



HAL
open science

Modélisation et supervision des systèmes en génie des procédés - approche bond graphs

Belkacem Ould Bouamama

► **To cite this version:**

Belkacem Ould Bouamama. Modélisation et supervision des systèmes en génie des procédés - approche bond graphs. Génie des procédés. Université des sciences et technologies de Lille 1, 2002. <tel-01736792>

HAL Id: tel-01736792

<https://hal.science/tel-01736792v1>

Submitted on 18 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

N° d'Ordre : H360

Université des Sciences et Technologies de Lille

Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille
UMR CNRS 8021

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Automatique

MODÉLISATION ET SUPERVISION DES SYSTÈMES EN GÉNIE DES PROCÉDÉS – APPROCHE BOND GRAPHS

Par :

Belkacem OULD BOUAMAMA

Ph.D

Maître de conférences à l'IUT "A", Université de Lille 1

Soutenue le 10 décembre 2002 devant le jury composé de :

- Rapporteurs** Professeur Jean Pierre CORRIOU, INP de Loraine, Nancy
 Professeur José RAGOT, Université de Nancy1
 Professeur Serge SCAVARDA, INSA de Lyon
- Directeurs de
Recherche :** Professeur Geneviève DAUPHIN-TANGUY, ECLille
 Professeur Marcel STAROSWIECKI, Université de Lille 1
- Examineurs** Professeur Alain RICHARD, Université de Nancy 1
 Professeur Gilles FEVOTTE, UCB Lyon1, LAGEP
 Professeur Gérard ANTONINI, Université de Compiègne (UTC)
- Invité :** Sylvie CAUVIN, Institut Français du Pétrole (IFP)

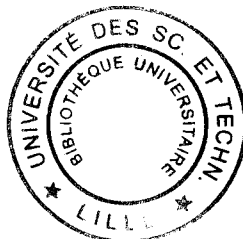


Table des matières

Dédicaces	1
Remerciements	2
Notations et symboles utilisés	3
Introduction	5
Partie I RAPPORT DE SYNTHÈSE	9
Curriculum Vitae	11
1 État civil	11
2 Titres universitaires	12
3 Déroulement de carrières	12
1 Activités pédagogiques	14
1.1 Point de vue sur l'automatique	14
1.2 Fonctions pédagogiques antérieures (1988-1994)	15
1.3 Fonctions Pédagogiques actuelles (1994-présent)	16
1.4 Conclusion	20
2 Responsabilités collectives	21
2.1 Responsabilités antérieures (1988-1994)	21
2.2 Responsabilités actuelles (1997-présent)	21
3 Animation et recherche	22
3.1 Présentation du laboratoire LAIL	22
3.2 Positionnement	23
3.3 Production scientifique	25

3.4	Encadrements	25
3.4.1	Stages de DEA	25
3.4.2	Co-encadrement de thèses	27
3.4.2.1	Thèses soutenues	27
3.4.2.2	Thèses en cours	28
3.4.3	Participation à des jurys de thèse de doctorat	30
3.5	Thématiques de recherche	30
3.5.1	Travaux antérieurs en Russie et en Algérie	30
3.5.2	Travaux actuels	32
3.5.2.1	Thème 1 : Modélisation par bond graph en génie des procédés	32
3.5.2.2	Thème 2 : Surveillance des procédés à l'aide des modèles bond graph à énergies couplées	34
3.5.2.3	Conception d'un système de supervision	37
3.6	Activités contractuelles	39
3.7	Rayonnement, collaborations, et valorisation	43
3.7.1	Niveau local	43
3.7.2	Niveau régional	43
3.7.3	Niveau national	44
3.7.4	Niveau international	45
4	Liste des publications	47
4.1	Publications actuelles (1997-2002)	47
4.1.1	Publications de recherche	47
4.1.2	Publications pédagogiques	55
4.2	Publications antérieures (1988-1994)	56
Partie II	MEMOIRE DE RECHERCHE	59
5	Commande et Modélisation des Processus Chimiques	61
5.1	Contexte	61
5.2	Application au traitement des gaz soufrés	62
5.3	Application aux procédés de production des détergents	65
5.4	Conclusion	66

6	Modélisation par bond graph en génie des procédés	68
6.1	Bond graph thermodynamique et chimique	68
6.2	Bond graphs en électrochimie - application à la pile à combustible SOFC	71
6.2.1	Positionnement	71
6.2.2	Modèle bond graph de la réaction électrochimique	73
6.3	Modélisation des générateurs de vapeur	77
6.3.1	Problématique	77
6.3.2	Modèle bond graph	78
6.3.3	Modèle à base d'Equations à Dérivées Partielles	79
6.4	Linéarisation des bond graphs à énergies couplées	81
7	Surveillance des procédés à l'aide des modèles bond graphs à énergies couplées	85
7.1	Problématique	85
7.2	Application de la redondance analytique au diagnostic des processus thermofluides	86
7.3	Pourquoi les Bond Graphs pour la surveillance en génie des procédés? . .	87
7.4	Positionnement dans la communauté	88
7.5	Surveillabilité des sources à partir des modèles BG à énergies couplées linéarisés	90
7.6	Génération des RRAs formelles des composants thermofluides	92
7.6.1	Positionnement	92
7.6.2	Cahier des charges	93
7.6.3	Représentation bond graph d'un système de surveillance	93
7.6.4	Algorithme de génération des RRAs	98
7.6.4.1	RRAs du système énergétique	100
7.6.4.2	RRAs des régulateurs	107
7.6.4.3	RRAs des sources contrôlées	107
7.6.5	Surveillabilité des composants thermofluides	107
7.6.5.1	Matrice des signatures de fautes du composant	107
7.6.5.2	Matrice des signatures de fautes du processus global . .	108
8	Contribution à la conception d'un outil de supervision	110
8.1	Problématique	110
8.2	Conception d'un générateur de modèles en génie des procédés pour leur diagnostic	110
8.2.1	Positionnement	110

8.3	Intégration des modèles fonctionnels et des modèles bond graphs	113
8.3.1	Application au diagnostic des actionneurs intelligents	114
8.3.2	Application au filtrage d'alarmes	119
9	Conclusion générale et Perspectives	121
9.1	Conclusions générales	121
9.2	Perspectives	123
A	Générateur de RRAs : Application à un site pilote	126
A.1	Fonctionnalités du logiciel par un exemple pédagogique	126
A.1.1	Construction du modèle architectural valide	126
A.1.2	Génération du modèle d'état dynamique	127
A.1.3	Génération des RRAs	128
A.1.4	Analyse de la surveillabilité	129
A.2	Application sur une installation pilote de génération de vapeur	130
A.2.1	Description du processus	130
A.2.2	Modèle architectural	132
A.2.3	Génération des RRAs	132
A.2.4	Surveillabilité de l'installation	134
A.3	Conclusion	135
	Bibliographie	136
	Partie III PUBLICATIONS SELECTIONNEES	147
	Publications sélectionnées	149
1	Thème 1 : Modélisation par bond graph	149
2	Thème 2 : Surveillance	149

Dédicaces

*A Souheir mon épouse, pour son soutien permanent, son réconfort et sa grande patience,
Pour mes enfants Fouzi, Nassim et **Sirine** née en pleine préparation de ce mémoire.
A mes beaux parents pour avoir géré cet heureux événement, et sans qui ce mémoire n'aurait
avancé d'un iota.*

*A mon père "...ça restera comme une lumière qui me tiendra chaud dans mes hivers,
un petit feu de toi qui ne s'éteint pas."... (S. Brewski).
Papa, tu peux te reposer en paix,
Ma mère a honoré le testament, elle a fait de moi ce que tu souhaitais que je sois, **Pour toi
ma chère Mère.***

A Mon frère aîné Ahmed, mon guide spirituel, sans qui je ne serai ce que je suis aujourd'hui.

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille (LAIL-UMR 8021) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et de l'École Centrale de Lille, sous la Direction scientifique de Geneviève DAUPHIN-TANGUY, Professeur à L'École Centrale de Lille (ECLille) et de Marcel STAROSWIECKI, Professeur à l'École Polytechnique Universitaire de Lille (EPUL) (ex EUDIL).

Je tiens à les remercier individuellement.

Geneviève Dauphin-Tanguy, tu m'as accueilli au sein de ton équipe ce 1^{er} février 1994 en qualité de professeur invité à l'École Centrale, tu m'as alors fait découvrir ce magnifique outil qu'est le bond graph. Je mesure encore mieux aujourd'hui qu'hier la chance de faire partie de ton groupe. Tes qualités et compétences scientifiques n'ont d'égales que tes qualités humaines, alors encore une fois, Merci Geneviève.

Marcel Staroswiecki, tu m'as permis ce 1^{er} septembre 1995 d'intégrer ton équipe en qualité de maître de conférences associé à l'École Polytechnique Universitaire de Lille. Merci pour l'aide précieuse que tu m'a apportée durant ces années, tant par tes conseils que par la confiance que tu m'as accordée. Tes multiples connaissances sont pour moi source intarissable d'inspiration. Merci, Marcel.

Je tiens aussi à remercier individuellement Mesdames et Messieurs les membres du jury, pour m'avoir fait l'honneur de juger mon travail. Soyez assurés de ma plus profonde reconnaissance pour l'attention et les critiques que vous avez portées à ce modeste manuscrit.

Je tiens aussi à remercier très cordialement mes collègues du LAIL, de l'IUT "A", de l'EPUL, et de l'ECLille pour la sympathie et l'amitié que vous m'avez accordées. Merci mes amis... et n'en doutez pas, la ballade n'est pas terminée.

Enfin, Merci Souheir, Fouzi, Nassim et Sirine d'accepter le peu de disponibilité que je vous accorde.

Notations et symboles utilisés

Symbole	Description
ADER	Association Des grandes Ecoles de la Régions Nord Pas de Calais
BG	Bond Graph
CI	Congrès internationaux avec comité de sélection et actes
CN	Conférences Nationales avec comité de sélection et actes
DC	Diffusion de la Connaissance
DSS	Decision Support System
ECLille	École Centrale de Lille
EDF	Electricité de France
EPUL	École Polytechnique Universitaire de Lille
INHC	Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie
IFP	Institut Français du Pétrole
NI	Notes Internes
OC	Chapitres d'ouvrages Collectifs
OS	Ouvrages de Synthèse
REP	Réacteur à Eau Pressurisée
RI	Revue internationale à comité de lecture
RN	Revue nationale à comité de lecture
RC	Rapports de fin de Contrats industriels
PP	Supports de cours Pédagogiques
TH	Thèses

Introduction

Les deux missions les plus nobles de l'Homme sont probablement d'accroître la connaissance et de transmettre la connaissance « Jean Bernard. ». Alors, on doit être fier d'être enseignant-chercheur. Malgré les difficultés à faire cohabiter ces deux professions, leur alchimie est pourtant irremplaçable, car ces deux activités s'enrichissent mutuellement. La jubilation que je ressens en faisant de la recherche et surtout celle qui aboutit à une application n'a d'égal que le plaisir que j'ai à transmettre à mes étudiants ce que j'ai pu acquérir de connaissance.

Je vais alors présenter mes activités d'enseignement et de recherche effectuées principalement à l'Université des Sciences et Technologies Lille1 IUT "A", Département GEII, dans ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). *Ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille (LAIL-UMR 8021) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et de l'École Centrale de Lille, sous la Direction scientifique de Geneviève DAUPHIN-TANGUY et de Marcel STAROSWIECKI, Professeurs respectivement à L'École Centrale de Lille (ECLille) et à l'École Polytechnique Universitaire de Lille (EPUL) (ex EUDIL).*

Les formats de mémoire d'HDR sont très différents. Ils peuvent aller d'une simple compilation d'articles à un rapport scientifique très détaillé. Pour ma part, j'ai opté pour une présentation chronologique de mes travaux autour de deux thèmes majeurs, nécessairement liés, qui ont rythmé ma vie de chercheur. Il s'agit, d'une part de *la modélisation et la commande de processus chimiques* et d'autre part *la modélisation et la supervision des systèmes en génie des procédés à l'aide de la méthodologie bond graph*.

Ces deux thèmes de recherche ont été développés dans deux périodes distinctes de ma vie.

- *La première étape (1988-1994).* Après ma soutenance de thèse en 1987 à l'Académie du Pétrole et Gaz de Moscou, j'ai exercé en qualité d'enseignant chercheur titulaire et chef de département dans une école d'ingénieurs, Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie, INHC de Boumerdés, en Algérie de 1988 à décembre 1993, date à laquelle j'ai quitté précipitamment le pays (car ne pouvant plus remplir une des missions morales importantes d'un enseignant chercheur, qu'est la défense de la laïcité à l'université).

Mes travaux de recherche pendant cette période concernent la commande et la modélisation des processus chimiques. Une bonne expérience dans ce domaine a été acquise. Je présenterai brièvement ces activités de recherche et pédagogiques dans le document.

- *La deuxième étape (1994-présent)*. Arrivé en France, j'ai intégré le LAIL, initialement en qualité de professeur invité et ATER à l'EC de Lille en février 94 (05mois) puis de maître de conférences associé à l'EUDIL (1995-1997) et enfin en qualité de titulaire en 1997 à l'IUT "A". Depuis 1997 (date officielle de mon intégration au LAIL), j'ai développé une activité de recherche autour de deux pôles dont le fil conducteur est l'utilisation de la méthodologie Bond Graph : la *modélisation et la surveillance en génie des procédés*. **Cette thématique a donné lieu à une opération transversale au sein du LAIL que je dirige depuis 1998**. J'ai évolué depuis dans ce cadre grâce aux sujets de recherche qui se sont développés et ceci au gré d'idées personnelles, mais aussi de la contribution des jeunes chercheurs, des rencontres et de l'opportunité des nombreux contacts industriels et de personnalités scientifiques internationales.

Ce document sera organisé en trois grandes parties :

1. **La première partie** est un résumé de mes activités de recherche, notamment la définition d'une thématique, le projet de création d'une équipe autour de cette thématique. Le texte sera alors essentiellement rédigé à la première personne. Ma mission étant aussi d'un enseignant, je présenterai alors aussi dans cette partie mes activités pédagogiques, d'un point de vue plus large que le strict enseignement académique. J'exposerai alors ma réflexion sur l'enseignement de l'automatique. Dans cette partie sont présentées :
 - mon curriculum vitae succinct retraçant ma carrière et mes diplômes,
 - mes activités d'enseignements et d'organisation pédagogiques (antérieures et actuelles),
 - mes responsabilités collectives,
 - mon animation de recherche, où je fais apparaître mes implications en recherche et dans son organisation (encadrement, activités contractuelles, rayonnement,...),
 - et enfin la liste de mes publications de recherche et pédagogiques.
2. **La deuxième partie** de ce document présente une synthèse scientifique des principaux résultats de recherche sous une présentation cohérente. Ce document tente d'inscrire les différents travaux réalisés dans un cadre plus large qui comprend d'une part la modélisation des processus en génie des procédés et d'autre part l'utilisation de ces modèles bond graph pour la supervision des processus. Pour la modélisation en génie des procédés par la méthodologie bond graph, les principales contributions sont les suivantes :

- La commande et la modélisation des procédés chimiques en vue de diminuer le taux de pollution (dans le cadre de mes travaux antérieurs que j'exposerai brièvement).
- L'utilisation de l'outil bond graph couplé pour leur application à la modélisation des processus thermodynamiques et chimiques.
- La modélisation des générateurs de vapeur à l'aide des Equations à Dérivées Partielles et bond graph, permettant une description dynamique en termes d'entrées sorties adaptée pour la commande, l'évolution spatiale du titre et la modélisation par bond graph des phénomènes de gonflement et tassement.
- La linéarisation des bond graphs couplés.

Les outils de modélisation développés sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes de supervision en génie des procédés. Une application à une installation pilote de génération de vapeur d'un outil logiciel pour la génération formelle des modèles dynamiques et des RRAs est exposée dans cette partie. La contribution à la supervision des processus en génie des procédés à l'aide de l'outil bond graph concerne :

- la surveillabilité des actionneurs à partir des modèles bond graph couplés linéarisés sans la détermination préalable des RRAs,
- la génération formelle des RRAs des composants thermofluides,
- la conception d'un système de supervision avec un point de vue détection et isolation des fautes, par une génération automatique des modèles et des RRAs des processus industriels, et un point de vue tolérance aux fautes, grâce à l'intégration des modèles fonctionnels et bond graph pour la reconfiguration et le filtrage d'alarmes des processus.

3. Enfin la **troisième partie** est consacrée à une réflexion sur les perspectives de mes travaux de recherche.
4. En annexe, sont fournies les copies de quelques articles les plus représentatifs des thèmes de recherche développés. Ils ont tous fait l'objet d'applications industrielles dans le cadre de projets industriels nationaux (EDF, CEA, Sherpa Engineering) et de contrats européens (CHEM, DAMADICS) dont quelques applications sont données aussi en annexe.

Enfin comme le texte officiel m'en offrait la possibilité¹, j'ai renvoyé la description technique de mes différentes thématiques de recherche (développées dans la partie 2) aux publications sélectionnées en annexe de ce document. Seules les thématiques qui n'ont pas encore fait l'objet de publications seront plus largement développées.

