2}$	$e_1 - m e_2 = 0$ $f_2 - m f_1 = 0$	Levier, système d'engrenages ou poulies, réducteur, transformateur électrique...	$\xrightarrow{f_1} TF_m \xrightarrow{f_2}$ $\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$ $\xrightarrow{f_1} TF_m \xrightarrow{f_2}$ $\begin{cases} e_2 = 1/m e_1 \\ f_1 = 1/m f_2 \end{cases}$
	$\xrightarrow{f_1} GY_r \xrightarrow{f_2}$	$e_1 - r e_2 = 0$ $f_2 - r e_1 = 0$	moteur à courant continu, capteur à effet hall..	$\xrightarrow{f_1} GY_r \xrightarrow{f_2}$ $\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \end{cases}$ $\xrightarrow{f_1} GY_r \xrightarrow{f_2}$ $\begin{cases} f_2 = 1/r e_1 \\ f_1 = 1/r e_2 \end{cases}$

Tableau A.3. Les éléments de jonction bond graphs et affectation de leurs causalité.

## A.6. Notions de chemin causal et de boucle causale

**Définition A1.** Un chemin causal dans un bond graph est une alternance de liens de puissance et de noeuds (les jonctions 0, 1, TF, GY et les éléments R, I, C) telle que : une

*causalité complète et correcte est affectée à l'ensemble de la séquence et deux liens connectés en un même noeud ont des affectations causales opposées.*

**Définition A2.** *Une boucle causale est un chemin causal fermé entre deux éléments R, C, I partant de la sortie d'un port et revenant à l'entrée de ce port sans parcourir le même lien en suivant la même variable plus d'une fois.*

## ANNEXE B

### LES SYSTÈMES EN GENIE DES PROCÉDES

#### B.1. Equations d'état d'un BG thermofluide linéarisé

Matrice  $A$

Dans le cas sous saturé la matrice est donnée par l'expression :

$$A = \begin{pmatrix} A_H & 0 \\ A_{HT} & A_T \end{pmatrix}$$

**Propriété B1.** (Détermination de  $A_H$ ) Soit  $n$  le nombre d'états hydrauliques, la sous-matrice  $A_H = (a_{ij}^H)$  avec  $(i, j = 1 \dots n)$  qui correspond aux relations causales entre les éléments dynamiques hydrauliques est donnée par :

$$a_{ij}^H = \sum_k \tilde{G}_i^j(x_j^H \cdot x_i^H)_k \tilde{g}(x_j^H)$$

avec  $\tilde{G}_i^j(x_j^H \cdot x_i^H)_k$  le terme constant (sans l'opérateur de Laplace) du gain du  $k^{\text{ème}}$  chemin causal indirect passant par une résistance hydraulique  $R_H$  (du multiport  $\mathbf{R}$  linéarisé) allant de la capacité hydraulique  $C_H$  du multiport  $\mathbf{C}$  linéarisé associé à  $x_i^H$  et aboutissant au même élément dynamique  $C_H$ .

$\tilde{G}_i^j(x_j^H \cdot x_i^H)_k$  avec  $i \neq j$  le terme constant (sans l'opérateur de Laplace) du gain du  $k^{\text{ème}}$  chemin causal direct ou indirect (passant par une résistance hydraulique  $R_H$  du multiport  $\mathbf{R}$  linéarisé) allant de la capacité hydraulique  $C_H$  du multiport  $\mathbf{C}$  linéarisé associé à  $x_j^H$  à l'élément dynamique  $C_H$  associé à  $x_i^H$ .

$\tilde{g}(x_j^H)$  le terme constant de l'élément bond graph associé à  $x_j^H$  ( $\tilde{g}(x_j^H) = \frac{1}{C_{Hj}}$ ).

**Propriété B2.** (Détermination de  $A_T$ ) Soit  $n + r$  le nombre d'états thermiques, la sous-matrice  $A_T = (a_{ij}^T)$  avec  $(i, j = n + 1 \dots 2n + r)$  qui correspond aux relations causales entre les éléments dynamiques thermiques est donnée par :

$$a_{ij}^T = \sum_k \tilde{G}_i^j(x_j^T \cdot x_i^T)_k \tilde{g}(x_j^T)$$

avec  $\tilde{G}_i^j(x_j^T \cdot x_i^T)_k$  calculée de la même façon que pour le sous système hydraulique et  $\tilde{g}(x_j^T) = \frac{1}{C_{Tj}}$ .

**Propriété B3.** (Détermination de  $A_{HT}$ ) Soit  $n$  le nombre d'états hydrauliques et  $n + r$  le nombre d'états thermiques, la sous-matrice  $A_{HT} = (a_{ij}^{HT})$  avec ( $i = n + 1 \dots n + r, j = 1 \dots n$ ) qui correspond aux relations causales entre les éléments dynamiques hydrauliques et les éléments dynamiques thermiques est donnée par :

$$a_{ij}^{HT} = \sum_k \tilde{G}_i^j(x_j^H \cdot x_i^T)_k \tilde{g}(x_j^H)$$

avec  $\tilde{G}_i^j(x_j^H \cdot x_i^T)_k$  avec  $i > j$  le terme constant (sans l'opérateur de Laplace) du gain du  $k^{\text{ème}}$  chemin causal direct ou indirect (passant par une résistance hydraulique  $R_H$  ou une résistance thermique  $R_T$  du multiport  $\mathbf{R}$  linéarisé) allant de la capacité hydraulique  $C_H$  du multiport  $\mathbf{C}$  linéarisé associé à  $x_j^H$  à l'élément dynamique thermique  $C_T$  associé à  $x_i^T$  et  $\tilde{g}(x_j^H) = \frac{1}{C_{Hj}}$ .

La détermination des matrices  $B, C$  et  $D$  se fait de la même manière.

Les multiports qu'on peut rencontrés lors du calcul du gain  $\tilde{G}_i^j$  sont les multiports  $\mathbf{R}$  en causalité résistance, conductance et mixte, les multiports  $\mathbf{C}$  en causalité intégrale et les pompes branchées. L'équation suivante signifie que le gain  $\tilde{G}_i^j$  est donné par le produit des gains des multiports  $G_i^j$ .

$$\tilde{G}_i^j = \prod G_i^j$$

Dans le but de faciliter l'écriture des équations d'état, les gains des multiports sont calculés à partir de leurs bond graphs linéarisés.

L'entrée et la sortie d'un élément sont fixées selon la causalité, par exemple pour un élément simple  $R$  en causalité résistance l'entrée  $e$  est du côté du flux et la sortie  $s$  est du côté d'effort (figure B.1).



**Figure B.1.** Entrée  $e$  et sortie  $s$  d'un élément  $R$  en causalité résistance (a), en causalité conductance (b).

En causalité résistance, le gain de l'élément  $G_e^s$  qui est le rapport de la variable en sortie (effort) sur la variable en entrée (flux) est égal à  $R$ . Il est égal à  $1/R$  pour un élément  $R$  en causalité conductance.

Soient  $e_H$ ,  $e_T$ ,  $s_H$  et  $s_T$  l'entrée hydraulique, l'entrée thermique, la sortie hydraulique et la sortie thermique d'un multiport thermofluide. Les gains du multiport représentent les gains des chemins causaux qui le parcourent.

A titre illustratif, considérons le multiport **R** en causalité résistance (figure 5.7), on a :

$$G_{eH}^{sT} = \left( \frac{\partial T_1}{\partial \dot{m}} \right)_{(\bar{m}, \bar{H})}, G_{eH}^{sH} = R_H, G_{eT}^{sT} = R_T \text{ et } G_{eT}^{sH} = 0$$

Pour calculer  $\left( \frac{\partial T_1}{\partial \dot{m}} \right)_{(\bar{m}, \bar{H})}$  dérivons  $T_1 = \frac{\dot{H}}{\dot{m} C_p}$  on obtient :

$$T_1' = -\frac{\bar{H}}{C_p \cdot \bar{m}^2} \dot{m}' + \frac{1}{\bar{m} C_p} \dot{H}' \quad (\text{B.1})$$

On déduit alors la valeur de  $G_{eH}^{sT}$ ,  $G_{eH}^{sT} = -\frac{\bar{H}}{C_p \cdot \bar{m}^2}$ .

Pour le multiport **C** (figure 5.8), les gains sont :

$$G_{eH}^{sT} = \left( \frac{\partial F_T}{\partial m_C} \right)_{(H_C, m_C)}, G_{eH}^{sH} = \frac{1}{C_H \cdot s}, G_{eT}^{sT} = \frac{1}{C_T \cdot s} \text{ et } G_{eT}^{sH} = 0$$

D'autres gains sont utiles pour l'écriture des équations d'états. Les éléments de la diagonale de la matrice  $A$  du modèle linéarisé sont donnés par les  $G_{CH}^{CH}$  (gain de la boucle causale  $C_H$ - $C_H$  ne traversant pas un élément dynamique) et les  $G_{CT}^{CT}$  (gain de la boucle causale  $C_T$ - $C_T$  ne passant pas par un élément dynamique). Souvent ces boucles causales ne traversent qu'un élément résistif en causalité conductance, les figures 2.47 et 5.8 nous permet dans ce cas d'écrire :

$$C_H - R_H - C_H : G_{CH}^{CH} = -\frac{1}{C_H R_H} = -\frac{\left( \frac{\partial \dot{m}}{\partial \Delta P} \right)_{(\Delta \bar{P}, \bar{T}_1)}}{\frac{A}{g}} = -\frac{1}{t}$$

$$C_T - R_T - C_T : G_{CT}^{CT} = -\frac{1}{C_T R_T} = -\frac{\bar{m}_s C_p}{\bar{m}_c C_p} = -\frac{1}{t}$$

$t$  est le temps mis pour la vidange ou le remplissage du réservoir selon si la vanne (modélisée par le multiport **R**) se trouve en aval ou en amont du réservoir.

Tous les gains des multiports  $G_i^j$  sont donnés par le tableau récapitulatif (Tableau B.1).

$G_i^j$							
Multiport R							
Causalité résistance				Causalité conductance			
$e_H - s_H$	$e_H - s_T$	$e_T - s_T$	$e_T - s_H$	$e_H - s_H$	$e_H - s_T$	$e_T - s_T$	$e_T - s_H$
$R_H$	$-\frac{\bar{H}}{C_p \bar{m}^2}$	$R_T$	0	$1/R_H$	$\frac{1}{R_H} C_p \bar{T}_1$	$1/R_T$	0
Causalité mixte (type 1)				Causalité mixte (type 2)			
$e_H - s_H$	$e_H - s_T$	$e_T - s_T$	$e_T - s_H$	$e_H - s_T$	$e_T - s_H$	$e_T - s_T$	$e_T - s_H$
$1/R_H$	$-\frac{\bar{T}_1}{R_H \cdot \dot{m}}$	$R_T$	0	$R_H$	$C_p \bar{T}_1$	$1/R_T$	0
Pompe branchée							
Entrée de la pompe				Sortie de la pompe			
$e_H - e_H$	$e_H - e_T$	$e_T - e_T$	$e_T - e_H$	$s_H - s_H$	$s_H - s_T$	$s_T - s_T$	$s_T - s_H$
$-\frac{1}{K}$	$-\frac{1}{K} C_p \bar{T}_1$	$\bar{m} C_p$	0	$-\frac{1}{K}$	$-\frac{1}{K} C_p \bar{T}_1$	0	0
Entrée - Sortie de la pompe				Sortie - Entrée de la pompe			
$e_H - s_H$	$e_H - s_T$	$e_T - s_T$	$e_T - s_H$	$s_H - e_H$	$s_H - e_T$	$s_T - e_T$	$s_T - e_H$
$-\frac{1}{K}$	$-\frac{1}{K} C_p \bar{T}_1$	$\bar{m} C_p$	0	$-\frac{1}{K}$	$-\frac{1}{K} C_p \bar{T}_1$	0	0
Multiport C (Causalité intégrale)							
$e_H - s_H$	$e_H - s_T$	$e_T - s_T$	$e_T - s_H$	Boucle causale avec un multiport R			
$\frac{1}{C_H \cdot s}$	$-\frac{\bar{H}_C}{(\bar{m}_C)^2 C_p}$	$\frac{1}{C_T \cdot s}$	0	Au niveau hydraulique	$-\frac{1}{C_h R_h} = -\frac{1}{t}$		
				Au niveau thermique	$-\frac{1}{C_t R_t} = -\frac{1}{t}$		
$t$ est le temps mis pour la vidange ou le remplissage du réservoir selon si la vanne (modélisée par le multiport R) se trouve en aval ou en amont du réservoir.							