1. "Le dossier de candidature comprend soit un ou plusieurs ouvrages publiés ou dactylographiés, soit un dossier de travaux, accompagnés d'une synthèse de l'activité scientifique du candidat permettant de faire apparaître son expérience dans l'animation d'une recherche", Article 4 de l'Arrêté du 23 novembre 1988.

Mots-clés

Bond graph, modélisation, génie des procédés, supervision, redondance analytique, diagnostic, modèle structurel, modèle fonctionnel, générateur de vapeur, thermofluide, redondance analytique, thermodynamique.

Première partie

RAPPORT DE SYNTHÈSE

Curriculum Vitae

1 État civil

Nom : OULD BOUAMAMA

Prénom : Belkacem

Date et lieu de naissance : 20 août 1957 à Gouraya, Algérie

Nationalité : Française

Situation familiale : Marié, 3 enfants

Adresse professionnelle : Université des Sciences et Technologies de Lille
Bât. EUDIL, LAIL UMR CNRS 8021
59655 Villeneuve d'Ascq

N° de téléphone : (33) 3 20 33 71 39, Mobile: 06 67 12 30 20

N° de fax : 33) 3 20 33 71 89

E-mail : belkacem.bouamama @univ-lille1.fr

Adresse personnelle : 1, rue de la Jonchère
59262 Sainghin en Mélantois. Tél. 03 20 60 05 55

Fonction actuelle : Maître de Conférences (1^{re} classe depuis 2000) à
I.U.T. "A" de Lille, Département
Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII)

Discipline : Automatique, 61^{ème} section

Langues parlées : Français, russe, anglais, arabe.

2 Titres universitaires

- **1977-82: Ingénieur d'État en Automatisation des Procédés Industriels.** Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie (INHC), Algérie. Classé, Major de promotion, j'ai bénéficié d'une bourse d'état pour une thèse de Ph.D en CEI (ex URSS).
- **1982-87: Docteur es Sciences (Ph.D) en Automatisation des procédés Industriels.** Les travaux de recherche ayant conduit à la soutenance de la thèse (en russe), ont été réalisés au laboratoire d'Automatisation des Procédés de Production ("Abtomatizasia Promichlinik Processov, APP") à l'académie pétrole et gaz "Goubkine" à Moscou. La mention était : La plus grande distinction (à l'unanimité)², une mention équivalente en France à : "très honorable avec félicitations du jury"

3 Déroulement de carrières

- **1988-94: Enseignant Chercheur et chef du département d'automatique.** INHC, (Algérie): établissement public de l'enseignement supérieur, Recherche: Laboratoire d'Identification, Modélisation et Commande des Processus Chimiques.
- **1994-95.**
 - (Février 94 - Mai 94): Professeur invité. ECLille. Recherche: j'ai rejoint (en cohérence avec mon profil de recherche) l'équipe Bond Graph dirigée par le Professeur Geneviève Dauphin-Tanguy au laboratoire LAIL UMR CNRS 8021.
 - (Mai 94-Octobre 94): Professeur contractuel. Ecole Supérieure de Commerce de Lille (ESC). A la fin du contrat de professeur invité à l'ECLille, j'ai obtenu un poste de Professeur contractuel à l'ESC. En recherche, j'ai continué à travailler avec l'équipe Bond Graph. Pendant cette période, considérée plutôt comme une conversion thématique, j'ai étudié l'approche bond graph pour la modélisation en génie des procédés.
 - (Octobre 94-Avril 95): Sans emploi, mais continue à "travailler" au LAIL avec l'équipe Bond Graph
 - (Avril 95-juillet 95): ATER ECLille. Suite à un besoin en modélisation du site pilote de générateur de vapeur du laboratoire, une collaboration avec l'équipe SFSD dirigée par le professeur Marcel Staroswiecki, est apparue pour la modélisation par bond graph de cette installation. Durant cette année j'étais qualifié au poste de maître de conférences section 61.
- **1995-1997: Maître de conférences associé 1er classe 6ème échelon.** *École Polytechnique Universitaire de Lille (ex. EUDIL).* Ces travaux ont pu se poursuivre grâce à un poste de maître de conférences associé que j'ai occupé à plein temps de 1995 à

2. Rapport de soutenance (en russe) N° 7 du 22/12/1987 du conseil scientifique D 053.27.10

1997. Depuis cette date, je suis membre du laboratoire: 50% équipe bond graph et 50% équipe Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques (SFSD).

- **1997 : Maître de conférences titulaire 2ème classe 1er échelon. I.U.T. "A" de Lille, Département Génie Electrique et Informatique Industrielle (GEII), 1er classe depuis 2000.**

Chapitre 1

Activités pédagogiques

« *Après le pain, l'éducation est le premier besoin d'un peuple* ». Danton

1.1 Point de vue sur l'automatique

La discipline 'automatique' est noyée aujourd'hui dans les techniques modernes de commande, robotique, productique etc., en raison surtout de l'apparition de l'électronique, puis vers les années 60 du microprocesseur et donc de l'informatique. Aujourd'hui, les mécaniciens souhaitent parrainer l'automatique car la robotique c'est l'automatique disent-ils et les informaticiens ont les mêmes ambitions car l'informatique industrielle est leur apanage. Même les spécialistes des mathématiques appliquées prétendent que l'automatique n'est que "l'application" des mathématiques (régule-t-on réellement une équation différentielle ou son objet associé?). Et l'automatique dans tout ça?.

L'automatique risque un jour de disparaître si on continue à se limiter à considérer uniquement le modèle décisionnel dans les systèmes automatisés. La modélisation (cadre de l'activité tangible) est souvent présentée d'une façon très légère alors que la modélisation exige dans les projets de l'automatisation d'une unité 50 à 80% du temps nécessaire de l'étude. Combien de fois n'avons nous pas observé des étudiants proposer des correcteurs PI pour réguler des processus intégrateurs. *Bien plus, si les vieilles techniques de la régulation classique restent encore très utilisées dans des industries aussi complexes que le nucléaire par exemple, c'est parce qu'on est encore incapable de produire des modèles précis nécessaires à l'application de commandes avancées. La théorie en automatique avance bien plus vite que son application et cela, parce que les moyens informatiques sont plus 'performants' que la connaissance du système à traiter, c'est à dire le modèle mathématique, nécessaire pour la réalisation de la commande dite moderne.* Le manque de collaboration des communautés "génie des procédés" et "automatique" peut être une explication de cette situation³. Généralement dans les univer-

3. Les uns reprochent aux autres d'élaborer des modèles soit trop statiques soit trop dynamiques (discussion

sités et même dans des écoles d'ingénieurs, le modèle mathématique (sur lequel on applique toute une panoplie de stratégies de commande) est donné sous forme d'équations (d'état, fonction de transfert ...) et dans les meilleurs des cas de circuits électriques, car souvent (à mon avis), les automaticiens sont issus des départements génie électrique et donc familiers avec ce type de système.

Sans aucun esprit corporatiste, dans le but d'élargir le domaine des matières et connaissances inhérentes à l'automatique, je réserve une large place à la modélisation dans mes différents cours relatifs à l'automatique. Cette matière est toujours enseignée en amont pour acquérir une vision " systémique" d'un système de commande. L'automaticien doit être placé au coeur du procédé pour vivre et sentir en direct les échanges d'information et donc décider de la bonne stratégie de décision.

Les concepts de la contre réaction (feed back), de l'auto adaptation, de la stabilité ... doivent dépasser les seules applications aux systèmes de production et aller conquérir les champs de l'économie, société, politique, ...C'est dans cet esprit que j'ai été amené à assumer un grand nombre d'enseignements d'automatique appliquée dans des écoles aussi variées que celles de commerce, de chimie, ou de la marine.

Mes enseignements ont concerné les trois parties d'un système automatisé : le système décisionnel (commande linéaire, non linéaire, Grafset, optimisation, ...), la partie informationnelle (capteurs) et enfin et surtout la connaissance de la partie opérante (modélisation, identification, bond graph). J'ai été amené à adapter mes cours en fonction du profil (varié) des étudiants. Un certain nombre de supports de cours ont été réalisés (dont celui de régulation, disponible sur internet et qui est largement consulté (<http://www.univ-lille1.fr/eudil/belk/sc00a.htm>) (voir liste chap. 4).

1.2 Fonctions pédagogiques antérieures (1988-1994)

1. Principaux enseignements effectués

J'ai exercé mes activités d'enseignant chercheur titulaire de 1988 à décembre 1993 à l'Institut National des Hydrocarbures et de la Chimie de Boumerdés (INHC) situé à 50 kms à l'est d'Alger. L'INHC (actuellement université) créé en 1964 est une école d'ingénieurs pour la formation de cadres dans le domaine de l'industrie du pétrole et du gaz. Elle forme annuellement en moyenne 200 ingénieurs d'état dans diverses spécialités technologiques (automatisation des procédés, géophysique, génie chimique, ...). Une structure de recherche industrielle et une formation doctorale (en magistère) sont assurées par plusieurs départements composant l'INHC, entamée avec les professeurs A. Lallemand et B. Spinner Directeur du Programme Energie CNRS dans le cadre du programme PRI).

y compris par celui de l'automatique et génie électrique dont j'ai assumé la responsabilité jusqu'à décembre 93, date à laquelle j'ai intégré l'enseignement supérieur en France.

- En deuxième cycle. *Régulation et instrumentation industrielle (C: 20h, TD: 4h, TP: 8h), Systèmes asservis linéaires et non linéaires (C: 50h, TD: 20h), Identification et modélisation des systèmes (C: 24h, TD: 8h, TP: 8h), Systèmes asservis non linéaires (TP: 30h). Des travaux pratiques sur la simulation analogique, que j'estime plus pédagogique que les simulateurs numériques (machine EAI 1000) de ces systèmes ont été réalisés. Deux brochures ont été produites pour ce travail [OUL92_PP], [ZEL93_PP], 1989-1992: Systèmes logiques (C: 20h, TD: 8h, TP: 8h).*
 - En troisième cycle (magistère): La formation de magistère se déroule en deux années - une année théorique (équivalent du DEA) et une année d'initiation à la recherche pour la rédaction du mémoire. La post-graduation en automatique appliquée est ouverte en 1993. J'ai dispensé les cours magistraux suivants dans les départements d'automatique, génie chimique et génie mécanique: *Identification et modélisation des processus chimiques (30h), Méthodologie expérimentale (30h), Simulation et optimisation des processus (30h).*
2. **Participation à des programmes pédagogiques.** En qualité de chef de chaire (option) d'automatique, j'ai organisé l'actualisation des programmes pour la formation d'ingénieurs et de techniciens supérieurs en automatique en tenant compte de l'évolution de cette spécialité.
3. **Encadrement de projets de fin d'études.** Les projets de fin d'études pour élèves ingénieurs proposés par l'industrie et dont les principaux sont cités ci-dessous ont été réalisés sous mon encadrement: "*Commande adaptative de la température dans un four de synthèse*", "*Commande optimale de la combustion d'une chaudière*", "*Automatisation d'une station de pompage de pétrole*", "*Régulation de température d'un échangeur de chaleur*", "*Elaboration d'une nouvelle stratégie de commande afin d'augmenter le taux de conversion de SO₂ en SO₃*", "*Régulation de pression d'aspiration d'un compresseur basse pression*", "*Régulation de niveau dans un ballon de récupération LPG*", "*Commande optimale du procédé de production des détergents en vue de minimiser le taux de produits nocifs*".

1.3 Fonctions Pédagogiques actuelles (1994-présent)

1. **Ecole Centrale de Lille (1994-1995).** Arrivé en France le 30 décembre 1993, j'ai obtenu un poste de professeur invité (pour une durée de trois mois) à l'Ecole Centrale de Lille. Après avoir exposé mes travaux d'enseignement et de recherche, j'ai intégré l'équipe "Bond graph" dirigée par le professeur Geneviève Dauphin-Tanguy du laboratoire LAIL UMR CNRS 8021. J'ai découvert l'approche bond graph pour la modélisa-

tion des processus. J'ai suivi alors un certain nombre de cours (donnés par le professeur Dauphin-Tanguy) sur cette méthodologie.

2. **Ecole Supérieure de Commerce de Lille (1994-1995).** A la fin du contrat de professeur invité à l'EC de Lille, j'ai obtenu un poste de professeur contractuel à l'Institut Supérieur de Gestion Industrielle (ISGI), groupe de l'ESC. *Les cours magistraux que j'ai mis en place sont destinés aux cadres des entreprises industrielles en formation continue de troisième cycle pour la préparation d'un diplôme de Mastère.* Deux types d'enseignements ont été introduits. Le premier (que j'ai intitulé systémique) concerne principalement l'application de la théorie de l'automatique (stabilité, dynamique, adaptation etc..) aux systèmes économiques et le second développe les méthodes quantitatives de gestion et d'optimisation. La mise en équation dynamique des systèmes de gestion (offre et la demande, gestion des stocks, ...) permettant ainsi d'expliquer par exemple l'influence du temps de retard (de l'information) sur la stabilité du système de gestion d'un stock est une démarche que les économistes trouvent très rigoureuse et complémentaire à la théorie de Forrester. Dans le cadre de cette formation, j'ai produit deux supports de cours [OUL94a_PP], [OUL94b_PP] et encadré un certain nombre de projets de fin d'études dans ce domaine.
3. **Maître de conférences associé à l'EUDIL (1995-1997).** J'ai occupé le poste de maître de conférences associé à l'EPUL (ex EUDIL) au sein du département Informatique, Mesure et Automatique (IMA) de septembre 1995 à Août 1997. Je suis intervenu au niveau des enseignements pour les trois années et j'ai encadre chaque année en moyenne deux projets de fin d'études ingénieurs.

– **Enseignements effectués**

- 1995-1997: "Synthèse de Fonctions et Circuits Electroniques" SFCE (TD: 20h annuel) IMA 2. Les travaux dirigés concernent la synthèse et la réalisation de fonctions de transfert sur la base de Filtres (Cauer, Butterworth, Bessel etc.) et d'amplificateurs opérationnels de circuits électroniques.
- 1995-1997: "Automatique" (TP 150h annuel). IMA 1ere année. Deux types de TP sont assurés: l'Analyse et la synthèse des systèmes continus réalisés sur des simulateurs analogiques et les automatismes logiques (additionneur, compteurs, commande numérique d'un moteur, détection et correction d'erreurs).
- 1996-1997' "Automatique" (TD 20h annuel) IMA 1ere année. Analyse des systèmes continus linéaires, représentation par fonction de transfert, équation d'état.

- **Encadrement de projets d'ingénieurs.** Des projets autour du site pilote de génération de vapeur ont été encadrés: "Modélisation et simulation d'un site pilote de générateur de vapeur sur MATLAB-SIMULINK" "Identification d'un condenseur-échangeur", "Surveillance

d'un générateur de vapeur", "Commande multivariable d'un site pilote de générateur de vapeur", "Modélisation et commande d'un processus thermofluide multivariable", "Intégration de l'outil bond graph pour la surveillance des actionneurs intelligents, application à une vanne", "Supervision d'une installation pilote de génération de vapeur sous Panorama", "Le système Expert G2 pour la supervision de système thermofluides Application à générateur de vapeur"⁴.

D'autres projets d'ingénieurs avec l'Ecole HEI (Hautes Etudes Industrielles) ont été encadrés dans le domaine de la modélisation et surveillance d'une installation pilote hydraulique appartenant à HEI. Cette collaboration a fait l'objet d'une publication pédagogique présenté lors du colloque sur l'enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information (CETESIS-EEA). [AIT01_PP].

- **Participation à des programmes pédagogiques.** Dans le cadre du pôle "systèmes automatisés", j'ai participé activement au renouvellement des programmes d'automatique à l'IMA.

4. **Maître de conférences titulaire à l'IUT "A" de Lille** . Recruté à l'IUT en 1997, j'ai participé essentiellement aux enseignements d'Automatique en formation initiale dans deux départements (GEII et Biologie appliquée) et au sein de l'IUP QEPI (Qualité de l'Environnement et des Productions industrielles) en Optimisation et régulation industrielle. La structure de l'IUT exige une pédagogie particulière et très proche des étudiants. Comme tous les enseignants de l'IUT, j'ai encadré des stages en entreprise et des projets de réalisation en deuxième année. La structure IUP QEPI (dont la durée de formation de 3 ans devient cohérente avec le nouveau système européen 3, 5, 8). exige une pédagogie très professionnalisée mais proche d'une formation d'ingénieur. Les contenus des cours doivent être orientés sur des applications dans le domaine de la protection de l'environnement. *Depuis 1997, j'ai participé activement à l'habilitation de cette formation. Je suis responsable des enseignements SPI (Sciences Pour l'Ingénieur) (automatique, temps réel, optimisation, ...). J'ai créé un nouveau cours « Optimisation et simulation » pour cette formation*⁵.

- **Enseignements effectués**

- 1995-2002: J'ai continué à dispenser des cours à l'EPUL "Commande multivariable". (nombre d'heures annuel C: 10h, TD: 4h, TP: 4h) IMA 3. Ce cours est une synthèse

4. Après ma nomination à l'IUT "A" , j'ai continué à encadrer des projets d'ingénieurs et ce toujours dans le cadre de mes compétences : commande et surveillance en génie des procédés.

5. Mon expérience acquise (antérieurement) en recherche sur l'application de l'automatique à la protection de l'environnement m'a été d'un grand apport pour la formation QEPI. D'autre part l'introduction de méthodes de regression utilisées plutôt en automatique (récurive, à fenêtre glissante, pondérée) sont bien appréciées par cette communauté (62e section CNU) car leur processus sont bien non stationnaires.

- des méthodes d'analyse (formes canoniques, différentes réalisations, systèmes partiellement commandables...) et de synthèse (découplage, retour d'état, modèle interne etc.) appliquées aux systèmes multivariables (MIMO). La méthodologie de la modélisation par bond graph illustrée par des exemples concrets de systèmes MIMO (colonne de distillation, réacteur etc.) est exposée. *Des travaux pratiques de simulation (Matlab-simulink) sur la commande de systèmes multivariables (générateur de vapeur, réacteur chimique, mélangeur, rebouilleur) ont été créés. Un polycopié sur la modélisation par bond graph et le découplage par retour d'état et linéarisant est créé [OULO2_PP].*
- 1997-2002: "Régulation industrielle". (C:8h Td:10h) .IUP QEPI. Ce cours est présenté avec une approche pratique. Ainsi, en plus de l'outil mathématique nécessaire à la théorie de la commande et à la modélisation, un chapitre est consacré à la technologie et au réglage des régulateurs et l'autre à un projet de réalisation d'un système de régulation industrielle (cahier de charge, analyse et synthèse). Les limites de la régulation PID et des notions de régulation avancée sont données sur la base de simulation sur Matlab-Simulink d'exemples industriels réels dans le domaine de la protection de l'environnement. Dans le cadre de cette formation , un polycopié de 163 pages, adapté (en ajoutant des exemple dans le domaine de la protection de l'environnement) à ce type de formation a été produit sur la base du support [OUL97_PP] diffusé sur le réseau internet (<http://www.eudil.fr/eudil/belk/sc00a.htm>).
 - 1997-2002: "Optimisation et simulation" IUP QEPI (C: 16h Td:4h). Ce cours développe les points suivants : le traitement de données expérimentales en vue d'obtenir des modèles de régression du processus de production en différé et en temps réel (simples, récursives à fenêtre glissante ...), la planification d'expériences (choix d'un nombre optimal d'expériences, choix expérimental de l'optimum), *les techniques de simulations numériques (applications sur Matlab) et l'optimisation statique (application en vue de minimiser le taux de pollution d'un processus chimique)*. Des mini-projets sont chaque année réalisés.
 - 1997-2002: "Automates" IUT "A", Groupe Multimedia (C: 10h TD:15h). Ce cours concerne l'étude des automates programmables industriels (API) et les langages de programmation (grafcet, ladder).
 - 1997-2002: "Automatique des systèmes continus" IUT "A", Départements GEII et Biologie Appliquée (C:30h TD:18, TP 124, projets: 40h TP).
- **Mobilité des enseignants en Europe (programme SOCRATES)**. Dans le cadre de la mobilité des enseignants eu Europe, programme SOCRATES, j'ai assumé deux cours sur les bond graphs de 10h dans les universités européennes suivantes :
- mai 1999: Institut Polytechnique de Porto (Portugal) ISEP (10h)
 - mai 2000: Université de T.E.I of West Macedonia (Grèce) (10h)

- **Participation à des programmes pédagogiques.** J'ai participé en qualité de responsable des enseignements SPI (automatique, mathématique, informatique, temps réel, ...) aux programmes de l'enseignement de la formation IUP QEPI pour son habilitation en 1997. *Il était important pour ce type de formation que les enseignements soient proches des applications dans le domaine de l'environnement et du processus. A titre d'exemple les équations différentielles en première ne doivent pas être données sous forme de recettes pour leur résolution sans aucun sens physique à leur solution et à leur mise en équation.*
- **Mise en place en collaboration avec mes collègues de l'IUT de nouveaux TPs** dans le domaine du génie des procédés (régulation de niveau, simulation et régulation d'un réacteur sur Matlab-Simulink, ..).

1.4 Conclusion

Pendant la période (1988-94), j'ai acquis une expérience et des compétences certaines dans le domaine de la commande et la modélisation *appliquée aux procédés chimiques et pétrochimiques*. Cela m'est d'un grand apport aujourd'hui pour les applications de mes résultats de recherche (projet CHEM, DAMADICS, bond graph à énergies couplées, etc...) que je développerai plus loin. Mes activités d'enseignement en France ont été le prolongement de celles assumées antérieurement. Mon apport personnel dans cette activité au sein de l'université de Lille (EPUL, IUT "A" GEII, et IUP QEPI) est le développement des applications des outils de l'automatique (modélisation, commande, et l'approche bond graph) au génie des procédés. Le site pilote du générateur de vapeur du LAIL (dont je suis le responsable scientifique) a été au centre des applications de ces outils.

Chapitre 2

Responsabilités collectives

2.1 Responsabilités antérieures (1988-1994)

- 1991 -1992 : **Chef de chaire** (section automatique) INHC -Algérie. J'étais responsable de la section automatique dont l'objectif est pédagogique (élaboration de programmes, contrôle des enseignements..).
- 1992-déc. 93: **Chef de département** " Automatique et Génie électrique " INHC - Algérie. Le département Automatique et génie électrique, constitué de trois options (automatique, électromécanique et électrification) est composé de 20 enseignants et forme annuellement en moyenne 50 ingénieurs d'état dans les 3 options citées. En outre, en 1992 nous avons mis en place une structure de recherche dans le domaine de l'économie de l'énergie électrique et de l'automatique appliquée accueillant chacune 5 doctorants.
- 1992-déc.93: Responsable du projet de recherche *Identification, Modélisation et Commande Assistée par Ordinateur des processus industriels (IMCAO)*. Projet de recherche N°J3520/02/01/93, Projet d'un montant de 650.000 DA (10.000 Euros), d'une durée de trois ans impliquant 5 chercheurs.

2.2 Responsabilités actuelles (1997-présent)

1. Responsabilités liées à l'enseignement

- Responsable de la salle de Travaux Pratiques en Simulation par Matlab. IUT "A", GEII, Lille France.
- 1997-02: Responsable des enseignements Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) au niveau de l'IUP QEPI

2. Responsabilités liées à la recherche (voir section rayonnement et valorisation)

Chapitre 3

Animation et recherche

”Même quand on ne trouve rien, on renifle l’odeur de la vérité qui se cache”. Jean Rostand

3.1 Présentation du laboratoire LAIL

Le laboratoire d’Automatique et d’Informatique Industrielle (LAIL) créé en 1991, est une Unité Mixte de Recherche UMR CNRS 8021. Le laboratoire est implanté à l’Ecole Centrale de Lille et à L’Université des Sciences et Technologies de Lille¹. Il est composé de 38 chercheurs dont 18 HDR.

Les thématiques de recherche couvrent les domaines d’application relevant globalement de la commande, de la surveillance et de la supervision des Systèmes à Etat continu et des Systèmes à Evénements Discrets. Elles sont développées au sein de cinq équipes et trois opérations transversales (fig. 3.1).

Les grands axes applicatifs dans lesquels le laboratoire s’investit prioritairement sont : *le transport et les systèmes de production*. Le premier axe est important au niveau régional. Dans l’industrie du process, le laboratoire vise principalement l’industrie pétrolière, pour *employer ces compétences en modélisation et supervision des systèmes thermodynamiques*⁶.

L’organisation thématique des deux équipes (auxquelles j’appartiens) est donnée figure 3.2.

6. Rapport d’activité UPRESA CNRS 8021, Mars 2001, pp. 27-28

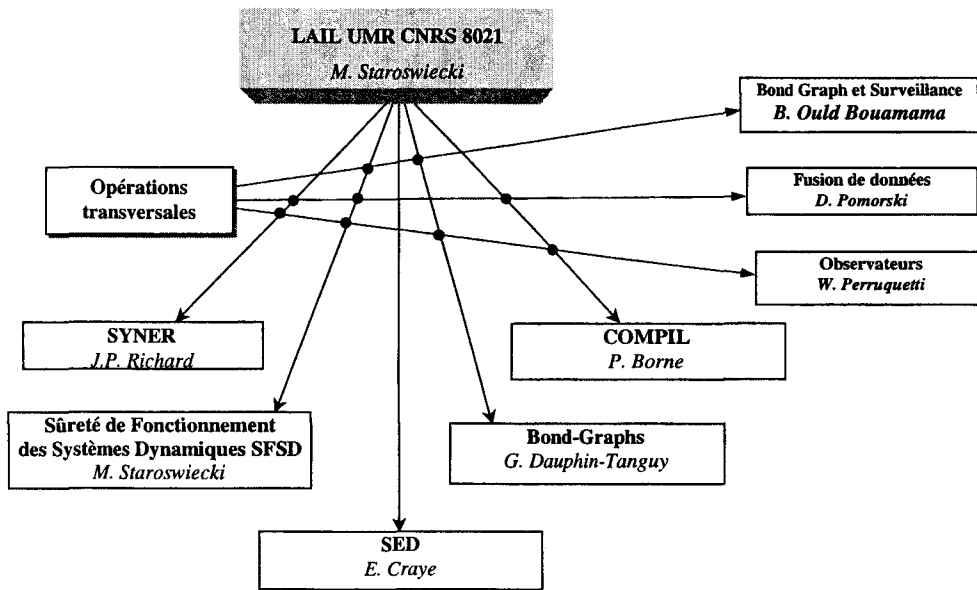


FIG. 3.1 – Organisation thématique du LAIL (UMR CNRS 8021)

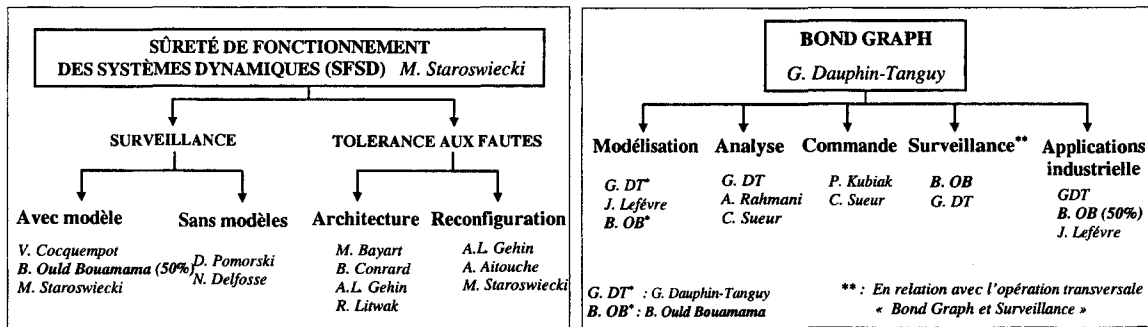


FIG. 3.2 – Organisation thématique des équipes SFSD et Bond Graph

L'équipe SFSD développe des modèles et des méthodes d'analyse pour la conception et la mise en oeuvre d'algorithmes destinés aux couches "surveillance, diagnostic et tolérance aux fautes".

L'équipe bond graph considère les modèles bond graph comme un outil d'aide à la conception intégrée, qui regroupe la modélisation, l'analyse, la commande, et la surveillance.

3.2 Positionnement

J'ai intégré initialement le LAIL en qualité de professeur invité (pour 3 mois) à l'Ecole Centrale de Lille. Compte tenu de mon profil de recherche dans le domaine de la modélisation et la commande des processus industriels, j'ai naturellement intégré l'équipe de Bond

Graph dirigée par le professeur Geneviève Dauphin-Tanguy. Après une reconversion thématique m'amenant à étudier l'outil bond graph, j'ai orienté mon axe de recherche (en cohérence avec mes compétences déjà acquises antérieurement en Russie puis en Algérie) vers l'utilisation des bond graphs à énergies couplées (mettant en jeu plusieurs énergies hydraulique, thermique et chimique) pour la conception de modèles dynamiques appliqués aux processus thermodynamiques et chimiques.

Suite à un besoin en modélisation d'un site pilote de génération⁷ de vapeur du laboratoire, ces travaux ont pu se poursuivre grâce à un poste de maître de conférences associé que j'ai obtenu de 1995-1997 à l'EPUL. **Depuis cette date je suis officiellement intégré au LAIL : 50% équipe SFSD et 50 % équipe Bond Graph.**

L'analyse et l'application de l'outil bond graph aux systèmes mécaniques et électriques (bien définis par le transfert de puissance) sont bien développées. Par contre, l'application de cette technique à des systèmes complexes mettant en jeu le couplage de plusieurs phénomènes (thermodynamiques, chimique, hydraulique) mal définis par le transfert de puissance, reste un sujet de recherche d'actualité. *C'est justement, dans ce domaine que se situe ma contribution au développement de la modélisation par bond graph au génie des procédés au sein de l'équipe Bond Graph.*

Lorsque j'ai intégré l'équipe SFSD, dans mes premiers travaux, la modélisation bond graph ne servait pas directement de support à la surveillance : une fois le modèle effectué, une transformation de celui-ci vers une forme plus connue pour la surveillance est faite. C'est dans cet esprit que j'ai entamé dans un premier temps mes premiers travaux pour la modélisation et la surveillance du générateur de vapeur.

La contribution à la surveillance des processus par l'approche bond graph a été entamée au LAIL dans le cadre d'une collaboration entre les équipes Bond graph et SFSD dans le cadre d'une thèse en 1995 (M. Tagina). Je me suis basé sur ces travaux et les travaux qui concernent les systèmes décrits par une seule énergie pour les étendre à des processus en génie des procédés décrits par des bond graphs couplés (en raison du couplage des énergies hydraulique, thermiques et chimiques).

Ma contribution au sein du LAIL consiste alors à utiliser une seule représentation, le modèle bond graph couplé (grâce à ses propriétés causales, structurelles et fonctionnelles) pour la modélisation et la supervision des processus en génie des procédés et plus spécialement les processus thermofluides.

Cette thématique a donné lieu à une opération transversale « Bond graph et surveillance » que j'anime depuis 1998.

7. Ma première présentation au sein de l'équipe SFSD (juin 1995) portait sur la modélisation par bond graph des générateurs de vapeur

3.3 Production scientifique

La liste de mes publications est donnée au chapitre 5. *Afin de faciliter l'identification de mes contributions, les références à mes propres publications sont notées entre crochets comme suit : [YYY01_XX] où YYY: Trois premières lettre du premier auteur, 01: année, CI: type de publications (voir notations utilisées). Les travaux de DEA et thèses sont notées [YYYY01_TH] où YYY: Trois premières lettre de l'étudiant, 01: année, TH (ou DEA): type du Travail de recherche.*

Le tableau 3.1 contient le bilan de mes publications depuis ma nomination comme maître de conférence en septembre 1997.

– Commentaires sur la production scientifique

Afin de situer mes contributions, j'ai distingué deux périodes :

- *première période (1988-1994) en qualité d'enseignant chercheur en Algérie*, mes travaux de recherche pendant cette période sont orientés vers des applications de commande et la modélisation des processus chimiques. Une bonne expérience dans ce domaine a été acquise. Toutefois, le peu de moyens et la politique de recherche sur place expliquent le type et le nombre réduit de publications réalisées (RN : 1, CN : 2, RC : 2).
- *deuxième période (1995-2002)*. Après une période de reconversion thématique en qualité de maître de conférences associé à l'EPUL, j'ai développé après ma nomination en 1997, une activité de recherche dont les thèmes fédérateurs sont *modélisation et la surveillance par bond graph en génie des procédés*. *Les publications citées sont produites dans le cadre et dans l'opération transversale "bond graph et surveillance"*. Durant ces cinq dernières années, ma production scientifique me semble régulière et cohérente. **La publication de l'ouvrage de recherche (Springer Verlag), les deux chapitres dans les éditions Hermes, ainsi que mon engagement à plusieurs projets dont deux européens représente une activité de recherche soutenue.**
- Ma position de passerelle entre les équipes BG et SFSD d'une part et mon profil orienté génie des procédés m'ont amené à collaborer avec plusieurs équipes au niveau du LAIL et à co-signer alors plusieurs des publications produites.

3.4 Encadrements

3.4.1 Stages de DEA

Les stages de DEA en productique : Automatique et Informatique Industrielle, Université des Sciences et Technologies de Lille1 encadrés sont :

1. [BUS98_DEA] F. Busson. *Surveillance par Bond Graph des systèmes thermodyna-*

Publications parues							
Publis.	98	99	00	01	02	Tot	Congrès, journaux, ouvrages
RI	-	2	1	1	1	5	Automatica (1), JESA (2), Computer and Chemical Engineering (1), CEP(1)
RN					1	1	Entropie
OS	-	-	1	-	-	2	Springer Verlag,
OC	-	-	1	1	-	2	Hermes
CI	5	2	4	4	4	22	ESS (3), IFAC et Safeprocess(11), Chemical and Process Engineering (2) ECC(1), IEEE SCSC (1),) autre (5)
CN	1	1	1	1	-	4	JDA(2), congrès en génie des procédés (2)
RC	3	1	1	2	11	18	Projets nationaux (10) européens (8)
DC	2	3	-	2	7	14	régional (3), national (6), international (5)
PP	1	-	1	1	1	4	Polycopiès
Publications soumises							
CEP (2), Computer and Chemical Engineering (1), Journal of Systems and Control Engineering (1), Techniques de l'Ingénieurs à paraître en 2003 (1) Journal of Franklin Institute (1)							
Encadrements : (thèses soutenues 2, en cours 4 dont 1 en cotutelle)							
TH				1	1	2	Taux encadrements: 50% et 60%
DEA		1	1	2	3	7	Taux encadrements: généralement 100%

TAB. 3.1 – Bilan des publications et encadrements

miques. Mention bien, 1998. En thèse depuis 1998 sous ma co-direction, soutenance prévue décembre 2002.