Tableau B.1. Tableau récapitulatif donnant les gains des différents Multiports linéarisés.

## B.2. Forme des équations d'état non linéaires en génie des procédés

Considérons un processus thermofluide constitué d'un réseau d'éléments stockant de l'énergie (accumulateurs, chaudière, ...) de composants transportant de l'énergie (conduite,

conduite avec pompe, conduite avec vanne, ...) et de sources d'énergies (pompe, thermoplongeur, ...). Nous supposons que le système est à paramètres localisés (température moyenne répartie d'une façon homogène) et en régime sous saturé. Dans ces conditions, la perte de chaleur sur les composants de transport peut être considérée au niveau des accumulateurs. En effet, chaque accumulateur impose sa température sur la conduite de sortie jusqu'à l'arrivée à un autre accumulateur. Ainsi la perte de chaleur qui est le résultat d'un gradient de température  $\Delta T = T_{in} - T_{out}$  ( $T_{in}$  est la température du fluide et  $T_{out}$  celle de l'environnement) peut être ajoutée à celle des accumulateurs aux niveaux des accumulateurs imposant les  $T_{in}$ . En considérant ces hypothèses, des résultats concernant les équations d'état sont obtenus. Une étude de leurs formes est particulièrement importante pour l'étude de la platitude.

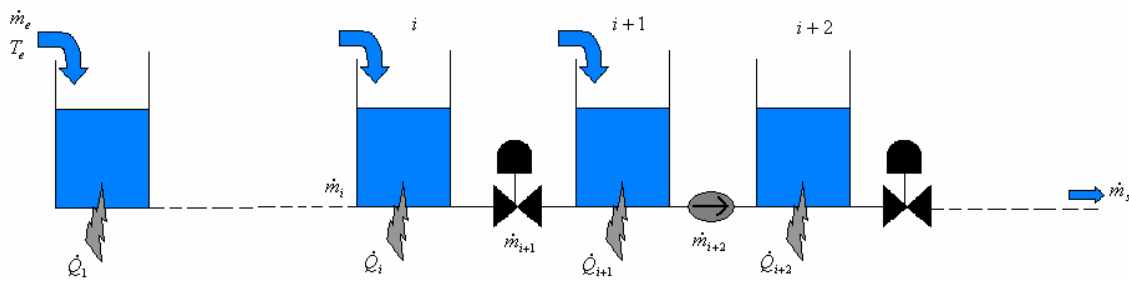
**Proposition B.1.** *En génie des procédés, particulièrement en régime sous saturé les équations d'état non linéaires d'une classe de systèmes thermofluides hermétiquement isolés sont de la forme :*

$$\begin{cases} \dot{x}_H = f(x_H) + Bu_H \\ \dot{x}_T = g(x_H, u_H, x_T) + B'u_T \end{cases}$$

où  $x_H$ ,  $x_T$ ,  $u_H$ ,  $u_T$  sont les vecteurs d'état hydraulique et thermique et les vecteurs d'entrée (actionneurs équivalents),  $f$  et  $g$  sont deux fonctions analytiques non linéaires,  $B$  et  $B'$  sont deux matrices booléennes telle que  $B_{ij}$  et  $B'_{ij} \in \{-1, 0, +1\}$ .

**Preuve.**

Le schéma d'un processus thermofluide en régime sous saturé est donné par la figure B.2. Comme le processus considéré est bien isolé, les variables d'état sont ceux associés à la masse et l'enthalpie stockées par les réservoirs. L'inertie du fluide due à l'écoulement du fluide à travers le tuyau n'est pas considérée.



**Figure B.2.** Schéma d'un processus thermofluide en régime sous saturé.

Pour un réservoir quelconque  $i$ , les variables d'état hydrauliques et thermiques sont données par :

$$\dot{x}_{iH} = \dot{m}_i - \dot{m}_{i+1} + \sum Sf_{iH} \quad (B.2)$$

$$\dot{x}_{iT} = \dot{H}_i - \dot{H}_{i+1} + \sum Sf_{iT} \quad (B.3)$$

avec  $\sum Sf_{iH}$  la somme des éventuelles sources de flux hydraulique provenant des flux par convection de type 1 sur le composant  $i$  et  $\sum Sf_{iT}$  la somme des sources de flux thermique par conduction ou provenant des flux par convection de type 1.

Le couple  $(\dot{m}_i, \dot{H}_i)$  est soit calculé par le circuit (flux par convection de type 0) ou imposé par une pompe (flux par convection de type 2). Sans perte de généralité on suppose que les réservoirs ont une section uniforme, soit  $A_i$  pour le réservoir  $i$ .

Dans le premier cas, on a :

$$\dot{m}_i = K_i \sqrt{\frac{g}{A_{i-1}} x_{(i-1)H} - \frac{g}{A_i} x_{iH}} \quad (\text{B.4})$$

avec  $K_i = \rho k_i$ ,  $\rho$  étant la masse volumique du fluide supposée constante (régime monophasique) et  $k_i$  la constante de la vanne  $i$ .

Le flux d'énergie thermique est donné par :

$$\dot{H}_i = \dot{m}_i \cdot \frac{x_{i-1T}}{x_{i-1H}} \quad (\text{B.5})$$

Dans le deuxième cas

- Si la pompe est considérée comme une source de contrôle on a :

$$\dot{m}_i = Sf_{iH} \quad \text{et} \quad \dot{H}_i = Sf_{iH} \cdot \frac{x_{i-1T}}{x_{i-1H}} \quad (\text{B.6})$$

- Si la pompe n'est pas considérée comme une source de contrôle

$$\dot{m}_i = p_i(x_{(i-1)H}, x_{iH}) \quad \text{et} \quad \dot{H}_i = q_i(x_H, x_T) \quad (\text{B.7})$$

avec  $p_i$  et  $q_i$  deux fonctions non linéaires.

Dans tous les cas, le couple  $(\dot{m}_i, \dot{H}_i)$  peut être écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \dot{m}_i &= \alpha \cdot Sf_{iH} + \beta \cdot r_i(x_H) \\ \dot{H}_i &= \dot{m}_i \cdot s_i(x_H, x_T) \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

avec  $r_i$  et  $s_i$  deux fonctions non linéaires,  $\alpha$  et  $\beta \in \{1,0\}$  tel que  $\alpha \neq \beta$ .

En remplaçant (B.8) dans (B.2) et (B.3) et en généralisant pour  $i$  allant de 1 à  $n$  (ordre du sous modèle hydraulique ou thermique) on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{x}_H &= f(x_H) + Bu_H \\ \dot{x}_T &= g(x_H, u_H, x_T) + B'u_T \end{aligned} \quad (\text{B.9})$$

avec  $B_{ij} \in \{0, +1\}$  et  $B'_{ij} \in \{-1, 0, +1\}$ .

Dans le premier cas, d'après les équations (B.4) et (B.5) l'analyticité de  $f$  et  $g$  est évidente. Dans le deuxième cas, l'analyticité de  $f$  et  $g$  dépend des courbes caractéristiques des pompes. Comme on ne considère dans ce manuscrit que les pompes centrifuges, l'analyticité de ces courbes et en conséquence de  $f$  et  $g$  est assurée.

**Propriété B.4.** *En génie des procédés, particulièrement en régime sous saturé les équations de sorties non linéaires sont de la forme :*

$$\begin{aligned} y_H &= h(x_H) \\ y_T &= l(x_H, x_T) \end{aligned}$$

$h$  et  $l$  sont deux fonctions analytiques non linéaires ne dépendant pas directement des actionneurs.

**Preuve.**

Dans les systèmes thermofluides, on distingue au niveau hydraulique les capteurs d'effort (capteurs de niveau  $De_{H,l}$  et capteurs de pression  $De_{H,p}$ ,  $l$  pour « level » ou niveau et  $p$  pour pression) et les capteurs de débit  $Df_H$ . Par contre au niveau thermique, on ne trouve que les capteurs d'effort (de température)  $De_T$ . On a au niveau hydraulique:

$$De_{iH,l} = z_i = \frac{m_{iC}}{\rho \cdot A_i} = \frac{x_{iH}}{\rho \cdot A_i} \quad (B.10)$$

$$De_{iH,p} = \frac{g \cdot m_{iC}}{A_i} = \frac{g \cdot x_{iH}}{A_i} \quad (B.11)$$

$$Df_i = K_i \sqrt{\frac{g}{A_{i-1}} x_{(i-1)H} - \frac{g}{A_i} x_{iH}} \quad (B.12)$$

Au niveau thermique :

$$De_{iT} = \frac{x_{iT}}{x_{iH} \cdot C_p} \quad (B.13)$$

La preuve est ainsi évidente.

### B.3. Ordre d'un système thermofluide

**Propriété B.5.** *L'ordre du modèle d'un système thermofluide à  $n$  accumulateurs en régime sous saturé parmi lesquels  $r$  accumulateurs ou leurs conduites de sortie ne sont pas bien calorifugés est de  $2n+r$  ou  $2n$  selon que l'on considère ou pas le stockage d'énergie thermique par les parois. Pour un système calorifugé, l'ordre est de  $2n$ .*

**Preuve.**

Pour les  $n$  multiports C modélisant les accumulateurs :

Les variables d'état d'un système thermofluide sont les masses et les enthalpies dans les accumulateurs. Dans les processus technologiques, un accumulateur se situe entre deux conduites, une conduite d'entrée et de sortie. Comme le flux massique transféré est la conséquence d'une variation de pression, les efforts sont imposés sur les multiports **R** et les flux sur les accumulateurs (multiports **C**). Alors en considérant un bond graph thermodynamique en causalité intégrale préférentielle, tous les multiports **C** admettent une causalité intégrale. Ceci est dû donc à la position respective des multiports **R** et **C** facilitant ainsi la mise en causalité intégrale des multiports **C**.

Si on ne considère pas le stockage d'énergie thermique par les parois ou le système est calorifugé, la preuve est terminée et l'ordre d'un modèle composé de  $n$  composants thermofluides est de  $2n$ .

Pour les  $r$  éléments  $C$  tenant compte des capacités thermiques des parois :

Si on considère qu'une partie de la chaleur est accumulée par la capacité thermique de l'enceinte  $C$  :  $C_m$  (figure 2.21), le modèle bond graph de la conduction thermique présente cette capacité entre deux éléments  $R$  modélisant le flux thermique par conduction de l'intérieur de l'accumulateur vers l'enceinte  $R_{fm}$  et de l'enceinte vers l'environnement  $R_{me}$ . Par la suite la position respective des éléments simples  $R$  et  $C$  facilite la mise en causalité intégrale lorsque la causalité intégrale préférentielle est affectée.

Comme tous les éléments dynamiques admettent une causalité intégrale lorsque qu'on affecte la causalité intégrale préférée alors l'ordre du système thermofluide est de  $2n + r$ . □

❖ **La preuve mathématique est la suivante :**

En ne tenant pas compte du stockage d'énergie thermique dans les parois :

Considérons un accumulateur quelconque  $i$ , ses équations de conservation d'énergie sont données par :

$$\dot{m}_{iC} = \dot{m}_i - \dot{m}_{i+1} + \sum Sf_{iH} \quad (\text{B.14})$$

$$\dot{H}_{iC} = \dot{H}_i - \dot{H}_{i+1} + \sum Sf_{iT} - \dot{Q}_{ip} \quad (\text{B.15})$$

avec  $\sum Sf_{iH}$  la somme des éventuelles sources de flux hydraulique provenant des flux par convection de type 1 sur le composant  $i$ ,  $\sum Sf_{iT}$  la somme des sources de flux thermique par conduction ou provenant des flux par convection de type 1 et  $\dot{Q}_{ip}$  représente la perte de chaleur par conduction :

$$\dot{Q}_{ip} = K_{Ci}(T_{iC} - T_{out}) = K_{Ci} \left( \frac{H_{iC}}{m_{iC} \cdot C_P} - T_{out} \right) \quad (\text{B.16})$$

avec  $K_{Ci}$  une constante.

Pour un flux thermique par convection de type 1:

$$\dot{m}_i = K_i \sqrt{\frac{g}{A_{i-1}} m_{(i-1)C} - \frac{g}{A_i} m_{iC}} \quad (\text{B.17})$$

$$\dot{H}_i = \dot{m}_i \cdot \frac{H_{i-1C}}{m_{i-1C}} \quad (\text{B.18})$$

avec  $K_i = \rho k_i$ ,  $\rho$  étant la masse volumique du fluide supposée constante (régime monophasique) et  $k_i$  la constante de la vanne  $i$ .

Pour un flux thermique par convection de *type 2*:

$$\dot{m}_i = p_i(m_{(i-1)C}, m_{iC}) \quad (\text{B.19})$$

$$\dot{H}_i = \dot{m}_i \cdot \frac{H_{i-1C}}{m_{i-1C}} \quad (\text{B.20})$$

avec  $p_i$  une fonction non linéaire.

On se trouve face à des équations différentielles du 1<sup>ère</sup> ordre où un ensemble de  $2n$  variables ainsi que leurs dérivées apparaissent. En posant le vecteur d'état  $x = \begin{bmatrix} m_{iC} \\ H_{iC} \end{bmatrix}$  avec  $i$  allant de 1 à  $n$ , ces équations deviennent les  $2n$  équations d'état. En conséquence, l'ordre du modèle est  $2n$ .

En tenant compte du stockage d'énergie thermique dans les parois des  $r$  accumulateurs non calorifugés:

$r$  équations de ce type sont ajoutées  $i = (1 \dots r)$  aux équations de conservation d'énergie:

$$\dot{T}_{im} = \frac{1}{C_{im}} (\dot{Q}_{me}^i - \dot{Q}_{fm}^i) \quad (\text{B.21})$$

Les transferts de chaleur par conduction du réservoir vers le métal et du métal vers l'environnement sont modélisés respectivement par les éléments  $R:R_{fm}$  and  $R:R_{me}$ . On a :

$$\dot{Q}_{ip} = \dot{Q}_{fm}^i = \frac{1}{R_{fm}} \left( \frac{H_{iC}}{m_{iC} \cdot C_p} - T_{im} \right) \quad (\text{B.22})$$

$$\dot{Q}_{me}^i = \frac{1}{R_{me}} (T_{im} - T_e) \quad (\text{B.23})$$

On se trouve dans ce cas face à  $(2n + r)$  équations différentielles du 1<sup>ère</sup> ordre ou  $(2n + r)$  variables apparaissent avec leurs dérivées. En posant le vecteur d'état  $x = \begin{bmatrix} m_{iC} \\ H_{iC} \\ T_{jC} \end{bmatrix}$  avec  $i$  allant de 1 à  $n$  et  $j$  allant de 1 à  $r$ . Par conséquent, l'ordre du modèle est  $(2n + r)$ .

Cette propriété peut être généralisée pour inclure le cas des accumulateurs en régime saturée :

**Propriété B.6.** *L'ordre d'un système thermofluide à  $p$  accumulateurs en régime sous saturé et  $q$  en régime saturé ( $p + q = n$ ) parmi lesquels  $r$  accumulateurs ou leurs conduites de sortie ne sont pas bien calorifugés est de  $2(n + q) + r$  ou  $2(n + q)$  selon que l'on considère ou pas le stockage d'énergie thermique par les parois.*

#### B.4. Système thermofluide et causalité dérivée (théorème 8)

**Théorème B.1.** (régime sous saturé) *Tous les éléments dynamiques thermiques d'un système thermofluide admettent une causalité dérivée lorsqu'on affecte la causalité dérivée préférentielle.*

**Preuve.**

Le schéma d'un processus thermofluide en régime sous saturé est donné par la figure B.2. Deux cas sont à distinguer selon si on considère ou non le stockage de la chaleur dans les parois.

Dans le premier cas où le stockage n'est pas considéré, les éléments dynamiques au niveau thermique sont ceux des capacités thermiques des multiports  $C$ .

Considérons un réservoir quelconque  $i$ , la variable d'état thermique est donnée par :

$$\dot{H}_{iC} = \dot{H}_i - \dot{H}_{i+1} + \sum Sf_{iT} - \dot{Q}_{ip} \quad (\text{B.24})$$

avec  $\dot{Q}_{ip} = K_{Ci}(T_{iC} - T_{out}) = K_{Ci}\left(\frac{H_{iC}}{m_{iC} \cdot C_P} - T_{out}\right)$  si le réservoir est mal calorifugé ou  $\dot{Q}_{ip} = 0$  dans le cas contraire.

On a :  $\dot{H}_i = \dot{m}_i \cdot \frac{H_{i-1C}}{m_{i-1C}}$  pour  $i \geq 2$ ,

et  $\dot{H}_1 = \dot{H}_e$  représente l'enthalpie du fluide d'entrée.

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{H}_{1C} = -\dot{m}_2 \cdot \frac{H_{1C}}{m_{1C}} + \dot{H}_e + \sum Sf_{iT} - K_{C1}\left(\frac{H_{1C}}{m_{1C} \cdot C_P} - T_{out}\right) \\ \dot{H}_{iC} = \dot{m}_i \cdot \frac{H_{i-1C}}{m_{i-1C}} - \dot{m}_{i+1} \cdot \frac{H_{iC}}{m_{iC}} + \sum Sf_{iT} - K_{Ci}\left(\frac{H_{iC}}{m_{iC} \cdot C_P} - T_{out}\right) \end{cases} \quad \text{pour } 2 \leq i \leq n$$

Ceci conduit à la représentation matricielle suivante :

$$\dot{H}_C = \begin{pmatrix} -\frac{\dot{m}_2}{m_{1C}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +\frac{\dot{m}_2}{m_{1C}} & -\frac{\dot{m}_3 C_p + K_{C2}}{m_{2C} \cdot C_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +\frac{\dot{m}_3}{m_{2C}} & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & -\frac{\dot{m}_n C_p + K_{Cn}}{m_{n-1C} \cdot C_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +\frac{\dot{m}_n}{m_{n-1C}} & -\frac{\dot{m}_{n+1}}{m_{nC}} \end{pmatrix} \cdot H_C + \begin{pmatrix} \dot{H}_e \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \sum Sf_{iT}$$

La matrice obtenue est triangulaire et ne dépend que des variables d'état hydrauliques. En supposant que toutes les variables d'état hydrauliques sont finies et non nulles, ce qui est en général vrai en génie des procédés, cette matrice peut être inversée permettant l'expression de  $x_T$  en fonction de  $\dot{x}_T$  et les variables hydrauliques :

$$x_T = f(\dot{x}_T, x_H, u_T, u_H) \quad (\text{B.25})$$

Par conséquent, les éléments dynamiques au niveau thermique d'un système thermofluide admettront une causalité dérivée si la causalité dérivée préférentielle est affectée.

Dans le deuxième cas où le stockage de chaleur par les parois est pris en compte, les éléments dynamiques au niveau thermique sont ceux des capacités thermiques des multiports  $C$  mais aussi les capacités thermiques des parois. Le vecteur d'état thermique est dans ce cas

$x_T = \begin{bmatrix} T_{jm} \\ H_{iC} \end{bmatrix}$  avec  $i = 1 \dots n$  et  $j = 1 \dots r$ ,  $n$  est le nombre d'accumulateurs dont  $r$  sont mal

calorifugés. D'après les équations (B.21), (B.22) et (B.23),  $r$  équations sont ajoutées aux  $n$  équations de conservation d'énergie thermique, on obtient:

$$\begin{cases} \dot{H}_{1C} = -\dot{m}_2 \cdot \frac{H_{1C}}{m_{1C}} + \dot{H}_e + \sum Sf_{iT} - \frac{1}{R_{1jm}} \left( \frac{H_{1C}}{m_{1C} \cdot C_p} - T_{1m} \right) \\ \Rightarrow \dot{H}_{iC} = \dot{m}_i \cdot \frac{H_{i-1C}}{m_{i-1C}} - \dot{m}_{i+1} \cdot \frac{H_{iC}}{m_{iC}} + \sum Sf_{iT} - \frac{1}{R_{ifm}} \left( \frac{H_{iC}}{m_{iC} \cdot C_p} - T_{im} \right) \\ \dot{T}_{jm} = \frac{1}{C_{jm}} \left( \frac{1}{R_{jme}} (T_{jm} - T_e) - \frac{1}{R_{jfm}} \left( \frac{H_{jC}}{m_{jC} \cdot C_p} - T_{jm} \right) \right) \end{cases} \quad (\text{B.26})$$

Ceci conduit à la matrice structurelle suivante :



En comparant avec la figure 5.12, le gain thermique de la figure B.3 (entrée-sortie du composant) est  $\left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial T_1}\right)_{(\bar{m}, \bar{T})}$  égal à  $\bar{m} C_p$  (gain thermique de la figure 5.12). Pareillement, pour la figure B.3 le gain donné en parcourant le chemin causal de la source hydraulique de la pompe à la sortie thermique est  $-K_R R_H$  égal à  $C_p \bar{T}_1$  (gain de la figure 5.12) et par conséquent la modélisation de la sous partie thermique peut être négligée au niveau de la pompe.

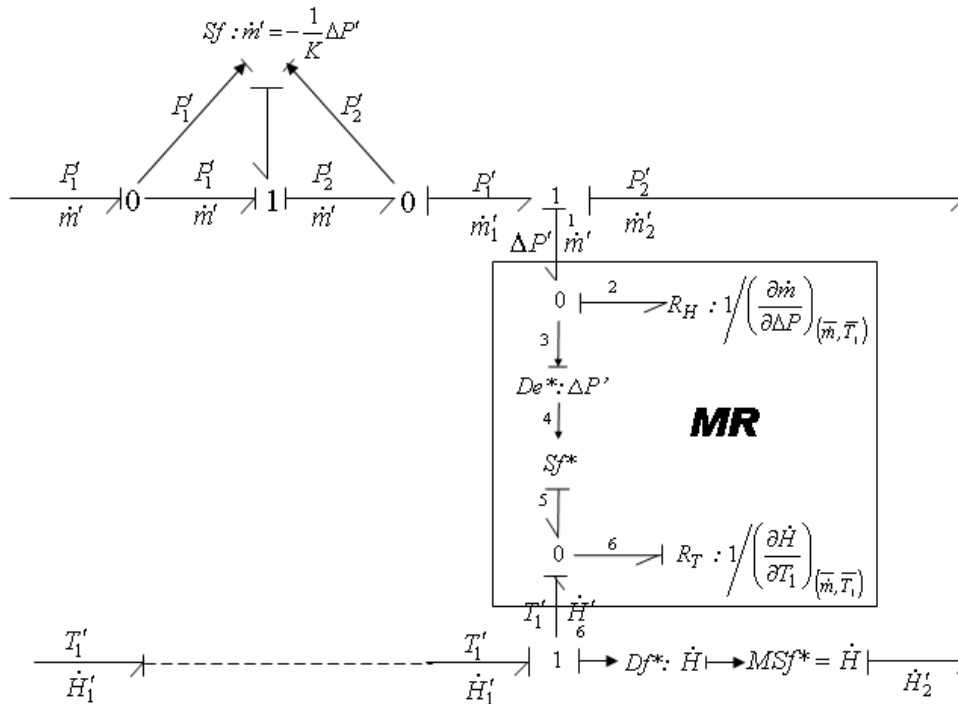


Figure B.3. Modélisation de l'ensemble (pompe + conduite).

## B.6. L'intérêt de la nouvelle représentation vectorielle pour la méthode de projection

Rappelons la méthode de projection utilisée pour le FDI des processus en se basant sur la génération des RRAs à partir d'une représentation vectorielle. La matrice de structure  $S$  et les relations constitutives des composants forment une matrice  $M$  contenant toutes les relations entre les variables du système et constituent un modèle polynôme du système. Elle

est définie par  $M = \begin{bmatrix} S & -I \\ I & M' \end{bmatrix}$ :

$$M = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & -I_1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & -I_2 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & 0 & 0 & 0 & -I_4 \\ I_1 & 0 & 0 & 0 & -H(1/s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & -H'(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & -L & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \\ (6) \\ (7) \end{matrix}$$

$M'$  regroupe les relations entrées-sorties des composants du système, tel que la relation  $M'.V = 0$  soit satisfaite.