- [GUE99_DEA] Guenard V. *Modélisation par Bond graph d'une installation hydraulique.*

- Mention A Bien, 1999. Actuellement en CDI dans l'industrie.
3. [MAL00_DEA]* Maligorne M. (2000). *Conception d'une bibliothèque de modèles thermo-fluide à l'aide de l'approche Bond Graph*. Mention bien, Septembre 2000. Actuellement en congé sabbatique. (*dans le cadre du projet industriel financé par Sherpa Engineering.).
 4. [KAC01_DEA] Kacemi J. (2001). *L'outil Bond Graph pour le Filtrage d'alarmes des systèmes multi-énergies*. Mention passable. En thèse à l'université du Littoral.
 5. [MED02_DEA] Medjaher K. (2002). *Intégration des Bond Graphs et des modèles externes pour la supervision des actionneurs intelligents*. Mention Bien. Juin 2002. **En thèse depuis septembre 2002 sous ma co-direction.**
 6. [NIE02_DEA]** Niesner C. (2002). *Modélisation et simulation d'un générateur électrique utilisant une pile à combustible à l'aide de l'outil bond graph*. Mention Bien, septembre 2002. En thèse depuis septembre 2002 sous la direction de Geneviève Dauphin-Tanguy. (** : dans le cadre du projet industriel financé par le CEA).
 7. [ELO02_DEA] El Osta W.(2002). *Propriétés Structurelles des Bond-Graphs Multiénergies*. Mention A Bien, Juin 2002. **En thèse depuis septembre 2002 sous ma co-direction.**

3.4.2 Co-encadrement de thèses

3.4.2.1 Thèses soutenues

1. [LAM00_TH] Thèse présentée par **Samir LAMIRI** pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université des sciences et Technologies de Lille en Productique Automatique et Informatique Industrielle.
 - Titre de la thèse : « *Modélisation de procédés de génération de vapeur en dimension finie et infinie.* »
 - Date de début de thèse : 1997
 - Taux d'encadrement : 50%. Co-encadreur : Jean Pierre RICHARD (50%)
 - Date de soutenance : 28 novembre 2000
 - Composition du jury : *P. Borne (Président), I. Zambettakis (Rapporteur) , J.P. Richard (Co-directeur 50%), Y. Touré (Rapporteur), B. Ould Bouamama (Co-directeur 50%), M. Staroswiecki (Examineur), J.P. Humeau (Examineur) J.P. Corfmat (EDF) Invité.*
 - Mention obtenue : Très honorable.
 - Situation du docteur : CDI depuis février 2001 (Paris)
 - **Publications co-signées** : [LAM99_CI], [LAM99_CN], [LAM01_RI]

2. [BUS02_TH] Thèse devant être présentée par **Frédéric BUSSON** pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université des sciences et Technologie de Lille en Productique Automatique et Informatique Industrielle
- - Titre de la thèse: « *Modélisation et surveillance par bond graph des processus thermofluides.* »
 - Date de début de thèse: 1998
 - Taux d'encadrement: 60%. Co-encadreur: Geneviève Dauphin-Tanguy (30%), Marcel Staroswiecki (10%)
 - Date de soutenance: 10 décembre 2002
 - Composition du jury: *J.P. Cassar (Président), D. Maquin (Rapporteur), M. Vergé (Rapporteur), G. Dauphin-Tanguy (Co-directeur 30%), B. Ould Bouamama (Co-directeur 60%), M. Staroswiecki (Co-directeur 10%), P. Taillibert (invité).*
 - Situation du docteur: CDI depuis 16 avril 2000 Thales
 - **Publications co-signées:** [BUS98_CI], [AIT99_RI], [OUL99_CI], [BUSS00a_CI], [OUL00a_CI]⁸.

3.4.2.2 Thèses en cours

1. [MRA00_TH] **Rim Mrani Allaoui (40%)**. "Diagnostic des systèmes thermodynamiques à l'aide des Suites de Bandes temporelles". Thèse débutée en septembre 2000. Equipe: SFSD. Coencadrants: M. Staroswiecki (20%), P. Taillibert (40%),

Ce travail de recherche consiste en l'étude des problèmes posés par la mise en oeuvre des méthodes de diagnostic développées par Thomson-CSF Detexis pour les composants électroniques lorsqu'elles sont appliquées aux systèmes hybrides complexes et plus spécialement les processus thermofluides. L'approche temporelle proposée par P. Taillibert consiste à avoir les résidus sous une forme bien définie, afin d'éliminer les dérivées et donc d'évaluer plus sûrement les résidus. Ces résidus que l'on cherche à obtenir sont de la forme:

$$\forall t \in w, \quad f(t) + g'(t) + h''(t) + \dots = 0 \quad (3.1)$$

où f, g, h sont des fonctions de quantités mesurables et des paramètres du système à surveiller, et w est la fenêtre d'observation. Cette présentation permet par intégrations

8. Initialement boursier BDI CNRS, cofinancé Région Pas de Calais du conseil régional, le thésard travaille à temps plein depuis avril 2000 pour Thales

successives, d'obtenir une équation décrivant le comportement théorique du système sans plus aucune dérivée. Pour faciliter de plus cette intégration, on passe à l'intégration formelle de toutes les fonctions f, g, h, \dots d'où la nécessité de les représenter par des suites de bandes temporelles (SBT). Il s'agit en fait sur un intervalle de temps donné, appelé "fenêtre d'observation" de borner chaque fonction par deux polynômes. Une fois les SBT établies, on passe à la vérification, par intégration successive de ces résidus, de leur égalité ou non avec zéro. On parle *de la vérification de la cohérence des résidus*. Finalement, l'intérêt des SBT réside dans l'intégration sur des fonctions polynomiales très simples, qui facilite de plus la vérification de la cohérence des résidus, tout en testant deux inégalités qui ne contiennent que des polynômes. Le travail de thèse de Rim Amraoui consiste étendre cette approche pour les composants thermofluides définies par des modèles complexes et dont l'obtention de SBT nécessite des transformations pour obtenir une forme de l'équation 3.1. **Publications co-signées** : [MRA01_DC]. .

2. [MED02_TH] **Kamel MEDJAHER (60%)** "Conception d'un générateur de modèles en génie des procédés pour leur diagnostic". Débutée en septembre 2002. Coencadrant : M. Staroswiecki (40%). Cette thèse financé par le projet Européen fait suite au travail de recherche entamé dans le cadre de la thèse de F. Busson et consiste à étendre le domaine de surveillance par bond graph aux processus chimiques. Ce travail a été entamé en DEA. **Publications co-signées** [OUL02a_RI], [OUL02_CI]
3. [OST02_TH] **Wassim OSTA (60%)**, Bourse EGIDE sur les crédits propres de l'équipe Bond Graph Thèse débutée en septembre 2002. "Propriétés structurelles des bond graphs à énergies couplées en vue de leur commande" Equipe : Bond graph. Coencadrants : C. Sueur (40%)
4. (Thèse d'état Algérien **M. Khemliche (60%)**). " Etude de placement de capteurs pour la surveillance des systèmes thermofluides modélisés par les Bond Graph à énergies couplées"⁹ Débutée en septembre 2002. Coencadrant : M. Staroswiecki (40%). Le travail de recherche proposé consiste en l'étude d'une architecture d'instrumentation en vue d'obtenir des performances en surveillance. Ce sujet constitue un thème sur lequel plusieurs laboratoires travaillent au niveau national et international. L'originalité de l'approche proposée réside dans l'outil d'analyse utilisé et des critères pour le choix du placement de capteurs afin de rendre le processus structurellement surveillable (possibilité de détecter et de localiser les fautes affectant les capteurs et le

9. Cette thèse d'état algérien sera co-financée par le gouvernement français et algérien suite à un dossier que j'ai monté avec M. staroswiecki suite à des cours bloqués que j'ai assumés en Algérie.

processus).

3.4.3 Participation à des jurys de thèse de doctorat

- Thèse de doctorat de Monsieur Elyès Chérifi dont la soutenance s'est déroulée le 29 09 1998 à l'université de Valenciennes (n° d'ordre 98-23) au Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH, UMR CNRS 8530). Mention très honorable. Le titre est : "*Analyse Fonctionnelle et structurelle des systèmes homme-machine pour la supervision*". Le jury était composé des membres suivants : *M. Staroswiecki (rapporteur), G. Morel (Rapporteur), C. Tahon (Président), P. Millot (Directeur), B. Riera (Examineur), B. Ould Bouamama (Examineur) et P. Hervet (invité)*
- Thèse de doctorat en cotutelle avec l'université d'Oran de Monsieur Hafid Haffaf dont la soutenance s'est déroulée le 8 avril 2000 à l'université d'Oran. Le titre est : "*Contribution à la résolution des problèmes combinatoires dans un bond graph par la théorie des matroïdes*". Mention très honorable. Le jury était composé des membres suivants : *M. Kheladi (Président), M. K. Rahmouni (Co-Directeur de thèse), G. Dauphin-Tanguy (Co-directeur de thèse), B. Ould Bouamama (Examineur) et D. Benhamamouche (Examineur)*.

3.5 Thématiques de recherche

Cette partie est un résumé de mes activités de recherche, notamment la définition d'une thématique, le projet de création d'une équipe autour de cette thématique. Le texte sera alors essentiellement rédigé à la première personne. Je ne cite que mes publications citées au chapitre 5 afin de situer ma contribution. Les références bibliographiques et le positionnement scientifique seront présentés dans le rapport de recherche dans la deuxième partie.

3.5.1 Travaux antérieurs en Russie et en Algérie

Mes travaux de recherche étudiés pendant la période de la thèse et post doctorale (1988-1994) concernent la commande optimale en vue de minimiser le taux de pollution appliquée à deux types de procédés chimiques catalytiques : le traitement des gaz soufrés et les procédés chimiques de production des détergents. Du point de vue écologique et donc économique, le rendement de tels types de procédés est principalement influencé par l'état du catalyseur et des réactions secondaires qui s'y déroulent. Il est évident que la résolution du problème du maximum du taux de conversion (maximisation du rendement), résout aussi celui du minimum de pollution. En raison de la non stationnarité de ce type de procédé, les conditions

d'optimalité varient en fonction de l'état technologique (état du catalyseur, type de réactions secondaires etc.).

Les travaux de recherche ayant conduit à la soutenance de ma thèse de Ph.D [OUL87_TH], en décembre 1987 ont été réalisés au laboratoire d'automatisation des procédés industriels à l'académie pétrole et gaz "Goubkine" à Moscou (CEI). L'intitulé du sujet de recherche est « *Commande optimale du procédé de production de soufre par la méthode de Claus dans le but de diminuer le taux de pollution* ». Je l'ai soutenue le 22 décembre 1987, sous la direction du professeur Valery Vasselevitch Radkevitch devant un jury composé de: Prof. Brago I.N. (président), Prof. Glivenko I.V. (secrétaire scientifique), et les membres du conseil scientifique: Prof. Loguinov V.I. (rapporteur), Berkoutov A.M., Bogatirev V.I., Dr es sciences Bogatkin G. K., Prof. Egorov K.V., Prof. Kolesnikov V.M., Prof. Kolovertnov Y.D., Prof. Kourotchkin E.P, Prof. Lebedev R.K. (rapporteur), Prof. Menchov B.G., Prof. Moisenko A.C., Prof. Ovtharov L.C., Prof. Petoukhov V.I., Prof. Sitnikov L.C., Prof. Soukharev M.G. et le Prof. Kharin V.T..

L'originalité de mes travaux de recherche appliquée (qu'il faut bien situer dans le contexte de l'époque) concerne d'une part la modélisation de la cinétique des processus chimiques¹⁰ et d'autre part la réalisation d'une nouvelle stratégie de commande hiérarchisée à trois niveaux (optimisation, prédiction et stabilisation).

Le thème développé en thèse est poursuivi en Algérie à l'INHC. Deux thèmes de recherche ont été développés. Le premier s'inscrit dans le cadre de l'automatique appliquée à l'industrie chimique et est intitulé: Identification, modélisation et commande des processus chimiques. Les recherches ont été axées sur l'application d'une commande optimale hiérarchisée du procédé de production des détergents afin de minimiser le taux de pollution. Le deuxième concerne la modélisation des systèmes à paramètres distribués. Ce travail de recherche nous a permis de proposer une approche d'approximation du modèle à paramètres distribués par un modèle à paramètres localisés (appliqué à un gazoduc).

Malgré le peu de moyens et la politique de recherche sur place (aussi bien en CEI qu'en Algérie), ces travaux ont donné lieu à des publications dans des congrès nationaux avec acte et comité de lecture [ZEL92_CN], [OUL92_CN], d'un rapport de recherche [OUL93_RC], d'une revue de 36 pages [RAD86_RN],(en langue russe, mais dont la traduction est disponible) et dans des colloques et manifestations sans actes que je ne cite pas en référence.

Dans le cadre de ce thème de recherche, j'ai dirigé la thèse de magistère de Menzou Mohamed "*Modélisation et commande hiérarchisée des processus chimiques*", et ce jusqu'au mois de décembre 1993, date à laquelle, j'ai quitté l'Algérie.

10. Il faut avouer qu'il est toujours difficile d'évaluer l'originalité d'un travail de recherche en modélisation, alors que ce travail représente 50 à 80% du temps consacré à un projet de commande automatique.

3.5.2 Travaux actuels

Ma contribution au développement de la recherche au sein du laboratoire LAIL a porté sur *l'utilisation de la méthodologie bond graph à la modélisation et à la supervision appliquée au génie des procédés*. Je développe ce thème fédérateur dans le cadre de l'opération transversale "surveillance et bond graph" que j'anime depuis 1998, avec le co-encadrement de deux thèses, l'une avec Jean Pierre Richard de l'équipe SYNER et l'autre avec Geneviève Dauphin-Tanguy et Marcel Staroswiecki, d'un certain nombre de DEA, et enfin d'un grand nombre de projets industriels et de contrats européens auxquels j'ai participé ou que j'ai dirigé et que je développe plus loin (cf. activités contractuelles).

3.5.2.1 Thème 1 : Modélisation par bond graph en génie des procédés

L'outil bond graph (ou graphe de liaison) est défini initialement en 1961 au MIT (Boston, USA) par Paynter, puis introduit en Europe uniquement vers les années 1970. Cette démarche de modélisation, fondée sur la représentation au sein du système des échanges de puissances, a été développée à partir de 1966 principalement par Dean Karnopp (université de Californie), Ronald Rosenberg de l'université du Michigan, et Jean Thoma (de l'université de Waterloo Canada).

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

Au niveau international les premiers travaux sur la modélisation bond graph de ce type de procédé sont apparus vers 1970 par principalement J. Thoma, R. Rosenberg, et D. Karnopp.

Au niveau national ce thème est développé principalement par Serge Scavarda (INSA de Lyon, systèmes hydrauliques et pneumatiques), Bernard Maschke (du LAGEP, système Hamiltoniens et Lagrangiens).

Sur le plan industriel de nombreuses sociétés utilisent cet outil (à titre d'exemples, citons EDF, CEA, PSA, Sherpa Engineering, ...).

J'ai développé ce thème de recherche principalement avec Jean Thoma¹¹ et le professeur Geneviève Dauphin-Tanguy.

Eu égard aux travaux existants, la contribution de nos travaux se situe à plusieurs niveaux :

- Le choix et l'analyse systématique des variables de puissance pour la modélisation et la simulation des processus en génie des procédés, ([THO00_OS], chap.4), [OUL00b_CI],

11. Je remercie Geneviève Dauphin-Tanguy de me l'avoir présenté lors du congrès CESA'96 à Lille

[OUL00_OC].

- Modélisation et représentation des systèmes thermodynamiques¹² ([THO00_OS], chap.2), [OUL96_CN], [OUL97_CI], [OUL97_CN], [RIM96_CI] Application aux générateurs de vapeur, [RIM95_RC], [RIM96_RC], [RIM97_RC] [OUL96_CI],
- Modélisation et représentation par bond graph des processus chimiques et électrochimiques [OUL98a_CI], ([THO00_OS], chap.3). Application aux Piles à Combustible de type à haute température de type SOFT [NIE02_RC].

Une synthèse de ces travaux est publiée dans un ouvrage de recherche publié chez Springer [THO00_OS]. Dans le cadre de ce thème de recherche, j'ai co-encadré les travaux de DEA [GUE99_DEA], [MAL00_DEA] [NIE02_DEA] et la thèse de F. Busson [BUS02_TH].

Linéarisation des bond graphs à énergies couplées. Le modèle bond graph est 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 (thèse de S. Rimaux au LAIL) aux bond graph 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. Une implémentation informatique pour l'étude des propriétés structurelles sur ces modèles fait l'objet de la thèse en cours co-dirigée avec le professeur Christophe Sueur (thèse en cours de El Osta W. depuis septembre 2002). Les premiers résultats avec une application sur un générateur de vapeur ont été obtenus dans le cadre du travail de DEA [ELO02_DEA] et d'une partie de la thèse de **Frédéric Busson** [BUSS02_TH].