La matrice  $M$  représente un ensemble de  $(2\sum_{i=1}^{n_M} P_{Mi} + n_S)$  équations.  $P_{Mi}$ ,  $n_M$  et  $n_S$  sont respectivement le nombre de ports du multiport  $i$ ,  $n_M$  le nombre de multiports passifs (**I**, **R** ou **C**), et le nombre de capteurs du système ( $De$  et  $Df$ ). Pour déterminer les  $2\sum_{i=1}^{n_M} P_{Mi}$  inconnues, cette matrice est scindée en deux matrices  $M_C$  et  $M_W$  associées respectivement aux variables connues  $C$  et aux variables inconnues  $W$  :

$$M_C.C + M_W.W = 0$$

A partir de  $M$ , on essaye de trouver une matrice polynomiale  $N$  tel que  $N.M_W = 0$ . Il est alors possible de générer  $n_S$  relations de redondance indépendantes décrits par:  $N.M_C.C = 0$ . Cependant cette matrice n'est pas unique car toute matrice obtenue par une combinaison linéaire de ses lignes est valable. Ce résultat a été montré dans *Chow et Willsky (1984)* par une approche par espace de parité.

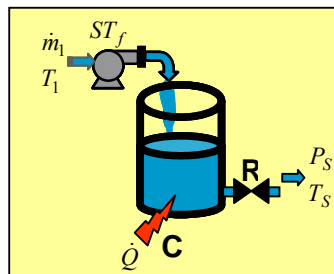
La représentation vectorielle proposée pour les systèmes thermofluides permet à la matrice  $M$  d'être écrite séparément au niveau de chacune des énergies hydraulique et thermique:

$$M_H = \begin{bmatrix} S_H & -I \\ I & M' \end{bmatrix} \text{ et } M_T = \begin{bmatrix} S_T & -I \\ I & M' \end{bmatrix}$$

De cette façon, la détermination de la matrice de projection  $N$  devient plus facile grâce à des considérations de dimension *El Osta et al. (2005d)*.

#### Exemple Illustratif

Considérons comme exemple illustrative un simple système thermofluide (figure B.4), les RRAs sont plus simplement déduites en utilisant la représentation vectorielle proposée.



**Figure. B.4.** Systeme thermofluide simple.

Le réservoir (modélisé par un multiport **C**) est alimenté par une source thermofluide  $ST_f$  de débit massique  $Sf_H : \dot{m}_1$  à la température  $Sf_T : T_1$ . L'eau est chauffée par une résistance de chauffage alimentée par une puissance électrique  $\dot{Q}$  (source thermique par conduction). Un multiport **R** modélise la vanne tout ou rien.  $P_S$  et  $T_S$  (la pression et la température de l'environnement) sont considérées comme des perturbations et  $T_1$  comme une source de commande, trois actionneurs sont alors distingués ( $Sf_H : \dot{m}_1, Sf_T : T_1$  et  $\dot{Q}$ ). Le système à modéliser est supposé linéaire. En régime sous saturé, les lois constitutives des composants sont données par les équations (B.29) et (B.30).

$$\begin{pmatrix} f_{RH} \\ f_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/R_H & 0 \\ k_R & 1/R_T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{RH} \\ e_{RT} \end{pmatrix} \quad (\text{B.29})$$

$$\begin{pmatrix} e_{CH} \\ e_{CT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/(C_H \cdot s) & 0 \\ k_C/s & 1/(C_T \cdot s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{CH} \\ f_{CT} \end{pmatrix} \quad (\text{B.30})$$

$R_H$  et  $R_T$  sont respectivement les résistances hydraulique et thermique du multiport **R**,  $C_H$  et  $C_T$  les capacités hydraulique et thermique du multiport **C**,  $K_R$  et  $K_T$  sont des constantes.

L'équation (B.31) donne la matrice de structure hydraulique.

$$\begin{pmatrix} f_{CH} \\ e_{RH} \\ y_H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{CH} \\ f_{RH} \\ Sf_H \end{pmatrix} \quad (\text{B.31})$$

En appliquant la méthode de projection sur la matrice  $M_H$ , la relation de redondance hydraulique est obtenue (équation B.32).

$$r_H : Sf_H - \left(\frac{1}{R_H} + C_H s\right) De_H = 0 \quad (\text{B.32})$$

L'équation (B.33) donne la matrice de structure thermique.

$$\begin{pmatrix} f_{CT} \\ e_{RT} \\ y_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{CT} \\ f_{RT} \\ Sf_T \\ \dot{Q} \end{pmatrix} \quad (\text{B.33})$$

En utilisant  $M_T$ , la relation de redondance thermique est donnée par l'équation (B.34).

$$r_T : Sf_T + \dot{Q} - k_C C_T Sf_H - \left(\frac{1}{R_T} + C_T s\right) De + \left(k_R + k_C \frac{C_T}{R_H}\right) De_H = 0 \quad (\text{B.34})$$

La représentation vectorielle proposée devient de plus en plus utile avec l'augmentation du nombre des composants dans un processus. Grâce à la représentation vectorielle proposée, la dimension des matrices utilisées par la méthode de projection est plus petite. A titre d'exemple, les matrices ici sont de dimension 7 au lieu de 10.

**Remarque B.6.1.** Comme il s'agit dans notre cas d'un système thermofluide en régime sous saturé où seule l'énergie hydraulique peut influencer sur l'énergie thermique, la dimension de  $M_H$  peut être réduite davantage et ceci en considérant  $M'_H$  au lieu de  $M'$ .

## B.7. Notation

$A$	Section	$m^2$
$A_f$	Affinité directe d'une réaction chimique	$J/mole$
$A_r$	Affinité inverse	$J/mole$
$c_p$	Chaleur spécifique à pression constante	$J/(K.kg)$
$C_p$	Capacité calorifique globale à pression constante	$J/K$
$c_v$	Chaleur spécifique à volume constant	$J/(K.kg)$
$C_v$	Capacité calorifique globale à volume constant	$J/K$
$D$	Diamètre	$m$
$\dot{E}$	Flux d'énergie	$W$
$e$	Epaisseur	$m$
$H$	Enthalpie totale	$J$
$\dot{H}$	Flux d'enthalpie transféré par convection	$W$
$h$	Enthalpie spécifique	$J/kg$
$i$	Intensité électrique	$A$
$K_c$	Conductance thermique	$W/K$
$l$	Largeur	$m$
$L$	Longueur	$m$
$\dot{m}$	Débit massique	$kg/s$
$m$	Masse	$kg$
$n$	Nombre de moles	-
$N$	Niveau	$m$
$P$	Pression	$Pa$
$\dot{Q}$	Flux thermique transféré par conduction	$W$
$q$	Charge électrique	<i>Coulomb</i>
$\dot{S}$	Flux d'entropie	$W/(K)$
$S$	Entropie	$J/K$
$s$	Densité d'entropie	$J/(K.kg)$
$T$	Température	$K$ (ou $^{\circ}C$ )
$\dot{n}$	Flux molaire	$mole/s$
$u$	Tension	<i>volt</i>
$\dot{V}$	Débit volumique	$m^3/s$
$V$	Volume	$m^3$
$x$	Variable d'état	-

$X$	Titre de la vapeur	$[0 - 1]$
$U$	Energie interne	$J$
$\dot{U}$	Flux d'énergie interne	$W$
$x$	Déplacement	$m$
$\nu$	Viscosité dynamique	$Pa.s$
$\mu$	Potentiel chimique	$J/mole$
$\rho$	Masse volumique	$kg/m^3$
$\lambda$	Conductivité thermique	$W/(m.K)$
$\dot{\xi}$	Vitesse d'une réaction chimique	$mole/s$
$\xi$	Avancement d'une réaction chimique	$[-]$

**ANNEXE.C**

LE GV, SCHEMA TECHNOLOGIQUE ET MODELES BOND GRAPHS



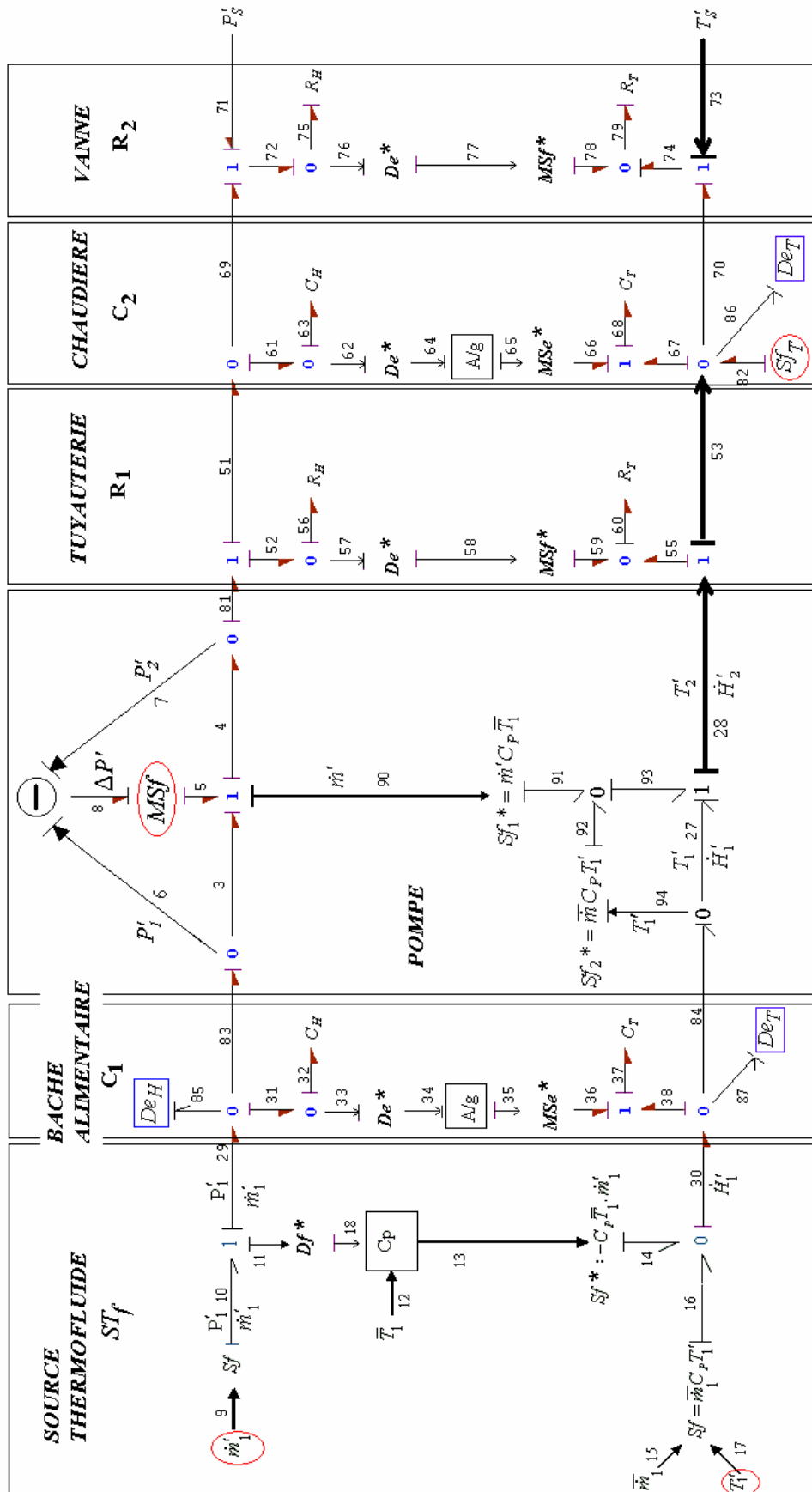


Figure C.2. Modèle bond graph linéarisé en causalité intégrale.

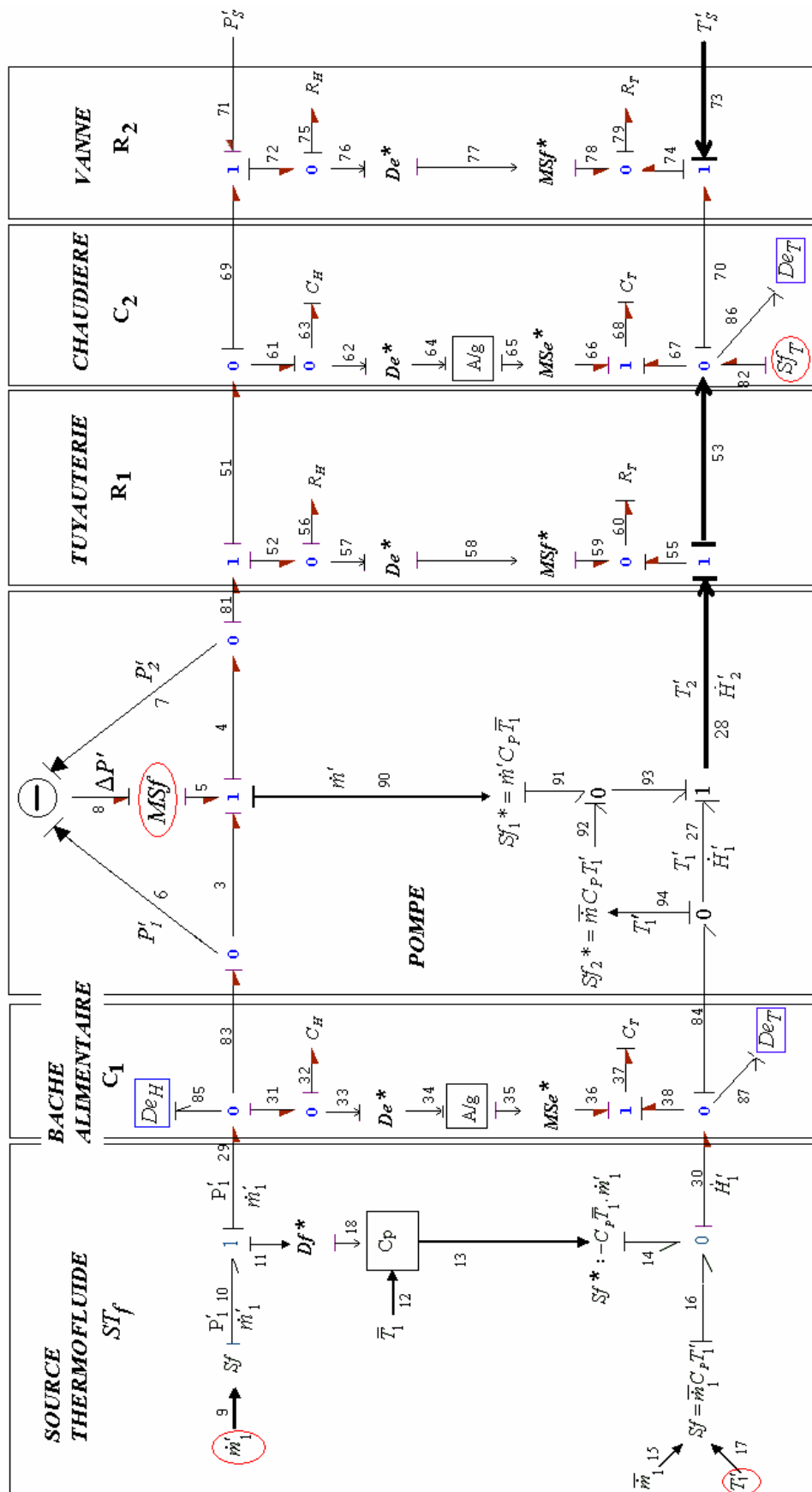


Figure C.3. Modèle bond graph linéarisé en causalité dérivée avec la pompe comme source de commande (Cas A).

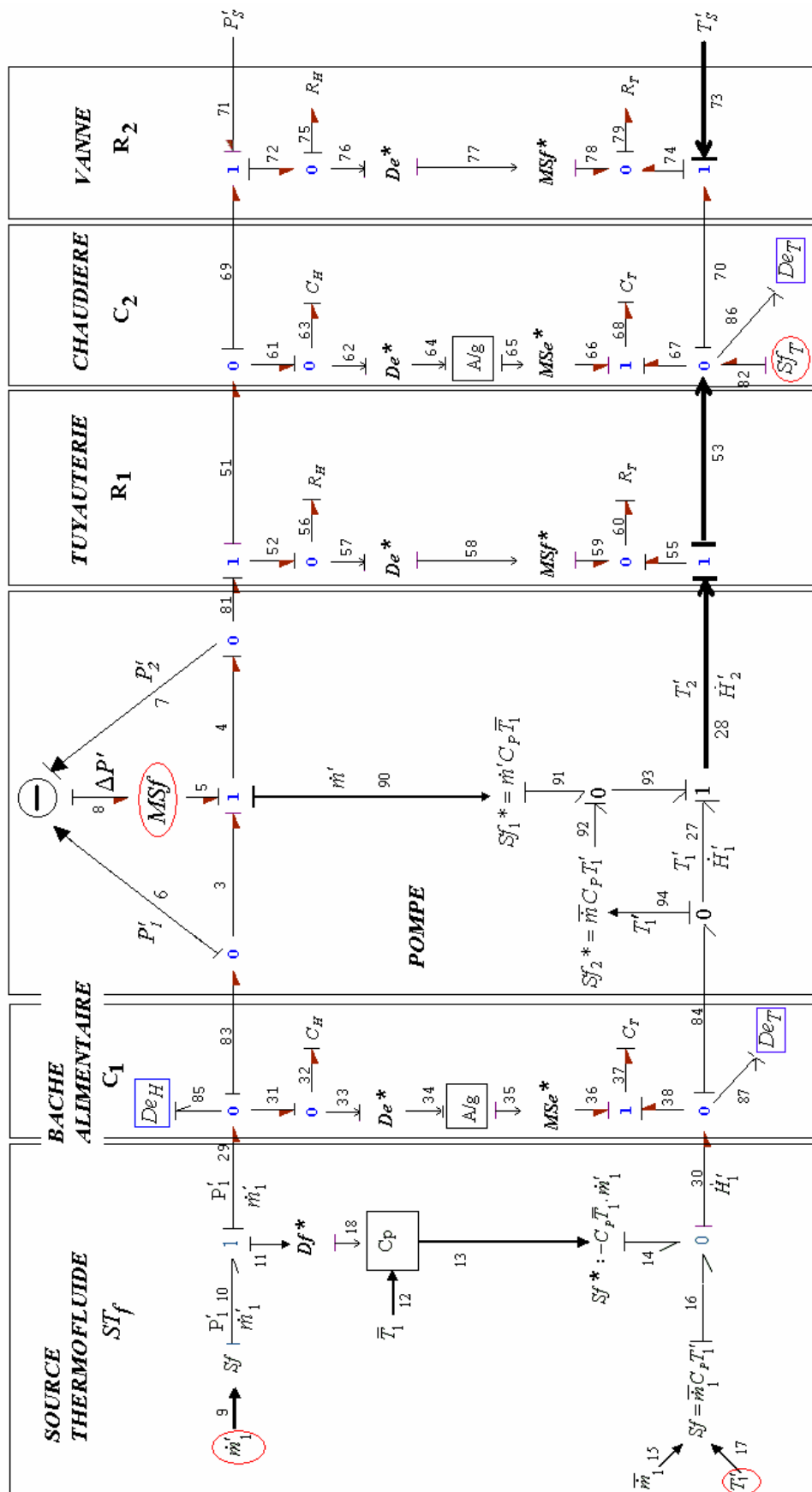


Figure C.4. Modèle bond graph linéarisé en causalité dérivée avec la pompe comme source modulée (Cas B).

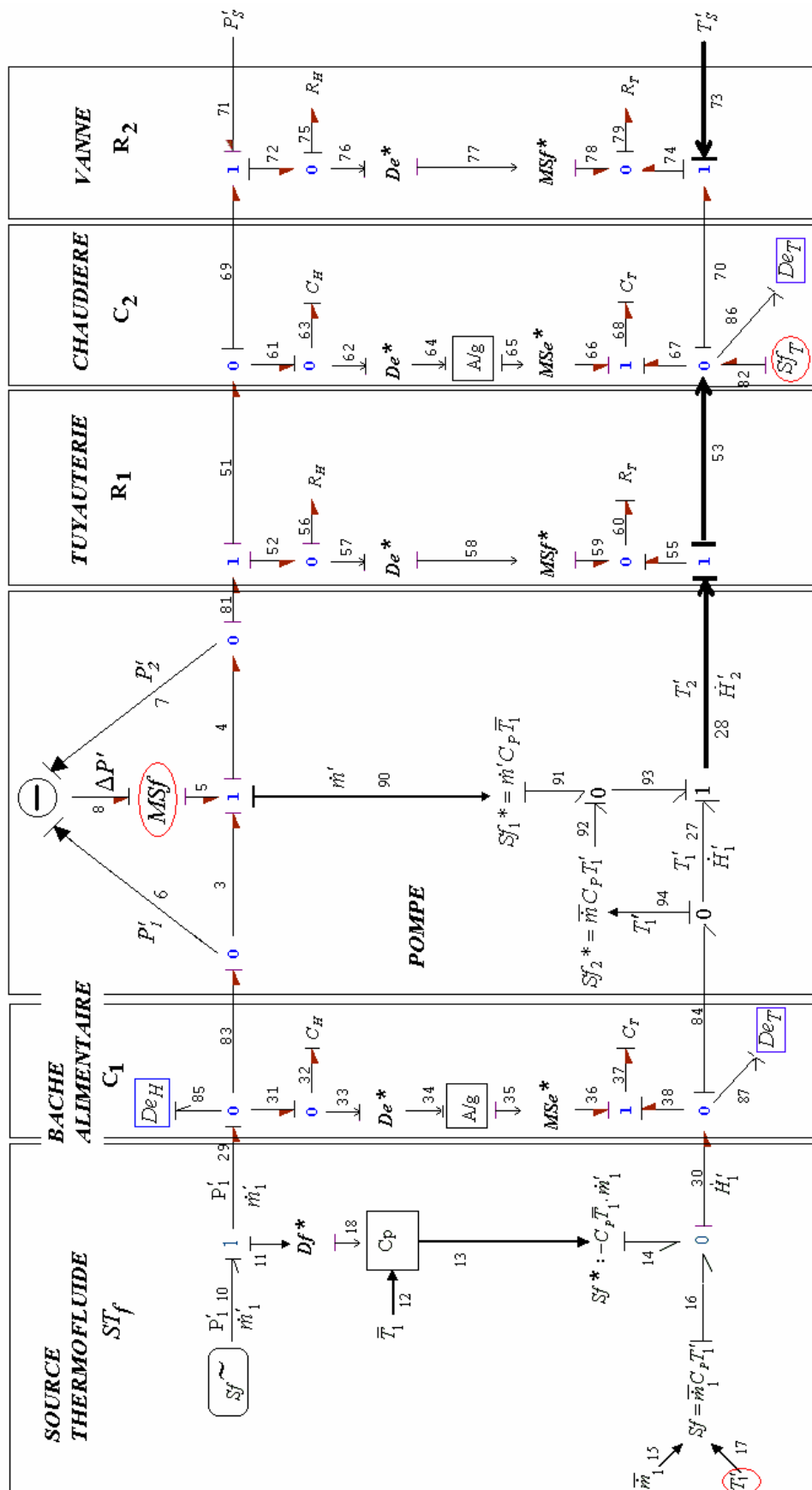


Figure C.5. Modèle bond graph linéarisé en causalité dérivée avec la source hydraulique de  $ST_f$  dualisée (Cas A).