Modélisation des générateurs de vapeur. Au laboratoire existe une installation pilote de génération de vapeur qui reproduit à échelle réduite le fonctionnement d'une centrale thermique. Le développement des bond graphs thermodynamiques, m'a amené alors naturellement à m'intéresser à la problématique de la modélisation (puis plus tard à la surveillance) des générateurs de vapeurs. Deux types de modèles ont été développés : une modélisation à base d'Equations aux dérivées Partielles (EDP) dans le cadre d'un co-encadrement (avec le professeur Jean Pierre Richard) de la thèse de **Samir Lamiri** [LAM00_TH] et une approche

12. C'est dans ce contexte que j'anime l'équipe du LAIL (composé de quatre permanents) impliquée dans le projet Pluridisciplinaire CNRS : ENERGIE PRI 8.1 PRI/CARNOT.

bond graph dans le cadre de projets industriels et de DEA [BUS98_DEA].

- Le modèle EDP sera utilisé pour la mise en œuvre de commande de systèmes à retard. Les résultats suivants ont été obtenus [LAM99_CI] [LAM01_RI] [LAM99_CN]:
 - Étude théorique de la résolution de l'équation de l'énergie, et mise en évidence de l'existence de retard (équations de Volterra) dans la propagation de la chaleur dans un milieu continu, homogène, isotrope et incompressible
 - Deux modèles diphasiques homogènes (EDP et EDO) sous forme d'équations d'état (adaptée à la commande)
 - Deux modèles à phases liquide et vapeur séparées (EDP et EDO) sous forme d'équations d'état.
 - Modélisation et simulation des évolutions spatiales des variables thermodynamiques mises en jeu dans notre système, et notamment au titre massique de la vapeur X , au taux de vide α et au niveau d'eau dans un régime dynamique.
- Les modèles bond graph obtenus ont donné lieu à deux applications. La première concerne l'installation pilote du laboratoire LAIL. Un modèle global de l'installation pilote sous forme d'équation d'état non linéaire a été validée sur le site ([OUL96_CN] [OUL96_CI], [OUL97_CI]). La deuxième concerne la modélisation bond graph des phénomènes de gonflement - tassement du niveau d'eau à basses et à fortes charges dans une générateur de vapeur de centrale EDF de type REP900 (bien connus des industriels car ayant une dynamique à déphasage non minimal, donc difficilement contrôlable) [RIM96_CI]. Forts de cette première expérience dans le domaine de la modélisation, nous avons réalisé le transfert de nos résultats de recherche avec des partenaires industriels, EDF, CEA, Sherpa, dans le cadre de projets nationaux et européens (cf activités contractuelles).

3.5.2.2 Thème 2 : Surveillance des procédés à l'aide des modèles bond graph à énergies couplées

Les outils de modélisation développés sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes de surveillance au sein de l'équipe SFSD. Dans ce cadre, initialement les modèles bond graph obtenus ne sont pas directement utilisés comme support à la surveillance : une fois le modèle effectué, une transformation de celui-ci vers une forme plus connue pour la surveillance est faite.

Des applications de l'analyse structurelle et la redondance analytique sur le générateur de vapeur réalisées par un groupe de travail (composé de M. Staroswiecki, A. Aitouche, R. Litwak et F. Busson) autour de l'installation pilote ont donné lieu à des publications dans des congrès internationaux [BUS98_CI], [OUL98c_CI], deux revues [AIT99_RV], [LIT00_RV] et un

chapitre dans la collection d'Hermès [OUL01_OC]¹³.

Les travaux abordés, ont mis en évidence la complexité des procédures de génération des RRAs de modèles non linéaires composés d'un ensemble d'équations différentielles, algébriques et ou algèbro-différentielles. Il était alors judicieux d'envisager des procédures plus systématiques de génération de RRAs.

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

Le modèle bond graph est avant tout un modèle de connaissance pour la simulation. La démarche de l'équipe Bond Graph du LAIL 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.

Aujourd'hui seules quelques équipes dans le monde travaillent dans cet esprit depuis quelques années; citons à titre d'exemple Prof. Gawthrop à l'Université de Glasgow, Prof. Linkens à l'Université de Sheffield, Prof. Scavarda à l'INSA de Lyon, Prof. Delgado à l'université Simon Bolivar de Caracas (Vénézuéla). On peut aussi citer aussi 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)

L'étude de la surveillance des systèmes à l'aide des modèles bond graph a été initialement traitée dans la thèse de Tagina (1995). Cette étude repose essentiellement sur l'analyse des propriétés causales et structurelles du modèle bond graph (qui est avant tout un graphe) pour la génération d'une manière générique des indicateurs de fautes (Relations de Redondance Analytique RRA) et analyser les conditions de surveillabilité des sources (actionneurs) directement sur le bond graph. Une synthèse de ces travaux fait l'objet de la publication [OUL00c_CI].

Les travaux existant dans la littérature sur l'analyse structurelle des systèmes sont basés sur un modèle bond graph monoénergie décrivant des processus physiques régis par une seule énergie à la fois (généralement mécanique ou électrique). Les défaillances détectées portent sur les sources de contrôle (source d'effort ou de flux) et capteurs.

Dans le cas où les processus à surveiller sont décrits par des pseudo bond graphs multi-énergie (modélisant les processus thermofluides présents dans de très nombreuses industries, à risques), l'utilisation directe de ces approches n'est plus possible car les modèles BG qui les

13. L'algorithme de surveillance proposé est implémenté en temps réel sur l'installation à l'aide du superviseur "Panorama".

décrivent sont non linéaires, et "multiports" (les lois caractérisant les phénomènes physiques modélisés ne sont plus scalaires). Une extension des travaux existants pour les processus en génie des procédés est alors développée: *C'est dans le cadre de cette thématique de recherche que j'anime l'opération transversale "bond graph et surveillance" depuis 1998. Cette équipe regroupe les chercheurs suivants : G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki, les thésards, F. Busson et M. Kamel (depuis septembre 2002), et Arun Kumar Samantary (Ph.D) de (Indian Institue of Tecnology IIT de Kharagpur), depuis novembre 2000, en qualité de post-doctorant pour une durée de trois ans.*

Deux approches sont développées :

1. **Surveillabilité des actionneurs à partir des modèles bond graphs à énergies couplées linéarisés.** La démarche utilisé peut être résumée comme suit : pour déterminer la surveillabilité des actionneurs d'un processus thermofluide linéarisé, on doit d'abord obtenir les équations d'état linéarisées de tout le système, générer les RRAs puis le tableau des signature de fautes et enfin analyser la surveillabilité des actionneurs, alors que l'application des bond graphs à énergies couplées permet d'obtenir le modèle bond graph global linéaire à partir des bond graphs linéarisés de chaque composant thermofluide. La surveillabilité des actionneurs est alors déduite directement du bond graph global sans avoir à générer les RRAs. Il est possible de rendre l'actionneur surveillable par simple ajout d'élément bond graph (auxquels évidemment on doit donner un sens physique). Des applications à un générateur de vapeur et à une colonne de distillation ont montré l'applicabilité de la méthode [BUSS00a_CI], [OUL00a_CI]¹⁴, [OUL01b_CI], [OUL01c_CI].
2. **Génération des RRAs formelles des composants thermofluides.** Les modèles des processus en génie des procédés sont fortement non linéaires. La génération des RRAs sur le bond graph est basé sur le parcours de chemins causaux sur le modèle graphique. Ceci est exprimé sur un graphe bipartite orienté par l'ordre d'élimination des variables inconnues. Pour exprimer une variable inconnue en fonction des variables connues, l'étude des chemins causaux la reliant aux sources et aux capteurs en parcourant les chemins causaux simple et généralisés est une méthode pratique et facile à appliquer que nous avons développée pour la surveillance des composants thermofluides. Au regard des travaux existant sur ce thème (que nous développons dans la partie 2), notre originalité se situe à plusieurs niveaux.
 - Le cahier des charges fixé concerne la détection et la localisation des défaillances au niveau des capteurs, des actionneurs, des composants physiques, des contrôleurs et des algorithmes de commande

14. Ce travail a été cité en référence par Breedveld et Mosterman dans leur approche sur la surveillance à base de bond grahs qualitatifs.

- La méthodologie est modulaire (surveillance des composants),
- l’algorithme de génération des RRAs à partir du modèle bond graph n’est pas limité à des formes particulières du modèle (polynomiale pour la théorie de l’élimination ou linéaire pour la méthode par projection dans le cas de l’espace de parité)
- La détermination de l’architecture de l’instrumentation, du nombre et du type de variables (à introduire dans l’algorithme de surveillance) ainsi que celui des contraintes est systématiquement déduit du modèle bond graph.
- Les conditions de surveillabilité d’un composant thermofluide sont énoncées

Toutefois, 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 classe de 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 analysées.

Les résultats de ces travaux ont fait l’objet de la thèse de **F. Busson**.

3.5.2.3 Conception d’un système de supervision

Il n’y a guère de consensus sur ce que doit être l’architecture d’un système de supervision idéal, en partie à cause de la diversité des cas de figure (systèmes continus ou systèmes à événements discrets, par exemple). Celle-ci comprend plusieurs modules qui coopèrent entre eux. Les activités concernées par la supervision sont la surveillance et la détection de défaillance de l’installation, le diagnostic et la prise de décision pour l’accommodation ou la reconfiguration. Beaucoup de travaux portent sur l’accommodation des défaillances, qui consiste à poursuivre la mission soit par adaptation de la commande (Sourstup (Aalborg)), soit commutation de modèle (J.M. Lemos (Lisbone), P. Borne (LAIL)), soit par re-optimisation (R. Patton Hull). La contribution de l’outil bond graph pour la conception d’un système de supervision s’inscrit dans la contribution de l’équipe SFSD qui repose sur deux points de vue: la détection et l’isolation de défauts (FDI) et de la tolérance aux fautes (FTC) c.à.d. les moyens de continuer à conduire le processus en présence de fautes.

– Point de vue FDI

On a souligné l’importance du modèle dans les méthodes de surveillance à base de modèles. Une fois le modèle généré, les indicateurs de fautes peuvent être déduits. L’obtention de ces modèles est une tâche complexe surtout pour les processus en génie des procédés en raison de leur diversité et du couplage des énergies le caractérisant. Le thème de recherche développé comme une suite aux travaux déjà réalisés consiste en la conception d’un générateur dynamique de modèles des systèmes thermofluides pour leur diagnostic. La méthodologie est basée sur l’analyse structurelle des modèles bond graph et les modèles fonctionnels. Le logiciel

implémenté est présenté avec une interface de façon que l'utilisateur puisse aisément (grâce à l'intégration de l'outil fonctionnel comme interface avec l'opérateur humain), construire les modèles dynamiques et architectural de la plupart des processus thermofluides (en se basant sur le Plan Détaillé des Instruments P&ID de l'installation) et générer les RRAs et la surveillabilité du processus (définir à l'opérateur les composants pouvant être surveillés en fonction du cahier des charges spécifié). Ce thème de recherche développé dans le cadre du projet européen CHEM (dirigé par Sylvie Cauvin de l'Institut Français du Pétrole) pour la supervision de processus chimiques et pétrochimiques a fait l'objet d'un certain nombre de rapports de contrats, d'une communication internationale [OUL01d_CI], d'une revue soumise à CEP [OUL02b_RI] et de plusieurs présentations.

L'outil informatique développé est appliqué au générateur de vapeur et sera testé sur un ensemble de processus pilote européens (cracking catalytique (France IFP), réacteur à lit fluidisé (Espagne), usine de Production d'urée (Pologne)...) dans le cadre du projet CHEM.

Ce travail de recherche est en cours de développement dans le cadre de la thèse de Medjaher afin d'étendre l'application aux processus chimiques modélisé par un bond graph à trois énergies.

– Point de vue FTC

Dés lors que l'opérateur humain est présent, le système est vu en termes de fonctions, le problème de tolérance aux fautes s'élargit au problème de supervision, qui pose celui de la décision en termes de filtrage d'alarmes.

En complément à la modélisation fonctionnelle et du point de vue de la supervision, le modèle bond graph permet à l'opérateur de visualiser clairement le stockage, la dissipation, et le transfert d'énergie ainsi que la dynamique des phénomènes du processus. Dans cette optique, et dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH. UMR CNRS 8530) (P. Millot, B. Riera et I. Cherifi) l'intégration des méthodologies fonctionnelles, structurelles, et bond graph pour la supervision des systèmes complexes appliqués à un générateur de vapeur a donné lieu à une publication d'une revue [OUL00_RV] dans le journal CEP et à conférence internationale IFAC [OUL98b_CI].

L'intégration des modèles bond graph et des modèles externes permettent de proposer des démarches de conception originales. Le modèle externe permet de décrire un équipement du point de vue des utilisateurs et de structurer le fonctionnement des processus industriels selon plusieurs modes d'exploitation (ME). Le passage d'un mode à un autre, décrit par un graphe de gestion des modes est conditionné par la disponibilité des services rendus. Ce type de modèle fournit une description fonctionnelle qui n'est pas suffisante pour valider entièrement le comportement du système. Alors l'intégration des modèles bond graphs permet d'une part

d'associer chaque ME par le bond graph correspondant. La disponibilité des services (représentés en bond graph par des éléments ou un ensemble d'éléments bond graph) est fournie par l'algorithme de surveillance au graphe de gestion des modes d'exploitation déduit directement du bond graph du ME correspondant.

Ce thème de recherche est développé autour de deux projets, dont un européen DAMADICS et l'autre national Filtrage d'alarmes. Le premier concerne le diagnostic des actionneurs intelligents appliqué à une vanne industrielle pour détecter plusieurs scénarios de fautes (capteurs, cavitation, perforation,) [OUL02a_RI], [BAY02_CI], [MED02_DEA] et le second le traitement des alarmes au sein d'EDF appliqué sur des systèmes réels : le Système de Réfrigération Intermédiaires (SRI) et le Système de Contrôle Volumétrique et Chimique (RCV) [OUL01a_CI], [OUL99_CI], [KAC01_DEA] [OUL97_RC], [OUL97a_RC], [OUL98_RC], [OUL99_RC].

Ce thème est développé en collaboration avec l'équipe Tolérance aux fautes et comprend : Mireille Bayart, Anne-Lise Gehin, Blaise Conrard et Marcel Staroswiecki.

3.6 Activités contractuelles

Les outils développés appliqués initialement au site pilote se sont orientés vers des applications industrielles dans le cadre de projets nationaux et européens

1. Modélisation par Bond Graph d'une centrale. Contrat N° P33/2M3502/EP732

- **Nom de l'entreprise:** EDF / DER Chatou,
- **Durée et montant du contrat:** Octobre 1995-1997, 453 KF HT
- **Personnel impliqué:** S. Rimaux, B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy,
- **Nature de l'activité:** Contrat d'Etudes, de Recherche et de Développement CERD
- **Résultats attendus:** Développement d'un modèle bond graph de générateur de vapeur, prenant en compte les phénomènes de gonflement-tassement.
- **Résultats obtenus:** Les phénomènes de gonflement-tassement du niveau d'eau dans les générateurs de vapeur des réacteurs à Eau Pressurisée (REP900) ont été modélisés par une approche bond graph non linéaire. [RIM96_CI]. Le modèle obtenu sous forme d'un programme Matlab-Simulink a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux et des résultats de simulation issus d'un très gros modèle de connaissance. Le modèle fourni est le seul modèle dont dispose EDF pour la simulation du comportement du générateur de vapeur depuis la très basse charge (10%) (là où surviennent la plupart des arrêts d'urgence) jusqu'à 100% de charge. Le modèle est utilisé pour dimensionner les futurs générateurs de vapeur en vue de diminuer le phénomène de gonflement - tassement très gênant et incontrôlable.

- **Rédactions de rapport** : [RIM95_RC], [RIM96_RC], [RIM97_RC].

2. Filtrage d’alarmes. Contrat EDF-LAIL P31L19/6A2224/EP824

- **Nom de l’entreprise** : Division Recherche et Développement (DRD-EDF),
- **Durée et montant du contrat** : janvier 1997-juillet 1999, 600 KF HT
- **Personnel impliqué** : E. Craye, A.L. Gehin, **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki, A. Togyeni
- **Nature de l’activité** : Contrat d’étude.
- **Résultats attendus** : Proposer à EDF des solutions lui permettant d’améliorer le système de traitement d’alarmes utilisé par de nouvelles tranches nucléaires.
- **Résultats obtenus** : La première phase a consisté en une étude bibliographique sur le traitement des alarmes [OUL97_RC]. La deuxième a consisté à proposer de nouvelles techniques de filtrage d’alarmes basées sur des modélisations des systèmes surveillés [OUL99_CI]. [OUL97a_RC]. La troisième phase a consisté à prouver l’application des techniques proposées par des applications sur des circuits de la centrale (circuit de refroidissement SRI et un circuit de contrôle volumétrique RCV). [OUL98_RC] et une intégration des modèles bond graph et externes pour le traitement des alarmes du Système SRI a été proposé à EDF [OUL99_RC]. Le choix du RCV a pour objectif de confronter la méthode proposée à un système relativement complexe. Cette complexité s’exprime d’abord dans la taille du système qui est caractérisé par la définition d’une centaine d’alarmes. Enfin un travail de DEA sur le filtrage d’alarmes sur la base des bond graphs couplé a été encadré [KAC01_DEA].
- **Rédactions de rapport** : [OUL97_RC], [OUL97a_RC], [OUL98_RC], [OUL99_RC].