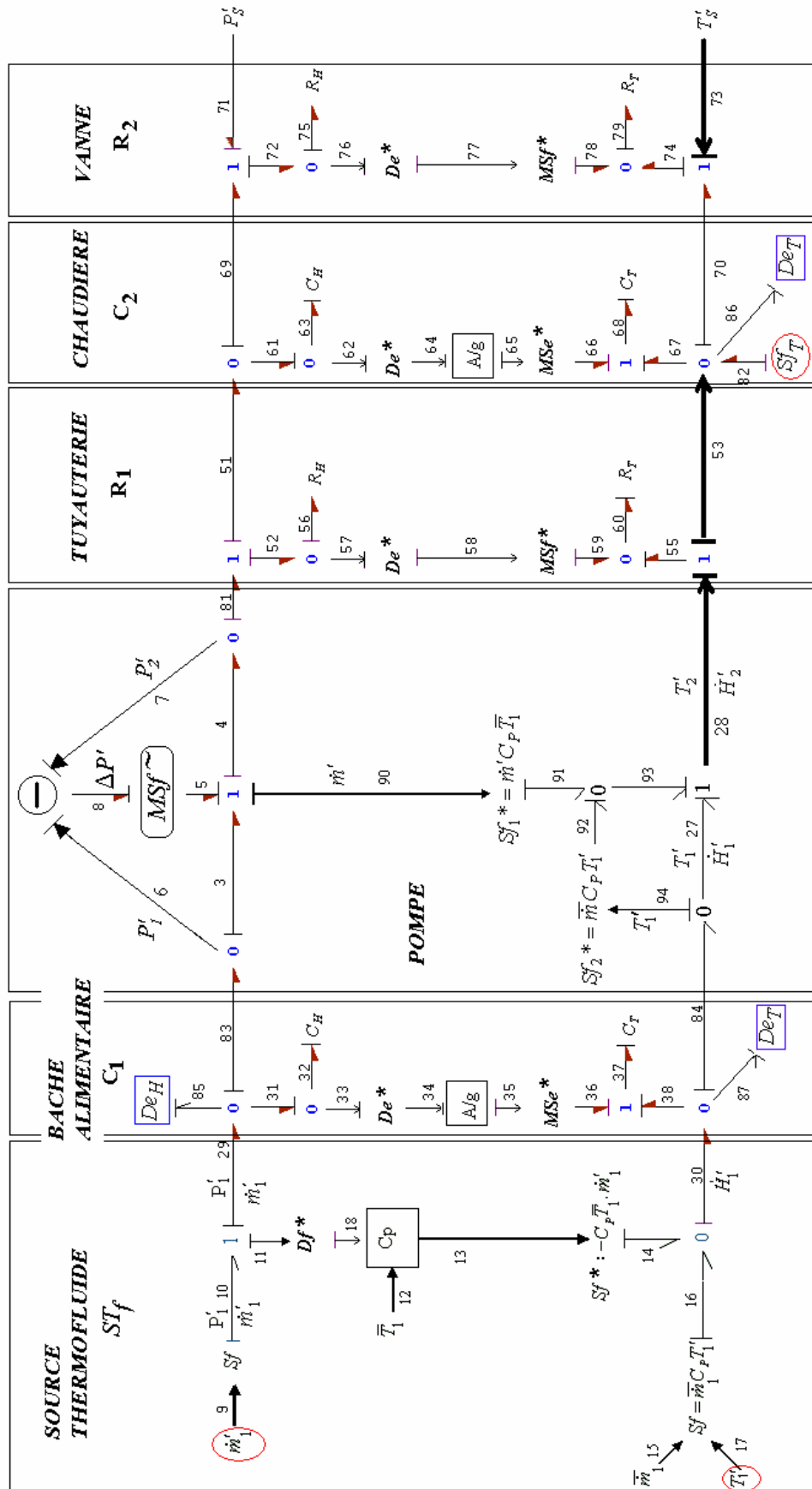


Figure C.6. Modèle bond graph linéarisé en causalité dérivée avec la source  $MSf$  dualisée (Cas A).

## **Bibliographie**

- Achir et al. (2003)* A. ACHIR, C. SUEUR et G. DAUPHIN TANGUY. Bond graph and flatness based control of non-salient permanent magnet synchronous motor. Submitted to Journal of Systems and Control Engineering.
- Achir & Sueur (2005)* A. ACHIR et C. SUEUR. An algebraic approach to non linear bond graph models. Submitted to the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC, 12-15 December 2005, Seville, (Spain).
- Assas (2002)* M. L. Assas. *Analyse de la tolérance aux fautes : Approches fonctionnelle et structurelle*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2002.
- Basseville et al. (1987)* M. BASSEVILLE, G. BENVENISTE et G. MOUSTAKIDES. Detection and diagnosis of changes in the eigen structure of non stationary multivariable systems. *Automatica*, 23:479-489, 1987.
- Beard (1971)* R. V. Beard. *Failure Accommodation in Linear Systems Through Self-Reorganization*. PhD dissertation, MIT, Dep, Aero, Astro Cambridge, février 1971.
- Borel (1984)* L. BOREL, Thermodynamique et énergétique, *Presses Universitaires Romandes*, 1984.
- Borne et al. (1992)* P. BORNE, G. DAUPHIN-TANGUY, J. P. RICHARD et F. ROTELLA. *Modélisation et Identification Des Processus*. Edition Technip, Paris, 1992.
- Borutzky & Granda (2001)* W. Borutzky and J. Granda. *Determining sensitivities from an incremental true bond graph*. In ICBGM'2001, 3-8, Phoenix, AZ, Jan. 7-11, 2001.
- Boudaoud & Masson (2000)* N. Boudaoud et M. H. Masson. *Diagnosis of Transient States: A Pattern Recognition Approach*. APII-JESA, 34(5):689-708, 2000.
- Breedveld (1985)* P. C. BREEDVELD. Multibond graph elements in physical systems theory. *Special issue of Journal of Franklin Institute*, 319(1/2):1-36, 1985.
- Brunet et al. (1990)* J. BRUNET, D. JAUME, M. LABARRÈRE, A. RAULT et VERGÉ M. *Détection et Diagnostic de Pannes. Approches Par Modélisation*. Paris (France), série diagnostic et maintenance edition, 1990.
- Busson & Ould Bouamama (2000)* F. BUSSON et B. OULD BOUAMAMA. Monitoring of steam generator using a bond graph approach. In *Symposium on Power Plant and Power Systems Control*, pages 318-323, Brussels, Belgium, April, 26-29 2000. IFAC.
- Busson (2002)* F. Busson. Les bond graphs multiénergies pour la modélisation et la surveillance en génie des procédés. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2002.

- CASIMIR (2001)* C. S. Kam. Les Bond Graphs pour la modélisation des systèmes Linéaires Incertains. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille, France.
- Cassar et al. (1994)* J. P. CASSAR, R. LITWAK, V. COQUEMPOT et M. STAROSWIECKI. Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour les procédés industriels complexes. *JESA, RAIRO-APII*, 31(9):179-202, 1994.
- CHEM (2001) Projet Européen* Advanced Decision Support System (DSS) for Chemical/Petrochemical manufacturing processes. Project N° G1RD-CT-2001-00466
- Chittaro et al. (1993)* L.G. CHITTARO, C. GUIDO, E. TASSO et E. TOPPANO. Functional and teleological knowledge in the multimodeling approach for reasoning about physical system: A case study in diagnosis. In *IEEE Trans. On Syst. Man and Cybernetics*, volume 23, 1993.
- Chow (1980)* E.Y. CHOW. *Failure Detection System Design Methodology*. PhD thesis, M.I.T., Lab. Information and Detection System, Cambridge, M.A., 1980.
- Chow & Willsky (1984)* E.Y. Chow et A.C. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. *IEEE, Trans. A. C.*, 29(7), 1984.
- Cocquempot (1993)* V. Cocquempot. *Surveillance des processus industriels complexes, génération et optimisation des relations de redondance analytiques*. Thèse de doctorat, Université de Lille I, France, 1991.
- Cox et al. (1992)* D. Cox, J. LITTLE et D. O'SHEA. *Ideals, Varieties, and Algorithms, Undergraduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, 1992.
- Cruz Victoria et al. (2004)* Juan C. Cruz Victoria, Rafael Martínez Guerra and Rubén Garrido Department of Automatic Control CINVESTAV-IPN A. P.14-740, C. P. 07360, México, D. F., MEXICO. 2nd Symposium on System, Structure and Control, Oaxaca, 2004-635-640.
- Dauphin Tanguy (2000)* G. DAUPHIN-TANGUY. Les bond graphs. Paris, Hermès Science Publications, France, 2000.
- Davison (1977)* F. J. Davison. Connectability and Structural Controllability of Composite Systems. *Automatica*, 13(2) :109-123, 1977.
- Declerck (1991)* PH. DECLERCK. Analyse Structurelle et Fonctionnelle Des Grands Systèmes, Application À Une Centrale PWR 900 MW. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille (France), 1991.
- Declerck & Staroswiecki (1991)* Declerck, P. and M. Staroswiecki (1992). Generation of analytical redundancy relations for fault detection, *IEEE conference*, Singapore 18-21, February 1992, pp 1010-1014.
- Delemaire et al. (1994)* G. Delemaire, J. P. Cassar, et M. Staroswiecki. *Comparaison of Identification and Parity Space Approaches For Failure Detection in Single-Input Single-Output*. In 33th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, pages 2279-2285, 1994.
- Denoeux (1997)* T. Denoeux. *Analysis of Evidence-Theoretic Decision Rules For pattern Classification*. *Pattern Recognition*, 30(7):1095-1107, 1997.
- Diop (1991)* S. DIOP. Elimination in control theory. *Mathematical Control Signals Systems*, 4:17-32, 1991.
- Diop & Martínez-Guerra (2001)* Diop, S. et Martínez-Guerra, R. On an algebraic and differential approach of non-linear systems diagnosis. In the Proceedings of the IEEE

Conference of Decision and Control, CDC01, Orlando, FL, USA, pp. 585-589.

*Dubuisson (1990)* B. DUBUISSON. Diagnostic et Reconnaissance Des Formes. Hermes, Paris, 1990.

*El Osta et al. (2005a)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2005). Sensor Placement for Diagnosability Analysis in Thermofluid Proces. Accepted at the 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC, 12-15 December 2005, Seville, (Spain).

*El Osta et al. (2005b)* W. EL OSTA, A. ACHIR, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2005). Diagnosability Analysis Based on Transcendence Degrees and BG Models. Accepted at the The 2nd International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA), Marseilles, France, October 20-22, 2005.

*El Osta et al. (2005c)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2005). Flatness for actuators monitoring in process engineering. 16th IFAC World Congress on Automatic Control theory, technology and applications, CDROM, July 4-8, 2005, Prague, Czech Republic.

*El Osta et al. (2005d)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2005). Structural representation based on multienergy bond graph. 17th IMACS World Congress IMACS 2005 on Scientific Calculus, Applied Mathematics, and Simulation, CDROM, 11 - 15 July, Paris, France.

*El Osta et al. (2005e)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2005). Monitorability Indexes for Fault Tolerance Analysis using a BG Approach. Accepted at at the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SAFEPROCESS 2006, Beijing, PR China.

*El Osta et al. (2005f)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2005). FLATNESS FOR ACTUATORS MONITORING IN PROCESS ENGINEERING. Submitted to *Simulation : Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, manuscript number T050058, 10 June 2005.

*El Osta et al. (2004a)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2004). Monitoring of Thermofluid Systems using linearized multienergy Bond Graph. 7<sup>th</sup> IFAC Symposium on Cost Oriented Automation Gastineau, Preprints edited by M. Zaremba et al., pp. 121-126, Ottawa/ Canada June 7 - 9, 2004.

*El Osta et al. (2004b)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2004). Monitoring of Components in Industrial Processes Based on A Bond Graph Model. *2nd IFAC SYMPOSIUM on SYSTEM, STRUCTURE and CONTROL*, pp. 430-435, December 8 - 10, 2004. Oaxaca, Mexico.

*El Osta et al. (2004c)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2004). Monitoring of components in process engineering based on linearized multienergy bond graphs. Submitted to *Journal of Systems and Control Engineering. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part I. Northgate Avenue, Bury St Edmunds, Suffolk, IP32 6 BW, UK. Website : www.pepublishing.com (2004).*

*El Osta et al. (2003a)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2003). Analyse structurelle des bond graphs multienergies linearisés. *MAJECSTIC'2003 Manifestation des JEunes Chercheurs STIC*, 29-31 octobre, Marseille, France.