3. Conception de bibliothèque de modèles thermofluides pour Matlab

- **Nom de l’entreprise** : PME Sherpa Engineering
- **Durée et montant du contrat** : 30/05-15/09/00, 87575 FHT
- **Personnel impliqué** : B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy
- **Nature de l’activité** : Contrat étude
- **Résultats attendus** : Bibliothèque de modèles thermofluides pour Matlab.
- **Résultats obtenus** : Une bibliothèque de modèles génériques (condenseur, pompes, chaudière, ...) a été créé sur le logiciel Matlab-Simulink. Les modèles des composants ont été testés sur le générateur de vapeur du LAIL. Un DEA a été financé dans ce cadre.
- **Rédactions de rapport** : [MAL00_DEA]

4. Modélisation et Simulation d'une Pile à Combustible de type SOFC

- **Nom de l'entreprise** : CEA (Service de Conversion et de Stockage de l'Energie, (SCSE)
- **Durée et montant du contrat** : 1 an à partir du 15/04/2002, d'un montant de 24955 Euros
- **Personnel impliqué** : B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, C. Niesner (DEA)
- **Nature de l'activité** : Contrat de collaboration
- **Résultats attendus** : Cette étude se place dans le cadre du développement de l'activité SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) du Département des Technologies pour les énergies Nouvelles et concerne la modélisation et la simulation dynamique à l'aide du logiciel SIMULINK d'une pile à combustible de type SOFC.
- **Résultats obtenus** : Un modèle bond graph global du système constitué de la plaque bipolaire anode, le canal anode, zone de diffusion anode, la couche active anode, l'électrolyte, la couche active cathode, la zone diffusionnelle cathode et enfin la réaction électrochimique de l'anode a été fourni. Les phénomènes couplés (thermique, hydraulique chimique et électrochimique) ont été décrits par un modèle bond graph et simulés à l'aide de Matlab-Simulink.¹⁵.
- **Rédaction de rapports** : [NIES02_DEA].(rapport de DEA financé par le CEA.).

5. Projet Européen DAMADICS (Méthodes de Diagnostic des Actionneurs dans les Systèmes Industriels de Commande)

- **Type de projet** : Réseau de recherche (dirigé par le Professeur Ron J Patton de l'Université de Hull Grande Bretagne) financé par la CE n° HPRN-CT-2000-00110, composé de huit partenaires dont le laboratoire LAIL.
- **Durée et montant du contrat** : Octobre 2000-octobre 2003, 150.000 euros.
- **Personnel impliqué** : B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, , M. Bayard, B. Conrad, D., V. Coquempot.
- **Résultats attendus** : Développement des Méthodes de Diagnostic des Actionneurs (vannes) en vue d'une application à la raffinerie de sucre Zuchrownia Lublin S.A. située en Pologne. Le LAIL est leader du thème " Algorithmes et diagnostic des actionneurs intelligents" (que j'anime).
- **Résultats obtenus** : Intégration des modèles bond graphs et externes pour la surveillance des actionneurs intelligents : application à une vanne industrielle utilisée comme Benchmark pour le groupe DAMADICS. Ce travail a fait l'objet des publications [BAY02_CI] et,

15. Une thèse CIFRE est proposée par le CEA pour continuer ce travail de recherche.

[OUL02a_CI]¹⁶.et du rapport [PAT02_RC]. Les résultats du DEA [MED02_DEA] dans ce cadre ont été soumis pour publication dans la revue CEP [OUL02a_RI].

6. Projet CHEM : Advanced Decision Support System (DSS) for Chemical/Petrochemical manufacturing processes. Project N° GIRD-CT-2001-00466

- **Présentation du projet** : Projet IMS (Intelligent Manufacturing Systems) est géré par l'IFP (Sylvie Cauvin). Le but du projet est de développer et implémenter un système d'aide à la décision DSS (Decision Support System) pour la supervision des processus de raffinage, chimiques et pétrochimiques. Les méthodes utilisées sont basées sur les outils de statistique, théorie des systèmes, et de l'Intelligence Artificielle (IA) pour la surveillance, la détection et le diagnostic. Ces outils seront intégrés dans le DSS dans un système modulaire et appliqué ensuite à cinq processus pilotes et industriels dont le générateur de vapeur du LAIL. Le projet combine les expertises des institutions académiques (cinq dont LAIL), et industrielles (dix) d'Europe, Japon, USA, et Australie. Au niveau national, les laboratoires LAG (Grenoble) et LAAS (Toulouse) participent en tant que sous traitants. Le projet est divisé en 12 groupes de travail WP (Work Package) composé de 23 TB (boîtes à outils, ToolBox). Le laboratoire LAIL (principalement équipes SFSD et SED) est responsable (M. Staroswiecki) de WP5 "Fault diagnosis and alarm management " (composé de 5 TBs). **Je suis responsable de TB5.1 "Functional model builder for qualitative and structural analysis" et des tests industriels sur le générateur de vapeur.** Au niveau de WP7 "Decision support structure" (K.E. Arzen de l'Université de Lund), le LAIL intervient dans l'analyse des données et la reconfiguration (TB7.2 dont le responsable est Armand Toguyeni). Je ne présenterai que TB5.1.
- **Durée et montant du contrat** : trois années (à partir d'avril 2001), 6 316 404 euros (dont 351400 euros pour le LAIL)
- **Personnel impliqué (pour TB5.1)** : B. Ould Bouamama, M. Staroswiecki, A.K. Samanary (post doc) et K. Medjaher (en thèse depuis sept. 2002)
- **Résultats attendus (pour TB5.1)**: Développer et implémenter un générateur de modèles fonctionnels et de comportement dynamique des processus thermofluides en vue du diagnostic des procédés industriels. Plus concrètement, générer sous forme symbolique à partir uniquement d'un Plan des Instruments Détaillé (P&ID) le modèle dynamique, les Relations de Redondance Analytique (RRA), et l'analyse de la surveillabilité (tableau de signature de fautes). La boîte à outil sera intégrée dans le DSS en ligne ou hors ligne.

16. Cet article est le résultat d'une collaboration que j'ai initiée avec les professeurs J. Quevedo et S. Las heras de l'université polytechnique de Catalogne du groupe DAMADICS.

- **Résultats obtenus** (après 18 mois) : L'approche basée sur un langage formel des systèmes thermodynamiques et les bond graphs, est implémentée sur le logiciel SYMBOLS sous forme d'une boîte à outil nommée FDIPAD générant les modèles dynamiques, les RRAs et l'analyse de la surveillabilité des processus thermofluides. Une base de données générique constituée des classes de processus (classé en processus d'accumulation d'énergie, de transport et de transformation d'énergie), de capteurs et enfin de contrôleurs permet à l'utilisateur d'introduire sous forme de P&ID le processus à superviser. La sortie de cette boîte sera utilisée par d'autres modules du superviseur global pour l'intégration finale. Les résultats de recherche ont fait l'objet de publications [OUL01d_CI], [OUL02b_CI] et d'une revue soumise au journal CEP [OUL02b_RI] et d'une thèse en cours [MED02_TH]. Les rapports de contrat (livrables) produits dans ce contrat [OUL01a_RC], [OUL01b_RC], [OUL02a_RC], [OUL02b_RC], [OUL02c_RC], [OUL02d_RC], [OUL02e_RC] [Cau02_RC] portent sur les méthodologies de développement et d'intégration de l'outil de supervision.

3.7 Rayonnement, collaborations, et valorisation

3.7.1 Niveau local

- Depuis 1997 : Responsable scientifique du site pilote générateur de vapeur du LAIL
- Depuis 2001 : Membre élu titulaire de la Commission des Spécialistes de l'Université de Lille1 (section 61)
- Août 2000 : Présentation à l'école d'été internationale sur les Bond Graph à Lille d'un cours sur les "*Bond graphs en Thermofluides*"
- Depuis 1998 : Responsable de l'opération transversale « *Bond Graph et Surveillance* ». Opération impliquant deux thésards, trois chercheurs permanents, et un post doctorant.
- Depuis 1999 : Responsable de la documentation scientifique du LAIL auprès de l'Institut National de l'Information Scientifique et Technique (INIST) CNRS
- 2002-2005: Responsable du domaine d'application au niveau du LAIL "Systèmes et Procédés de Production"

3.7.2 Niveau régional

- 1998-00 Participation aux travaux du Groupe de Recherche en Automatique Intégrée et Système Homme Machine (*GRAISHyM*)
- 2002 : Activités d'expertise d'évaluation de projets de recherches Pôle environnement Aquitain
- 2002 : Présentation d'une conférence "Les multi-capteurs applicables à la supervision de process industriels sur invitation de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Lille

Métropole dans le cadre du programme Applica.

- 1997-98 : Présentation aux journées ADER de deux communications sur les bond graphs et la thermodynamique

3.7.3 Niveau national

- Participation aux travaux du groupe de recherche du GDR/PRC automatique *Sûreté de fonctionnement, Surveillance et Supervision (S³)* (plusieurs présentations au sein de cette action)
- Participation à des jurys de thèses (4 dont 2 en tant que co-encadreur)
- Membre et participation aux travaux de l'Association Française de Génie des Procédés (AFGP) depuis 2000
- Membre du club EEEA
- Depuis juillet 2002 : Responsable Scientifique de l'équipe du LAIL impliquée dans Le projet Pluridisciplinaire CNRS : ENERGIE PRI 8.1 PRI/CARNOT (Communauté d'Analyse et de Recherche sur les Nouvelles Orientations de la Thermodynamique)¹⁷ dirigé par le professeur Bernard SPINNER. Le but de ce projet de 4ans (20keuros ont été alloué pour cette demi année), est la confrontation et synthèse des méthodes existantes pour la thermodynamique. Il regroupe 10 laboratoires nationaux et implique 27 chercheurs. Le groupe pour le LAIL est composé de quatre permanents : G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki, A.L. Gehin, et B. Ould Bouamama. Une première présentation intitulée "Les Bond Graphs : un outil pédagogique pour la représentation et la compréhension de la thermodynamique" a été présenté.
- 4 Collaborations avec Jean Lebrun de l'Université de Louvain dans le cadre du projet Sherpa
- Collaboration avec le professeur Serge SCAVARDA (INSA de Lyon)¹⁸
- Groupe de travail avec le Centre de l'Energie Atomique (CEA) pour la modélisation des Piles à Combustible
- Collaboration avec L'IFP (Sylvie CAUVIN) dans le domaine de la supervision des processus dans le domaine du pétrole.

17. Dossier que j'ai monté d'une façon autonome qui me permet de m'impliquer dans la communauté de la section 62. Une publication dans les Techniques de l'Ingénieurs sur *les Bond Graphs en génie des procédés* est en cours

18. Cette collaboration a donné lieu à la publication de l'ouvrage collectif "les bond graphs" chez Hermes [OUL00_OC].

3.7.4 Niveau international

- Organisation d'une école d'été au mois d'avril 2003 sur "Structural et bond graph" dans le cadre du projet DAMADICS
- Membre du comité du programme International (IPC member) 13th European Simulation Symposium ESS 2001, Marseille (France).
- Présentation dans le cadre d'une école d'été (10-12 juillet 2000) à l'Université Polytechnique de Catalogne (Universitat Politècnica de Catalunya) à Terrassa un cours sur "FDI of physical systems using bond graph approach"¹⁹.
- Organisation d'une session invité en "Modelling and process control" au congrès IEEE CESA'98, Avril 1998, Tunis (6 papiers).
- Organisation d'une session invité en "Diagnosis Techniques for Petrochemical Processes Supervision". IFAC SAFEPROCESS 2003 (8 papiers).
- Sur invitation de l'institut Polytechnique de Porto (ISEP) et de l'université de Kozani (Grèce), cours (de 10h) sur "Modélisation des systèmes physiques par Bond graph", mai 1999 et mai 2000.
- "Reviewer" pour
 - Revues: "Control Engineering Praticce" (1) , Mechanical Systems and Signal Processing, MSSP (1), Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control (1)
 - Congrès: ICBGM (Internationaux International Conference on Bond Graph Modelling) 2001, IEEE SMC 2001, IFAC' 2002, ESM'2001, ... (plus de 20 papiers).
- Plusieurs Présentations (sur le thème développé) dans le cadre de workshops et de projets européens CHEM et DAMADICS (au total ≈30)
- Co-responsable avec Marcel Staroswiecki du projet européen DAMADICS
- Collaboration avec le professeur Joseba QUEVEDO du laboratoire "Advanced Control System Group , Universitat Polytechnica de Catalunya " (publication en commun [OUL02_CI].
- Collaboration avec des universités algériennes dans le domaine de la modélisation et le diagnostic des processus pétrochimiques (cours de bond graph pour les magistères) : Université de Sétif (une bourse de coopération a été obtenue thèse de Khemliche Mabrouk). Publication en commun avec l'INHC de Boumerdés²⁰ (publication en commun [OUL01c_CI], [KHE02a_CI], [KHE02b_CI] et [HAB02_RI]. [OUL01b_CI]).

19. <http://www-esaiiterrassa.upc.es/qmfdi/>).

20. Collaboration avec le laboratoire d'automatique appliquée dirigé par M. Zelmat. Plusieurs séminaires sur la modélisation par bond graph et la surveillance ont été donnés sur place sur invitation de l'INHC.

- Pour le projet IMS CHEM :
 - Responsable de la boîte à outil TB5.1 (impliquant 4 chercheurs) et coordinateur au niveau du LAIL du projet
 - Responsable des tests industriels par les partenaires du projet sur le générateur de vapeur du LAIL
- Collaboration depuis 1996 avec Jean THOMA (publications en commun [OUL00_OC], [OUL97_CI] [TH00_OS]).

Chapitre 4

Liste des publications

« *Le paradis à n'en pas douter, n'est qu'une immense bibliothèque.* » Gaston Bachelard.

4.1 Publications actuelles (1997-2002)

4.1.1 Publications de recherche

► Revues internationales à comité de lecture

1. [LIT99_RI] Litwak R., **B. Ould Bouamama** et M. Staroswiecki (1999). *Modélisation et surveillance d'un générateur de vapeur*. Journal Européen des Systèmes Automatisés, JESA Vol. 33, N°5-6, pp. 611-650, Juillet 1999.
2. [AIT99_RI] Aitouche A., F. Busson, **B. Ould Bouamama** and M. Staroswiecki (1999). *Multiple Sensor Fault Detection of Steam Condensers*. Computers and Chemical Engineering, pp. 585-588, Elsevier Print, 1999.
3. [OUL00_RI] **B. Ould Bouamama** , M. Staroswiecki, B. Riera and E. Cherifi (2000). *Multi-Modelling of Industrial steam Generator*. Control Engineering Practice, CEP, Vol. 8, N° 11, pp. 1249-1260, 2000.
4. [LAM01_RI] Lamiri S., **B. Ould Bouamama** et J. P. Richard (2001). *Modélisation d'un générateur de vapeur par équations à paramètres distribués*. Journal Européen des Systèmes Automatisés, JESA, Vol. 35, N° 3/2001, pp. 239-263, 2001.
5. [HAB02_RI] Habbi, H., M. Zelmat and **B. Ould Bouamama** (2002). *A dynamic fuzzy model for a drum boiler-turbine system*. Automatica Accepted (papier 1107).

► Revues internationales soumises

1. [OUL02a_RI] **B. Ould Bouamama**, M. Bayart, K. Medjaher, B. Conrard (2002). *FDI of Smart actuators using Bond Graphs and external models*. CEP, (en review).
2. [OUL02b_RI] **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki, K. G. Dauphin-Tanguy and A.K. Samantary (2002). *Model builder using Functional and bond graph tools for FDI design*. CEP, (en review).
3. [OUL02c_RI] **B. Ould Bouamama**, (2002). *Bond Graph modelling as integrated tool in process Engineering*. Computers and Chemical Engineering (en review).
4. [OUL02d_RI] **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki and G. Dauphin-Tanguy (2002). *How to generate dynamic models and fault indicators using bond graph tool*. Journal of Systems and Control Engineering. (en review).
5. [OUL02_RI] **B. Ould Bouamama**, (2002). *Bond Graph Approach as analysis tool in thermofluid model library conception*. Journal of Franklin Institute (en révision finale).

► Revues nationales

1. [OUL02_RN] **B. Ould Bouamama** (2002). *Les Bond Graphs et la thermodynamique*. Revue Entropie (accepté)

► Ouvrages de Synthèse

1. [THO00_OS] Thoma J.U. and **B. Ould Bouamama** (2000). *Modeling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. A Bond Graph Approach*. Springer Verlag, 219 pages, Berlin Heidelberg NewYork. 2000.
2. [OUL03_OC] **B. Ould Bouamama** et G. Dauphin-Tanguy Application de la méthode des bond graphs à la modélisation des systèmes énergétiques et des procédés. Techniques de l'Ingénieurs, 16 pages (à paraître en mai 2003).

► Chapitres d'ouvrages Collectifs

1. [OUL00_OC] **Ould Bouamama B.** et Thoma J.U. (2001). *Les Bond Graphs sous la direction de Geneviève Dauphin-Tanguy. Chap. 6 : Procédés thermodynamiques et chimiques*. pp. 236-277, Collection IC2 Systèmes Automatisés Informatique Commande et Communication, Edition Hermes, 383 pages, Paris 2000.

2. [OUL01_OC] **Ould Bouamama B.**, M. Staroswiecki et Litwak R. (2001). *Automatique et statistiques pour le diagnostic. sous la direction de Bernard Dubuisson, chapitre. 6: Surveillance d'un générateur de vapeur.* pp. 168-199, collection IC2 Productique, Informatique Commande et Communication, Edition Hermes, 204 pages, Paris 2001.

► Congrès internationaux avec comité de sélection et actes

1. [OUL96_CI] **Ould Bouamama B.** et G. Dauphin-Tanguy (1996). *Bond Graph model of a steam generator process and its environment.* European Simulation Multiconference ESM'96, pp. 238-242, Budapest, Hungary, June 2-6, 1996.
2. [RIM96_CI] Rimaux S., B. **Ould Bouamama** et G. Dauphin-Tanguy (1996). *Bond Graph Model of the Shrink and Swell phenomenon in a PWR Nuclear Power Plant.* IEEE-SMC, IMACS Multiconference, pp. 288-292, Lille France, July 9-12, 1996.
3. [OUL97_CI] **Ould Bouamama B.**, J. U. Thoma et J.P. Cassar (1997). *Bond graph modelisation of steam condensers.* IEEE-SMC, IMACS Multiconference, pp. 2490-2494, Vol. 3, Orlando USA, October 16-17, 1997.
4. [OUL_98a_CI] **Ould Bouamama B** et A. Nakrachi (1998). *Bond Graph model of pervaporation process.* IEEE-SMC, IMACS Multiconference, pp. 547-551, Tunisia, April 1-4, 1998.
5. [BUS98_CI] Busson F., A. Aïtouche, B. **Ould Bouamama** et M. Staroswiecki (1998). *Sensors Failures Detection in Steam Condensers.* 3rd IFAC Workshop, on-line-Fault detection and supervision in the chemical process industries, Solaize IFP Lyon, France, 4-5 june 1998.
6. [OUL98b_CI] **Ould Bouamama B**, E. Cherifi, M. Staroswiecki et B. Riera (1998). *Supervision of Complex Systems Using Functional, Structural and Bond Graph Models. Application to a Steam Generator and its Environments.* 3rd IFAC Workshop, on-line-Fault detection and supervision in the chemical process industries, Solaize IFP Lyon, France, 4-5 june 1998.
7. [OUL98c_CI] **Ould Bouamama B**, R. Litwak et M. Staroswiecki (1998). *Detection and Isolation of Process Faults in an Industrial Boiler.* 3rd IFAC Workshop, on-line-Fault detection and supervision in the chemical process industries, Solaize IFP Lyon, France, 4-5 june 1998.
8. [LAM99_CI] Lamiri S., B. **Ould Bouamama** et J.P. Richard (1999). *Modelling of a Steam Generator Using Distributed Parameter Equations.* 3rd World Multiconference on Circuit Systems, Communications and Computers, IEEE, CSCC'99 , pp. 217-222, Grèce.
9. [OUL99_CI] **Ould Bouamama B.**, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki et F. Busson (1999). *Bond Graph Technique as a Decision-Making Tool in Supervision Systems,*

- Conference in Graph Thoretic and Entropy Methods in Engineering, pp. 91-97, University of Waterloo, Ontario, Canada 1999.
10. [BUS00a_CI] Busson F. et **B. Ould Bouamama** (2000). *Monitoring of a Steam Generator using a Bond Graph Approach*. IFAC Symposium on Power Plant and System control, pp. 318-323, Brussels, Belgium, April, 26-29, 2000.
 11. [OUL00a_CI] **Ould Bouamama B.**, F. Busson, G. Dauphin-Tanguy et M. Staroswiecki (2000). *Analysis of a structural properties of thermodynamics Systems*. 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS., pp. 1068-1073, Vol.2, Budapest, 14-16 juin 2000.
 12. [OUL00b_CI] **Ould Bouamama B.** et J.P. Cassar (2000). *Integrated Bond graph modelling in Process Engineering linked with Economic System*. European Simulation Multiconference ESM'2000, pp. 23-26, Ghent (Belgique), Mai 2000.
 13. [OUL00c_CI] **Ould Bouamama B.**, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki et D. Del Amo Bravo (2000). *Bond Graph Analysis of Structural FDI Properties in Mechatronics System*, 1st IFAC Conference Mechatronic System, pp. 1057-1062, Vol. 3, Dusseldorf, Septembre 2000.
 14. [OUL01a_CI] **Ould Bouamama B.**, A.L. Gehin et M. Staroswiecki (2001). *Alarm Filtering by Component Modelling and Bond Graph approach*. 4th IFAC Workshop on "on-line fault detection and supervision in the chemical process industries", pp. 198-203, Jeju Island Korea, June 7-8 2001.
 15. [OUL01b_CI] **Ould Bouamama B.**, M. Staroswiecki, G. Dauphin-Tanguy, A. Khellassi, A. Benhalla et M. Zelmat (2001). *Monitoring ability analysis using bond graph approach. Application to distillation column*. 4th IFAC Workshop on "on-line fault detection and supervision in the chemical process industries", pp. 388-393, Jeju Island Korea, June 7-8 2001.
 16. [OUL01c_CI] **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.
 17. [OUL01d_CI] **Ould Bouamama B.** (2001). *Model builder for Thermo-fluid Systems Using a Bond Graph and Functional Modelling*. 3th European Simulation Symposium ESS'01, pp. 822-826, Marseille France, October, 18-20, 2001.
 18. [BAY02_CI] M. Bayart, **B. Ould Bouamama** et B. Conrad (2002). *FDI smart actuators using Bond Graphs and external models*. World Congress on Automatic Control IFAC, Barcelona, Spain, July, 21-26 2002.
 19. [OUL02a_CI] **Ould Bouamama B.**, M. Bayart, J. Quevedo, S. De Las Heras et K. Medjaher (2002). *Bond Graph and External Modeling for FDI Design of Smart Actuators*. IEEE-SMC, IMACS Multiconference, October, 6-9, 2002, Tunisia.

-
- 20 [OUL02b_CI] **Ould Bouamama B**, Samanatory A.K²¹, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki (2002). *Causality Inversion Approach in Derivation of Analytical Redundancy Relations for Fault Detection and Isolation*. International Conference on Bond Graph Modelling, ICBGM'2003, Orlando, Florida, 19-23 january 2003 (acceptée).
 21. [KHE02a_CI] A.Khelassi, C. Bouyahiaoui, A. Maldi, A. Benhalla, M. Djellal, **B . Ould Bouamama**, (2002), *Optimal Fuzzy Control to optimise Energy Consumption in Distillation Columns*, 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, July 21-26, 2002 PERGAMON, An imprint of Elsevier Science.
 22. [KHE02b_CI] A.Khelassi, C. Bouyahiaoui, A. Maldi, A. Benhalla, M. Djellal, **B . Ould Bouamama**, (2002) *Inter-play between equipment design and performances in distillation columns*. 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, 25-29 August 2002 Praha, Czech Republic., ISBN 80-86059-33-2.

► Conférences Nationales avec comité de sélection et actes

1. [OUL96_CN] **Ould Bouamama B.** et G. Dauphin-Tanguy (1996). *Modèle Bond Graph d'un accumulateur de vapeur*. Colloque Automatique Génie Informatique Image AGI'96, pp. 83-86, Tours, 6-7 juin 1996.
2. [OUL97_CN] **Ould Bouamama B.** et J.P. Cassar (1997). *Modélisation par graphes de liaisons en génie des procédés*. Congrès Français de Génie des Procédés, Vol.11, pp. 193-198, Paris 1997.
3. [LAM99_CN] Lamiri S. et **Ould Bouamama B.** (1999), *Modélisation d'un mélange diphasique homogène en utilisant les équations à paramètres distribués*. Journées Doctorales d'Automatique, (JDA'99), pp. 217-220, Nancy, France, Septembre 1999.
4. [OUL02_CN] **Ould Bouamama B**, M. Staroswiecki, et G. Dauphin-Tanguy (2002), *Intégration des modèles externes et Bond Graphs pour la Supervision des Processus en Génie des Procédés*. Journées Technologiques Instrumentation et Capteurs , Ecole Centrale de Nantes, 3-4 juillet 2002.

► Rapports de fin de Contrats industriels

– **Contrat industriel LAIL-EDF : Modélisation par Bond Graph d'une centrale (Septembre 1995-Juin 1997)**

1. [RIM95_RC] Rimaux S., **B. Ould Bouamama** et G. Dauphin-Tanguy (1995). *Approche du modèle Lilliam par bond graph*. Contrat N° P33/2M3502/EP732, ECL-EDF, LAIL, URA CNRS 1440, 73 pages, Janvier 1996.

21. Ce papier est recommandé pour la publication dans SCS journal

2. [RIM96_RC] Rimaux S., **B. Ould Bouamama**, et G. Dauphin-Tanguy (1996). *Bond Graph d'un générateur de vapeur d'une centrale nucléaire REP 900. Modélisation par bond graph des phénomènes gonflement-tassement*. Contrat N° P33/2M3502/EP732, ECL-EDF, LAIL, URA CNRS 1440, 83 pages, LAIL, Mai 1996.
3. [RIM97_RC] Rimaux S., **B. Ould Bouamama** et G. Dauphin-Tanguy (1997). *Simulation du modèle Bond Graph du REP 900. Simulation*. Contrat N° P33/2M3502/EP732, ECL-EDF, LAIL, URA CNRS 1440, 76 pages, Juin 1997.

– **Contrat industriel avec EDF-LAIL : Filtrage d'alarme (Mai 1996-Mai 1999)**

4. [OUL97a_RC] Craye E., A.L. Gehin, **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki et A. Toguyeni (1997). *Analyse bibliographique et Synthèse de filtrage d'alarmes en industries et laboratoires*. Contrat EDF-LAIL P31L19/6A2224/EP824 , 80 pages, Juin 1997.
5. [OUL97b_RC] Craye E., A.L. Gehin, **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki et A. Toguyeni (1997). *Proposition de méthodologies de modélisation en vue du filtrage d'alarmes : Apport de l'outil Bond Graph (17p.)*. contrat, P31L19/6A2224/EP824, 116 pages, LAIL, Décembre 1997.
6. [OUL98_RC] Craye E. A.L. Gehin, **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki et A. Toguyeni (1998). *Analyse du système de réfrigération intermédiaire (SRI) et filtrage d'alarmes. Partie II: traitement des alarmes du SRI par les modèles externes et Bond Graphs (35 pages)*. Contrat EDF-LAIL P31/BO2970/EP885 78 pages, LAIL-EDF, 1998.
7. [OUL99_RC] Craye E., A.L. Gehin, **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki et A. Toguyeni (1998). *Modélisation du RCV (circuit de contrôle volumétrique) et filtrage d'alarmes Partie II: Approche Bond graph (21 pages)*. Contrat : P31/BO2970/EP885, 99 pages, LAIL-EDF, Juin 1999.

– **Contrat industriel ECLille-LAIL-Sherpa Engineering : Bibliothèque de modèles thermofluide 30/05/00-15/09/00**

8. [MAL00_RC]²² Maligorne M., **B. Ould Bouamama** et Dauphin-Tanguy G.(2000). *Conception d'une bibliothèques de modèles thermofluide à l'aide de l'approche Bond Graph*. Contrat EDF-LAIL Sherpa Engineering. 50 pages, Septembre 2000.

– **Contrat industriel ECLille-LAIL-CEA : Modélisation par bond graph des piles à combustible type SOFT (avril 2002-septembre 2002)**

9. [NIES02_RC]²³ Niesner C., **B. Ould Bouamama** et Dauphin-Tanguy G.(2002). *Modélisation et simulation d'un générateur électrique utilisant une pile à combustible à*

22. Réalisé dans le cadre d'un stage de DEA financé par Sherpa Engineering

23. Réalisé dans le cadre d'un stage de DEA financé par le CEA

l'aide de l'outil bond graph. Contrat industriel ECLile-LAIL CEA. 60 pages Septembre 2002.

- **Contrat Européen CHEM Advanced Decision Support System (DSS) for Chemical/Petrochemical manufacturing processes. Project G1RD-CT-2001-00466 Avril 2001-Avril 2004**
- 10. [OUL01a_RC] **B. Ould Bouamama**, A. Toguyéni et M. Staroswiecki (2001). *Basic Functionality Specifications of Toolbox TB5.1*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris, 13 pages.
- 11. [OUL01b_RC] **B. Ould Bouamama**, A. Toguyéni et M. Staroswiecki (2001) *Design Specifications of Toolbox TB5.1* Contrat IMS CHEM, IFP Paris, 16 pages.
- 12. [OUL02a_RC] **B. Ould Bouamama**, A. K. Samantary et M. Staroswiecki (2002) *Methodology of Development of Toolbox TB5.1*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris, 39 pages.
- 13. [OUL02b_RC] **B. Ould Bouamama**, A. K. Samantary et M. Staroswiecki (2002). *Document Type Definition (DTD) for the Toolbox TB5.1*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris.
- 14. [OUL02c_RC] **Ould Bouamama**, A. K. Samantary et M. Staroswiecki (2002). *Detailed specifications of the interactions between the work packages*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris, (123 pages).
- 15. [OUL02d_RC] **B. Ould Bouamama** (2002) *Detailed specifications of Toolbox interactions used for steam generator supervision*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris, 13 pages.
- 16. [OUL02e_RC] **B. Ould Bouamama**, A. K. Samantary et M. Staroswiecki (2002). *Data Specification XML (eXtended Markup Language) methodology for Toolbox TB5.1*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris.
- 17. [CAU02_RC] **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki, A. Toguyeni, et al. (sous la direction de S. Cauvin) (2002) *Mid term report April 2001-October 2002*. Contrat IMS CHEM, IFP Paris. 78 pages.
- **Contrat Européen DAMADICS "Development and Application of Methods for Actuator Diagnosis in Industrial Control Systems"**. Contrat : HPRN-CT-2000-00110.
- 18. [PAT02_RC] **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki (2002), M. Bayart *et al.* (sous la direction de R. J. Patton). *Mid-Term Reports*. Department of Engineering, Hull, HU6 7RX United Kingdom. 28 pages. (sous la direction de R. J. Patton).

► **Autres publications**

– Notes Internes

1. [OUL95_NI] **Ould Bouamama B.** (1995). *Modélisation par bond-graph d'une installation de générateur de vapeur*. Rapport scientifique interne, LAIL URA CNRS, USTL, EUDIL, Octobre 1995²⁴.
2. [POL96_NI] . M. Pollart et **Ould Bouamama B** (1996). *Projet générateur de vapeur, mise au point et interconnexion des sous ensembles mécanique, informatique, commande et modélisation*. Rapport interne LAIL, URA CNRS D1440, décembre 1996.

– Diffusion de la Connaissance

1. [OUL96_DC] **Ould Bouamama B.** (1996). *La méthodologie Bond graph pour la supervision d'un générateur de vapeur*. Groupe de Recherche en Automatique Intégré et Système Homme Machine (*GRAISHyM*). Université de Valenciennes, LAMIH, 1996.
2. [OUL97a_DC] **Ould Bouamama B.** (1997). *Bond graph : approche unifiée de modélisation*. Association Des grandes Ecoles de la Région Nord-Pas de Calais, ADER'97, Marcq en Baroeul, France, 3 avril 1997.
3. [OUL97b_DC] **Ould Bouamama B.** (1997). *Modélisation des systèmes non linéaires par bond graph*. Académie des Sciences Non linéaire russe, Moscou, juin, 1997 (exposé en langue russe).
4. [OUL98a_DC] **Ould Bouamama B.**, F. Busson et A.Aïtouche (1998) *Bond graph et surveillance d'un système thermodynamique*. Association Des grandes Ecoles de la Régions Nord Pas de Calais, ADER'98, Marcq en Baroeul, France, Octobre 1998.
5. [OUL98b_DC] **Ould Bouamama B.** (1998). *Modélisation et Surveillance D'un Générateur de Vapeur*. Groupe de Recherche Surveillance, Sécurité de fonctionnement et diagnostic S3, Paris Octobre, 1998.
6. [OUL98c_DC] **Ould Bouamama B.** (1998). *Simulation d'un Modèle Bond Graph à l'aide de Matlab Simulink*. Groupe utilisateur de Matlab-Simulink, Paris, 18 avril 1998.
7. [OUL00_DC] **Ould Bouamama B.** (2000). *Qualitative modelling using bond graph models*. Vacation School on qualitative modelling²⁵. Terrassa, Espagne, 5-7 Juillet 2000.
8. [OUL00_DC] **Ould Bouamama B.** (2000). *Modélisation par bond graph des systèmes thermofluides*. École Internationale d'été Méthodologie Bond Graph. École Centrale de Lille, 29-31 Août 2000.