*El Osta et al. (2003b)* W. EL OSTA, B. OULD BOUAMAMA ET C. SUEUR (2003). Structural Analysis based on linearized multienergy Bond Graph. des bond graphs

- multienergies linearisés. *Submitted to the Journal of The Franklin Institute. E-submission number : FI\_El\_osta.wassim.AT.ec-lille.fr\_20040130/1 (2003).*
- Evan & Willcox (1970)* F.A. EVAN et J.C. WILLCOX. Experimental stutdown redundant sensor inertial navigation systems. *Journal of Spacecraft Rockets*, 7(9), Sept. 1970.
- Feliot (1997)* C. FELIOT. *Modélisation de Systèmes Complexes : Intégration et Formalisation de Modèles*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve D'Ascq (France), 1997.
- Fliess et al. (1995)* Fliess. M, Ph. Martin, J. Lévine and P.Rouchon (1995). Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples. *Int. J. control*, 61(6): 1327-1361.
- Fliess et al. (1992)* Fliess. M, J. Lévine, Ph. Martin and P.Rouchon (1992). Sur les systèmes différentiellement plats. *CR Acad. Sci. Paris*, I-317, 619-624.
- Frank (1987)* P. M. Frank Advanced Fault Detection and Isolation Schemes Using Nonlinear and Robust Observers. 10<sup>th</sup> World Congress on Automatic Control, IFAC, RFA, pp63-68, juillet 1987
- Frank (1988)* P. M. Frank. Fault Diagnosis on the basis of Dynamic Process Models. Proceedings IMACS, 12<sup>th</sup> World Congress on Scientific Computation, Paris, France: 414-419, 18-22 juillet 1998.
- Frank (1990)* P.M. FRANK. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge -based redundancy- a survey and some new results. *Automatica*, 26(3):459-474, 1990.
- Frydman et al. (2001)* C. FRYDMAN, M. LE GOC, L. TORRES ET N. GIAMBIASI. The diagnostic approach used in SACHEM. In *Working Notes of the 12th International Workshop on Principles of Diagnostic DX'01*, Sansicario, Italie, 2001.
- Gawthrop (1995)* P.J. GAWTHROP. Bicausal bond graphs. In *ICBGM'95*, pages 83-88, Las Vegas, USA, 1995.
- Gentil (1996)* S. GENTIL. Intelligence artificielle pour la surveillance des procédés continus. In *Actes de L'école D'été D'automatique de Grenoble*, page Tome 1, Grenoble, France, 2-6 septembre 1996.
- Gertler & Luo (1989)* J. J. Gertler et Q. Luo. *Robust Isolable Models for Failure Diagnosis*. *AIChE Journal* vol.35, n°11, pp 1856-1861, november 1989.
- Gertler & Monajemy (1993)* J. J. Gertler et R. Monajemy. *Generating Directional Residuals with Dynamic Parity Equations*. 12<sup>th</sup> World Congress, IFAC, Sydney, Australie. Vol.7, pp 505-510, 18-23 juillet 1993.
- Gertler & Singer (1990)* J. GERTLER et D. SINGER. A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation. *Automatica*, 26(2):381-388, 1990.
- Ghiaus (1999)* C. GHIAUS. Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. *Energy and buildings*, 30:221-232, 1999. (Greifeneder et Cellier, 2001 a) J. GREIFENEDER et F. E. CELLIER. Modeling convective flows using bond graphs. In *Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'2001)*, pages 276-284, Phoenix, Arizona, 2001.
- Guernez et al. (1997)* C. GUERNEZ, M. PETITOT, J.P. CASSAR et M. STAROSWIECKI. Fault detection and isolation in non linear polynomial systems. In *Proceedings of 15th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics*, volume 4, pages 67-73, Berlin, 1997.
- Haffaf (2000)* H. HAFFAF. *Contribution À la Résolution Des Problèmes Combinatoires Dans un Bond-Graph Par la Théorie Des Matroides*. PhD thesis, Université d'Oran, 2000.

- Haves et al. (1996)* P. HAVES, T. SALSBURY et J. WRIGHT. Condition monitoring in HVAC sub-systems using first principles models. *ASHRAE Transactions (Part 1)*, pages 519-527, 1996.
- Iserman (1984)* R. ISERMAN. Process fault detection based on modeling and estimation methods. *A Survey Automatica*, 20(4):387-404, 1984.
- Iserman & Balle (1997)* R. Iserman et P. Balle. *Trends in the Application of Model-Based Fault Detection and Diagnosis of Technical Processes*. Control Engineering Practice, 5(5):709-719, 1997.
- Iserman & Freyermuth (1991)* R. Iserman et B. Freyermuth. *Process Fault Diagnosis Based on process Model Knowledge-Part I: Principe For Fault Diagnosis With Parameter Estimation*. Transaction of the ASME, 113:620-626, 1991
- Kaboré et al. (1999)* P. KABORÉ, M. STAROSWIECKI et H. WANG. On parity space and observer-based approaches for FDI in state-affine systems. In *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix, USA, 1999.
- Karnopp (1977)* Karnopp, D. K. 'Power and Energy in Linearized physical Systems'. Journal of the Franklin Institute, Vol.303, No.1, pp.85-97, Janvier 1977.
- Karnopp (1979)* D.C. KARNOPP. State variables and pseudo-bond graphs for compressible thermofluid systems. *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 101(3):201-204, September 1979.
- Karnopp et al. (1981)* D.C. KARNOPP et S. AZERBAIJANI. Pseudo bond graphs for generalised compartmental models in engineering and physiology. *Journal of The Franklin Institute*, 312(2):95-108, 1981.
- Karnopp (1990)* D.C. KARNOPP. Bond graph models for electrochemical energy storage: Electrical, chemical and thermal effects. *The Franklin Institute*, 327:983-992, 1990.
- Karnopp et al. (1990)* D.C. KARNOPP, D. MARGOLIS et R. ROSENBERG. *Systems Dynamics: A Unified approach*. John Wiley, New York, second edition, 1990.
- Kohda et al. (1993)* T. KOHDA, H. KATSUBE, H. FUJIHARA et K. INOUE. Identification of system failure causes using bond graph models. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceedings*, 5:269-274, 1993.
- Lamiri (2000)* S. LAMIRI. *Modélisation de Procédés de Génération de Vapeur En Dimension Finie et Infinie*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq (France), november 2000.
- Lee et al. (1996)* W. LEE, C. PARK et G. KELLY. Fault detection in an air-handling unit using residual and recursive parameter identification methods. *ASHRAE Transactions (Part 1)*, pages 528-539, 1996.
- Lemoigne (1989)* J. L. LEMOIGNE. *La Modélisation Des Systèmes Complexes*. Dunod Bordas, Paris (France), afcet systèmes edition, 1989.
- Lévine & Nguyen (2003)* J. LEVINE ET D. V. NGUYEN. Flat output characterization for linear systems using polynomial matrices. *Systems & Control Letters, Volume 48, Issue 1, 15 January 2003, Pages 69-75*.
- Lin (1974)* C. T. Lin. Structural controllability. In *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-19, p. 201-208, 1974.
- Lin (1986)* A. Linneman. *A Further Simplification in the Proof of the Structural Controllability Theorem*. *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-31(7),1986.

- Lorenz (1996)* F. LORENZ. Modelling level, a question of semantics. In *IMACS ESIEE CESA'96 Multiconference*, Lille (France), 1996. IMACS.
- Lucas & Evrard (1993)* B. LUCAS et J.M. EVRARD. An improved diagnosis method using a mixed model. In *TOOLDIAG'93 Conference on Fault Diagnosis*, pages 1071-1079, Toulouse, France, December 1993.
- Luenberger (1971)* D. G. Luenberger,. *An Introduction to Observers*. IEEE Transactions on Automatic Control. Vol AC-16, n°6, pp 596-602, décembre 1971.
- Magni & Moyon (1991)* J. F. Magni, P. Moyon. *A Generalized Approach to Observers for Fault Diagnosis*. Proceedings of 30<sup>th</sup> IEEE CDC, Brighton, UK, December 1991.
- Magni & Mouyon (1994)* J.F. MAGNI et PH. MOUYON. On residual generation by observer and parity space approaches. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(7):441-447, 1994.
- Maquin & Ragot (2000)* D. MAQUIN ET J. RAGOT. *Diagnostic Des Systèmes Linéaires*. Hermes, Paris, France, hermes edition, 2000.
- Marrison & Gawthrop (1991)* N.A. MARRISON et P.J. GAWTROP. Fault detection, location and identification in dynamic systems. In *European Control Conference, ECC'91*, pages 1911-1916, Grenoble, France, 2-5 july 1991.
- Martínez-Guerra et al. (1998)* Martínez-Guerra, R., Ramírez Palacios, I. R. and Alvarado-Trejo, E. (1998) On parametric and state estimation: application to a simple academic example. Proc. IEEE 37th Conf. on Dec.and Control, pp. 764-765.
- Mayeda (1981)* H. Mayeda. *On Structural Controllability Theorem*. IEEE Trans. Autom. Control, AC-26(3):795-798, 1981.
- Millot (1988)* P. MILLOT. *Supervision Des Procédés Automatisés et Ergonomie*. Editions Hermes, Paris, 1988.
- Modarres (1993)* M. MODARRES. Functional modeling of complex system using a GTST-MPLD framework. In *Proceedings of the First International Workshop on Functional Modeling of Complex Technical Systems*, Ispra, Italy, 1993.
- Moksnes (1997)* P. O. MOKSNES. *Modeling Two-Phase Thermo-Fluid Systems Using Bond Graph*. Dr. ing thesis, University of Sciences and Technology, Department of Marine Engineering, Norway, 1997.
- Mosiek et al. (1996)* D. MOSIEK, M. TAGINA, J.P. CASSAR et G. DAUPHIN-TANGUY. Using of the junction structure matrix and the loops properties of a bond graph model to avoid implicit equations during the generation of ARRs and sensors placement. *European Simulation Multiconference SCS*, pages 818-824, june 1996.
- Mosiek (2000)* D. MOSIEK. *Procédures Graphiques Pour L'analyse Structurelles de Systèmes Physiques Modélisés Par Bond Graph*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2000.
- Mukherjee & Karmakar (2000)* A MUKHERJEE et R. KARMAKAR. *Modelling and Simulation of Engineering Systems Through Bond Graphs*. Alpha Sciences International, Pangbourne, UK, 2000.
- Mukherjee & Samantaray (2001)* A. MUKHERJEE et A. K. SAMANTARAY. System modelling through bond graph objects on SYMBOLS 2000. In *International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'01)*, volume 33, pages 164-170, Phoenix, Arizona, 2001. SCS Publishing, Simulation Series.

- Ould Bouamama & Dauphin Tanguy (1996)* B. OULD BOUAMAMA et G. DAUPHIN-TANGUY. Bond graph model of a steam generator process and its environment. In *The 10 Th European Simulation Multiconference ESM'96*, pages 238-242, Budapest- Hungary, 1996. SCS.
- Ould Bouamama et al. (1997)* B. OULD BOUAMAMA, J.U. THOMA et J.P. CASSAR. Bond graph modelisation of steam condensers. In *IEEE, International Conference on Systems Man, and Cybernetics: Computational Cybernetics and Simulation*, volume 3, pages 2490-2494, Orlando,USA, 1997.
- Ould Bouamama et al. (2000)* B. OULD BOUAMAMA, F. BUSSON, G. DAUPHIN-TANGUY et M. STAROSWIECKI. Analysis of structural properties of thermodynamic systems. In *4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, volume 2, pages 1068-1073, Budapest, 14-16 june 2000. IFAC.
- Ould Bouamama & Thoma (2000)* B. OULD BOUAMAMA et J.U. THOMA. In *Bond Graphs, Sous la Direction de G. Dauphin-Tanguy*. Systèmes Automatisés. Paris, France, hermes edition, 2000.
- Ould Bouamama (2001a)* B OULD BOUAMAMA. Model builder for thermofluid systems using a bond graph and functional modelling. In *Proceedings of 13th European Simulation Symposium, ESSOI*, pages 822-826, Marseille, France, October, 18-20 2001. ESS'OI.
- Ould Bouamama et al. (2001)* Ould Bouamama B., M. Staroswiecki et G. Dauphin-Tanguy (2001). 'Actuator Fault Detection Using Bond Graph Approach'. European Control Conference, ECC'2001, pp. 2735-2740, Porto Portugal, September 2001.
- Ould Bouamama et al. (2002a)* B. OULD BOUAMAMA, M. BAYART et B. CONRARD. FDI smart actuators using bond graphs and external models. In *World Congress on Automatic Control IFAC*, Barcelona, Spain, July, 21-26 2002.
- Ould Bouamama et al. (2002b)* B. OULD BOUAMAMA, M. BAYART, K. MEDJAHER et B. CONRARD. FDI of smart actuators using bond graphs and external models. *submitted to Control Engineering Practice (CEP) journal*, 2002.
- Ould Bouamama (2003)* B. Ould Bouamama. 'Bond graph approach as analysis tool in thermofluid model library conception'. *Journal of the Franklin Institute*, Vol.340, pp.1-23, 2003.
- Ould Bouamama et al. (2005a)* B. OULD BOUAMAMA, M. STAROSWIECKI, G. DAUPHIN-TANGUY et A.K. SAMANTARY. Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. *Control Engineering Practice (CEP) journal*, 13 (7) pp. 875-891, 2005.
- Ould Bouamama et al. (2005b)* B. Ould Bouamama, K. Medjaher, A.K. Samantary et M. Staroswiecki Supervision of an industrial steam generator. Part I et II: *Control Engineering Practice*, CEP (sous presse disponible sciences direct <http://www.sciencedirect.com/science>)
- Patton (1993)* R. J. Patton. *Robustness Issues In Fault Tolerant Control*. Tooldiag'93, Toulouse, France, vol3(late papers), April 5-7 1993.
- Patton & Chen (1997)* R. J. Patton and J. chen. 'Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications'. *Control Engineering Practice* 5(5), 671-682.
- Patton et al. (1989)* R. J. PATTON, P. M. FRANK et R. N. CLARK. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ, 1989.
- Patton & Chen (1991)* R.J. PATTON et J. CHEN. A review of parity space approaches to fault diagnosis. In *Proc. IFAC/IMACS Symposium SAFEPROCESS'91*, volume 1, pages 238-255, Baden-Baden, Sept. 1991.

- Paynter (1961)* H.M. PAYNTER. *Analysis and design of Engineering Systems*. M.I.T. Press, 1961.
- Perelson & Oster (1976)* A.S. PERELSON et OSTER G.F. Bond graphs and linear graphs. *J. Franklin Institute*, 302(2):159-185, 1976.
- Philippus (2001)* A. PHILIPPUS. Temporal causal graph. 2001.
- Potter & Suman (1977)* J.E. POTTER et M.C. SUMAN. Tresholdless redundancy management with array of skewed instruments. *Electronic Flight Control Systems*, 224:15-25, 1977.
- Prandtl (1952)* L. PRANDTL, *Essentials of fluid Dynamics*, Blackie, London, 1952.
- Ragot & Maquin (1994)* J. RAGOT et D. MAQUIN. An algorithm for obtaining redundancy equation of LTI systems. *Automatica*, 30(3):537-542, 1994.
- Ragot et al. (1997)* Ragot, J., Kratz, F. and Maquin, D. (1997). 'Espace de parité pour les systèmes linéaires incertains'. Synthèse, quelques résultats nouveaux et mise en œuvre. Seizième Colloque GRETSI, Grenoble, France, 15-19 septembre 1997.
- Rahmani et al. (1997)* A. RAHMANI, C. SUEUR et G. DAUPHIN-TANGUY. Approche des bond graphs pour l'Analyse structurelle des systèmes linéaires. *Linear Algebra and its applications*, 259:101-131, 1997.
- Rimaux (1995)* S. Rimaux. *Etude Des Propriétés Structurelles de Certaines Classes de Systèmes Physiques Non Linéaires Modélisés Par Bond Graph*. Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 1995.
- Rimaux et al. (1996)* S. RIMAUX, B. OULD-BOUAMAMA et G. DAUPHIN-TANGUY. Bond graph model of the shrink and swell phenomenon in a PWR nuclear power plant. In *IEEE-SMC, IMACS Multiconference CESA '96*, pages 288-292, Lille, France, 1996.
- Rosenberg & Andry (1979)*. Rosenberg, R. C. et A. N., Andry. Solvability of Bond Graph Junction Structures with Loops. *IEEE Trans. On Circuits and Systems*, vol. CAS-26, n°2, pp. 130-137.
- Rosenberg & Karnopp (1983)* R. C. Rosenberg, D. C. Karnopp. *Introduction to Physical System Dynamics*. Series in mechanical engineering, Marc Graw Hill, 1983.
- Rouchouse (1992)* G. Rouchouse. *Sûreté des Automatismes: Comment Assurer la Sécurité, la Disponibilité, la Maintenabilité des Automatismes Industriels?: les Méthodes Disponibles et les Réglementations*. Publications CETIM. Mécanique et Productique, 1992.
- Schizas (1981)* C. Schizas. *A Graph-Theoretic Approach For the Analysis of Large Scale Systems*. PhD thesis, Queen Mary College, 1981.
- Schizas & Evans (1981)*. C. Schizas, Evans, F.J. (1981). A Graph-Theoretic Approach to multivariable control system design. *Automatica*, vol. 17, n°2, pp. 371-377.
- Schiolds & Pearson (1976)* Schields, R.W., Pearson, J.B. (1976). Structural Controllability of Multi-input Linear Systems. *IEEE Trans. Aut. Control*, Vol. AC-21, n°2, pp. 203-212.
- Seidenberg (1956)* A. SEIDENBERG. An elimination theory for differential algebra. *University of California, Publication Mathematics*, 3:31-65, 1956.
- Shortliffe (1974)* E. H. SHORTLIFFE. Mycin: A rule-based computer program for advising physicians regarding anti-microbial therapy selection. *Memo AIM*, (251), 1974.
- Staroswiecki et al. (1990)* M. STAROSWIECKI, V. COQUEMPOT et J.P. CASSAR. Generation of analytical redundancy relations in linear interconnected system. In *IMACS Annals on Computing and Applied Mathematics Proceedings MIN-S2 90*, Brussels, 1990.
- Staroswiecki (1992)* M. Staroswiecki. *Les systèmes et le concept d'instrumentation intelligente*. Ingénieurs et scientifiques de France, le progrès technique (reprise de la communication aux entretiens de la technologie, Paris-CNIT- La défense 1992). pp 35-42, février1992.

- Staroswiecki et al. (1993)* M. Staroswiecki, J. P. Cassar, V. Cocquempot, *A general Approach for Multicriteria Optimization of Structured Residuals*. Tooldiag'93, Toulouse, France, vol2, pp800-807, april5-7 1993.
- Staroswiecki (1994)* M. Staroswiecki. *La problématique et les approches de la surveillance des systèmes technologiques*. Journées d'Etude S3: sûreté, surveillance, Supervision. Détection et localisation de défaillances. GDR automatique. Paris 17-18 novembre 1994.
- Staroswiecki (1997)* M Staroswiecki. *Cours de DEA: Analyse structurelle*. Rapport Technique, Université des Sciences et Technologies de Lille1, 2002.
- Staroswiecki & Contet-Verga (2001)* M. STAROSWIECKI et G. CONTET-VERGA. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37:687-699, 2001.
- Sueur (1990)* C. Sueur. *Contribution à la modélisation et à l'analyse des systèmes dynamiques par une approche bond graph*. Application aux systèmes poly-articulés plans à segments flexibles. Thèse de doctorat, Université de Lille I , France1990
- Sueur & Dauphin-Tanguy (1989)* Sueur, C. and Dauphin-Tanguy, G. (1989). 'Structural controllability/ observability of linear systems represented by bond graphs'. *Journal of the Franklin Institute*, 326(6):869-883.
- Sueur & Dauphin-Tanguy (1991)* C. SUEUR et G. DAUPHIN-TANGUY. Bond graph approach for structural analysis of MIMO linear systems. *Journal of the Franklin Institute*, 328(1):55-70, 1991.
- Tagina (1995)* M. TAGINA. *Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 1995.
- Tagina et al. (1995a)* M. TAGINA, J.P. CASSAR, G. DAUPHIN-TANGY et M. STAROSWIECKI. Monitoring of systems modelled by bond graph. In *ICBGM'95. International Conference on Bond Graph Modeling*, pages 275-280, Las Vegas, 1995.
- Tagina et al. (1995b)* TAGINA M. MOSIEK, D. et G. DAUPHIN-TANGUY. Determination of a computational method for the generation of analytical redundancy relations using a bond graph approach. In *ESS'95*, Erlangen, October 1995.
- Thoma (1975)* J.U. THOMA. Problèmes thermodynamiques des machines hydrauliques. *Energie Fluide*, (1):61-66, 1975.
- Thoma (1990)* J.U. THOMA. *Simulation by Bondgraphs. Introduction to a Graphical Method*. Springer -verlag, Berlin Heidelberg, 1990.
- Thoma & Ould Bouamama (2000)* J. U THOMA et B. OULD BOUAMAMA. *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach*. Springer Verlag, 2000.
- Tylee (1983)* L. TYLEE. Pseudo bond graph representation of PWR pressurised dynamic. *Trans. ASME J. Daic Sys. Measure Control*, 105:255-261, 1983.
- Venkatasubramanian (2001)* V. VENKATASUBRAMANIAN. Process fault detection and diagnosis: Past, present and futur. In *Proceedings of 4th IFAC Workshop on "on-Line Fault Detection and Super-vision in the Chemical Process Industries*, pages 3-15, Jejudo Island, South Korea, June 7-8 2001. IFAC.
- Vergé & Jaume (1994)* M. VERGE et D. JAUME. Fault detection and bond graph modeling. In *Ifac Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 748-753, Espoo, Finland, June 1994.
- Wang & Likens (1996)* H. WANG et D. LINKENS. Intelligent supervisory control. *World scientific series in Robotics and intelligent Systems*, 14, 1996.
- Willems (1986)* Willems, J. L. Structural controllability and observability. *Systems and Control Letters*, 8, pp. 5-12.

*Willky (1976) A. S. Willky. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. Automatica, Vol 12, pp 601-611, 1976.*

*Zwinglestein (1995) G. Zwinglestein. Diagnostic des défaillances: Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermès, Paris, hermès édition, 1995.*

## **SURVEILLABILITÉ STRUCTURELLE ET PLATITUDE POUR LE DIAGNOSTIC DES MODÈLES BOND GRAPH COUPLÉS**

Des modules de supervision à base de modèle Bond Graph (BG) sont conçus pour les procédés énergétiques présents dans les industries à risques. Le BG comme outil multidisciplinaire est bien adapté à cause de la mise en jeu des énergies de nature diverse. Cet aspect de couplage (énergie, chimique...) rend les modèles dynamiques fortement non linéaires.

La génération systématique de modèles linéarisés des procédés complexes est considérée, le BG global d'une installation est directement obtenu à partir du Plan d'Instrumentation Détaillé (PID). Ces modèles sont valides car les processus thermofluides réels sont en général régulés autour d'un point de fonctionnement.

Les paramètres (coefficients hydrauliques, coefficients d'échange thermique...) n'étant pas toujours connus, la détermination directe des propriétés structurelles (commandabilité, observabilité, surveillabilité) des BGs sans calcul préalable est utile pour la FDI (Fault Detection and Isolation).

Dans un premier temps, les modèles linéarisés sont exploités pour l'étude de la surveillance. Avant n'importe quelle implémentation industrielle (ou ajout de capteurs), la surveillabilité des composants, des actionneurs et des capteurs est considérée sans générer les Relations de Redondance Analytiques (RRA).

Dans un second temps, le modèle bond graph non linéaire est utilisé pour la conception des systèmes de surveillance. En génie des procédés, il est possible d'identifier la catégorie des composants (actionneurs hydrauliques, capteurs thermiques, etc..) à laquelle appartient l'élément défaillant. La surveillabilité de défauts simultanés d'actionneurs est considérée par une approche de platitude directe et générique.

**Mots-clés :** Bond graphs, Génie des procédés, Multiénergies, Multiport, Thermodynamique, Analyse structurelle, Surveillance, Platitude.

---

---

## **STRUCTURAL MONITORABILITY AND FLATNESS FOR THE DIAGNOSIS OF COUPLED BOND GRAPH MODELS**

The model based monitoring modules of energy processes present in risky industries are conceived using the Bond Graph model (BG). Because of the multi-domain energies involved in such processes, the use of BG as a multidisciplinary tool is well adapted.

Dynamic models in process engineering industry are strongly non-linear because of the coupling of different energies (thermal, chemical...).

The systematic generation of linearized models of a complex process is considered, the BG of any installation is directly obtained starting from the Process and Instrumentation Diagram (PID). While the real variables in industry are controlled, the processes mainly run around the operating regime and therefore the linearized models can be considered valid.

The parameters of models (hydraulic coefficients, thermal exchange coefficients ...) are not known. Consequently, the determination of structural properties directly from BGs without need of calculation is useful for FDI (Fault Detection and Isolation).

Initially, the linearized models are exploited for the monitoring study. Before any industrial implementation (or addition of sensors), the diagnosability of components, actuators and sensors is considered without the Analytical Redundancy Relations (ARR) generation.

In the second part of our research, the nonlinear BG is used for the design of monitoring systems. Thanks to the characteristic of process engineering models, it is possible to identify the category of the components (hydraulic actuators, thermal sensors...) to which the faulty element belongs. The monitorability of the simultaneous faults on actuators is then considered by a direct and generic approach using flatness.

**Keywords :** Bond graphs, Process Engineering, Multienergy, Multiport, Thermodynamics, Structural Analysis, Monitoring, Flatness.