24. Le modèle est disponible sur http://www.univ-lille1.fr/lail/gene_vap/fr/Vmpbgi2.htm.

25. École d'été internationale dans le cadre du projet européen DAMADICS

9. [OUL01_DC] **Ould Bouamama B.** (2001). *Bond Graph et Thermodynamique*. Journées thématiques « Nouvelles méthodes en thermodynamiques », organisé par Société Française de la Thermodynamique et Société Française du Génie des Procédés (SFT-SFGP, Paris 16ème, Espace Hamelin, 2 avril 2001.
10. [MRA01_DC] Mrani Alaoui R., P. Tailibert, **B. Ould Bouamama** et M. Staroswiecki, “*Parity space and Temporal bound sequence models*”, 11th International Workshop Principles of Diagnosis Bridge Workshop DX, March 7-9 2001, Via Lattea, Italy.
11. [OUL02a_DC] **Ould Bouamama B.**, M. Bayard, C. Blaise (2002). *FDI of smart actuators using bond graphs and external models*. 4th DAMADICS Workshop on Qualitative Approach for Fault Diagnosis, Institute of Automation and Computer Control Ruhr University Bochum, Germany, 22th-24thMay, 2002.
12. [OUL02b_DC] **Ould Bouamama B.** (2002). *L’outil Bond Graph pour la surveillance des processus industriels*. Groupe de Recherche Surveillance, Sécurité de fonctionnement et diagnostic S3, Paris 17 Avril 2002.²⁶
13. [OUL02c_DC] **Ould Bouamama B.** (2002). *Capteurs pour la supervision des processus*. Les après-midi technologies & solutions. organisé par la chambre de Commerce et d’Industrie de Lille Applica, Institut Supérieur d’Electronique du Nord (ISEN), 21 mars 2002.²⁷
14. [OUL02d_DC] **Ould Bouamama B.** (2002). *Les Bond Graphs : un outil pédagogique pour la représentation et la compréhension de la thermodynamique*. Réunion Projet : PRI CARNOT CNRS. Paris, 16 septembre 2002.²⁸

4.1.2 Publications pédagogiques

1. [OUL97_PP] **Ould Bouamama B.** (1996). *Régulation industrielle*. Université de Lille 1, Polytech’Lille, France, 163pages.²⁹
2. [OUL98_PP] **Ould Bouamama B.** (1998). *Automates Programmables*. Université de Lille 1, IUT “A”, Département de Génie Electrique et Informatique Industrielle DIUT Multi Media, (MMA), 1998.
3. [AIT01_PP] Aitouche A., **Ould Bouamama B.** (2001). *Plate Forme Hydraulique : Un Outil Pédagogique pour la Modélisation par Bond Graph distribués*. Colloque sur l’Enseignement des Technologies et des Sciences de l’Information, CETESIS-EEA, Campus de Cezeaux Universités Clermont-Ferrant, 29 et 30 Octobre 2001.

26. Présentation disponible sur <http://www.univ-lille1.fr/s3/fr/cr-17-4-02.htm>

27. Présentation disponible sur <http://www.applica.tm.fr/ts/download/20020321laail.ppt>

28. Suite à cette réunion, il a été convenu sur une proposition du professeur A. Lallemand (UMR 5008 SPI INSA de Lyon) d’éditer un chapitre dans les techniques de l’ingénieur sur la contribution des bond graphs pour la représentation des systèmes thermodynamiques

29. Cours disponible sur <http://www.univ-lille1.fr/~eudil/belk/sc00a1.htm>

4. [OUL02_PP] **Ould Bouamama B.** (2002). *Modélisation par bond graph des système multivariables. Méthodes de Découplage.* Ecole Polytechnique Universitaire de Lille (EPUL) 2002.

4.2 Publications antérieures (1988-1994)

► Thèse

1. [OUL88_TH] **Ould Bouamama B.** *Commande optimale du procédé de production de soufre par la méthode de Claus dans le but de diminuer le taux de pollution*, thèse de Ph.D; YDK Moscou décembre 1987, 186p. (en russe).

► Revue nationale

1. [RAD86_RI] Radkevitch V.V., N.I. Doudkin et **B. Ould Bouamama** (1986). *Méthodes d'optimisation du procédé d'obtention de l'élément soufre à l'aide de calculateurs numériques.* Revue - Industrie gazière - série: Automatisation et télémechanisation), Edition spéciale, 36pages, Moscou, 1986, (en russe), traduction en français disponible.

► Conférences nationales avec actes

1. [OUL92_CN] **Ould Bouamama B.** (1992). *Modélisation et commande optimale des procédés chimiques catalytiques d'oxydation du soufre en vue de minimiser le taux de pollution.* Séminaire national "Modélisation et Outils d'Aide à la Décision", Vol. n° 1; Université PAU (France) et Bédjaïa (Algérie), pp. 259-266, Université PAU (France) et Bédjaïa (Algérie).
2. [ZEL92_CN] Zelmat M. et **B. Ould Bouamama** (1992). *Approche sur la modélisation d'un système à paramètres distribués par un modèle à paramètres localisés.* Séminaire national en signaux, systèmes et automatismes (SAA); Vol. n° 1, pp. 342-351, Université de Blida, décembre 1992.
3. [OUL93_RC] **Ould Bouamama B.**, M. Djallal, et Z. Mimoun (1993) *Identification, Modélisation et Commande du procédé de production de détergents*, Rapport scientifique, Projet de recherche N°J3520/02/01/93, Ministère de l'Enseignement Supérieur, Boumerdés, Algérie, 1993, 30 pages.
4. [OUL92_PP] **Ould Bouamama B.** (1992). *Systèmes asservis non linéaires.* Travaux pratiques pour élèves ingénieurs. 75P. I.N.H.C. Boumerdés, 1992.
5. [ZEL93_PP] Zelmat M. et **B. Ould-Bouamama** (1993). *Introduction à la simulation analogique.* 50P. I.N.H.C. Boumerdés, 1993.

-
6. [OUL94a_PP] **Ould Bouamama B.** (1994). *Modélisation des systèmes économiques*. Institut Supérieur de Gestion industrielle, groupe Ecole Supérieure de Commerce ESC, Lille, Juillet 1994, 94 pages.
 7. [OUL94b_PP] **Ould Bouamama B.** (1994). *Dynamique des systèmes*. Institut Supérieur de Gestion industrielle, groupe Ecole Supérieure de Commerce ESC, Lille, juillet 1994, 74 pages.

Deuxième partie

MEMOIRE DE RECHERCHE

Chapitre 5

Commande et Modélisation des Processus Chimiques

5.1 Contexte

Mes travaux de recherche pendant la période de la thèse et post doctoral (1988-1994) concernent la commande optimale en vue de minimiser le taux de pollution, appliquée à deux types de procédés chimiques catalytiques : le traitement des gaz soufrés et les procédés chimiques de production des détergents.

La problématique de la commande des processus chimiques catalytiques est toujours d'actualité en raison de la complexité et la diversité des procédés industriels. Ils sont régis par l'interaction de phénomènes hydrodynamiques, cinétiques et thermiques. La connaissance de tels systèmes nécessite en conséquence une modélisation dans trois domaines physiques différents, comme indiqué sur la figure 5.1. x , t , K , C et T représentent respectivement les variables espace, temps, vitesse de réaction, concentration, et température.

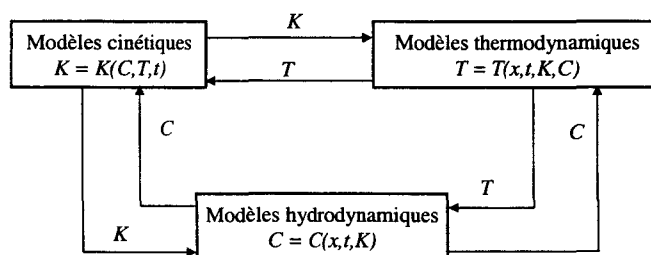


FIG. 5.1 – Modélisation d'un processus chimique catalytique

Du point de vue écologique et donc économique, le rendement de tels procédés est principalement influencé par l'état du catalyseur et des réactions secondaires qui s'y déroulent. Il

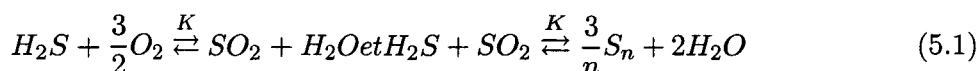
est évident que la résolution du problème du maximum du taux de conversion (maximisation du rendement) résout aussi celui du minimum de pollution. En raison de la non stationnarité de ce type de procédé, les conditions d'optimalité varient en fonction de l'état technologique (état du catalyseur, type de réactions secondaires etc.). Une stratégie de commande adaptative est alors inévitable. Les différentes techniques de commande des processus complexes (cracking, production de soufre, Claus ...) sont souvent évaluées sur la base des seuls résultats de simulation ou appliquées à des procédés pilotes, loin en conséquence des réalités industrielles. Plusieurs travaux ont été publiés dans ce domaine, une recherche bibliographique est bien développée dans [OUL 87] et [RAD 86].

5.2 Application au traitement des gaz soufrés

Nous sommes en 1987, la communauté d'Automatique (même en Russie) vit en plein développement de la commande adaptative. De nombreuses applications industrielles concernent les applications des mécanismes d'adaptation.

Mon travail de thèse avait pour ambition d'aller au delà des applications de quelques algorithmes en ligne de commande et d'identification.

Je suis parti d'une problématique posée par plusieurs unités industrielles de traitement des gaz soufrés (dont le taux en soufre peut varier d'un gisement à un autre de 0.3 à 30%). L'usine de traitement de gaz se présente comme un complexe chimique, permettant d'obtenir le gaz naturel et un ensemble de produits finis : éthane, propane, butane, condensât, soufre etc. L'obtention du soufre à partir du sulfure d'hydrogène (contenu dans le gaz) est réalisé dans un stade thermique et dans deux stades catalytiques selon deux réactions chimiques



Hormis ces réactions plus de 150 réactions secondaires ont lieu.

La problématique consiste en ce qu'en dépit d'énormes progrès enregistrés (à l'époque) dans le domaine du contrôle de ce procédé (répandu en France (région de Lacq), Canada, CEI et USA), par les sociétés spécialisées (Elf-Aquitaine, Rhône -Poulenc, Technip,..), le rendement global des usines reste relativement faible (<92%). Il subsiste en conséquence des produits soufrés résiduels, principalement sous forme d'oxyde de soufre qui constitue la principale source de pollution après incinération. Ce taux de pollution est limité par les instances internationales à moins de 1.2mg/100m³.

Un grand nombre de publications (développées dans [RAD 86]) proposait soit des solutions chimiques (relatives au choix de la température dans le réacteur du stade thermique, du temps de séjour du mélange réactionnel dans le réacteur ou aux questions d'aérodynamique du mélange du gaz acide avec l'air) ou de commande.

A cet effet, sur la base de la recherche bibliographique, il est apparu que les propriétés cinétiques du procédé ne sont pas examinées dans la conception du système de commande. La stratégie de commande utilisée, basée sur le maintien massique des produits de réaction au niveau stoechiométrique (donc égal à deux selon la réaction 5.1) n'est en conséquence pas optimale. Des recherches expérimentales ont confirmé cette conclusion.

Sur la base des valeurs des constantes de vitesse, calculées pour différentes températures de fonctionnement pour 43 réactions, nous avons recensé les principales réactions chimiques influentes devant figurer dans le modèle global du processus.

Le modèle dynamique cinétique peut être écrit (pour chaque vitesse W_i) sous la forme :

$$W_i = \sum_{j=1}^N K_{0j} \cdot e^{-\frac{E_j}{RT}} \cdot C_{ij}^{\alpha_j} \cdot C_j^{\beta_j} \quad (5.2)$$

$K_{0j} \cdot e^{-\frac{E_j}{RT}}$ est la constante de vitesse des réactions directes déterminée selon l'équation d'Arrhenius. $C_{ij}^{\alpha_j}$: concentration du i^{me} composant selon la réaction avec le j^{me} réactif. C_j : concentration du j^{me} réactif. α_j et β_j sont les ordres de la réaction selon le i^{me} et le j^{me} composé.

La variation de la concentration $\frac{dC_i}{dZ}$, lorsqu'on est en présence d'un réacteur catalytique est une fonction de la densité, de la masse de l'épaisseur du catalyseur.

Le procédé de traitement de gaz soufrés est constitué d'un stade thermique et de plusieurs stades catalytique. A titre d'exemple pour le stade thermique où sont sélectionnées cinq réactions, le modèle cinétique devient :

$$\begin{aligned} \frac{dC_{H_2S}}{dZ} &= -\frac{A}{V} [2K_1 C_{H_2S}^2 \cdot C_{O_2} + K_2 C_{H_2S} \cdot C_{O_2}^{1.5} + 2K_3 C_{H_2S}^2 \cdot C_{SO_2} + K_5 C_{H_2S} \cdot C_{CO_2}] \\ \frac{dC_{O_2}}{dZ} &= -\frac{A}{V} [K_1 C_{H_2S}^2 \cdot C_{O_2} + 1.5K_2 C_{H_2S} \cdot C_{O_2}^{1.5} + 2K_4 C_{CH_4} C_{O_2}^2] \\ \frac{dC_{S_2}}{dZ} &= -\frac{A}{V} [-K_1 C_{H_2S}^2 \cdot C_{O_2} - 1.5K_3 C_{H_2S}^2 \cdot C_{SO_2}] \\ \frac{dC_{SO_2}}{dZ} &= -\frac{A}{V} [-K_2 C_{H_2S} \cdot C_{O_2}^{1.5} + K_3 C_{H_2S}^2 \cdot C_{SO_2}] \\ \frac{dC_{COS}}{dZ} &= -\frac{A}{V} [-K_5 C_{CO_2} \cdot C_{H_2S}] \\ \frac{dC_{CH_4}}{dZ} &= -\frac{A}{V} [K_4 C_{CH_4} \cdot C_{O_2}^2] \end{aligned} \quad (5.3)$$

où: A et Z représentent respectivement la section et la longueur du réacteur thermique, V le volume du mélange en réaction, et C la concentration du produit. K_i ($i = 1,2,\dots,5$) sont les constantes de vitesse à l'équilibre des réactions.

Soit :

$$X_1 = C_{H_2S}; X_2 = C_{O_2}; X_3 = C_{SO_2}; X_4 = C_{COS}; X_5 = C_{CO_2}; X_6 = C_{SO_2}; X_7 = C_{S_2} \quad (5.4)$$

L'action de commande que nous désignerons par $u = X_1/X_2$ est assurée par le rapport des débits d'air et de gaz à traiter à l'entrée de l'unité industrielle (Fig. 5.2).

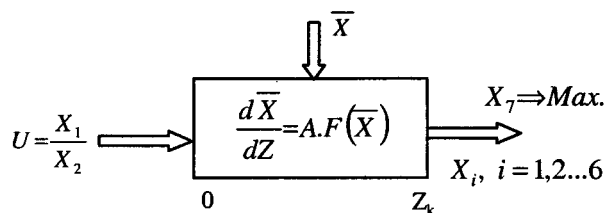


FIG. 5.2 – Schéma fonctionnel du système de commande

La fonction de but étant :

$$S(x) = \int_0^{Z_k} (1.5K_3X_1^2X_3 + K_1X_1^2X_2)dZ \Rightarrow \max \quad (5.5)$$

La problématique de la conduite de ce type de procédé consiste en la détermination d'un vecteur de commande u optimale maximisant la quantité de soufre obtenue S du modèle cinétique.

Résolvant le problème d'extremum $dS/du = 0$ développé dans le travail [OUL 87]; l'expression de l'action de commande optimale u_{opt} est une fonction des constantes de vitesse K .

Le rapport optimal H_2S/SO_2 , contrairement aux thèses adoptées jusqu'à ce jour n'est pas constant mais varie en fonction du régime technologique et particulièrement des vitesses de réaction i.e. de l'état du catalyseur. D'autre part, des études expérimentales réalisées à l'unité de traitement de gaz d'Orenburg (CEI) ont confirmé ces conclusions et nous ont permis de spécifier que le rapport stoechiométrique $H_2S/SO_2 = 2$ n'est optimal (minimum de rejet toxique) que lorsque les vitesses des réactions sont grandes (catalyseur neuf).

L'algorithme de commande appliqué à l'unité d'Orenburg est réalisé à trois niveaux. Le premier niveau est destiné à la stabilisation et la correction du rapport air/gaz à l'entrée du réacteur thermique. Cet algorithme est constitué principalement d'une relation déterminée sur la base du chimisme du processus liant les quantités de H_2S et du méthane (CH_4) introduits dans le réacteur. Le deuxième niveau assure la prédiction de la grandeur quasi-optimale du rapport air-gaz. L'algorithme de commande de ce niveau que nous avons développé consiste en la détermination d'un tel rapport air/gaz pour lequel la valeur H_2S/SO_2 est optimale au sens du maximum de rendement i.e. minimum de rejet. Le troisième niveau résout le problème d'optimisation du processus au sens de maximisation de l'espérance mathématique du taux de conversion calculé en fonction des paramètres mesurés du procédé.

5.3 Application aux procédés de production des détergents

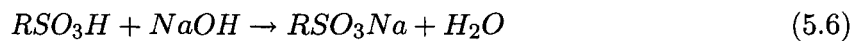
Le thème développé s'est poursuivi en Algérie à l'INHC où j'exerçais en qualité d'enseignant chercheur permanent, dans le cadre d'un projet de recherche sur l'automatique appliquée à l'industrie chimique et pétrochimique. On s'occupait particulièrement des méthodes d'identification, de la modélisation mathématique des processus technologiques (Chimiques et pétrochimiques) et des moyens informatiques pour leur application industrielle sur la base de nouvelles techniques de commande. Précisément, les recherches ont été axées sur l'application d'une commande optimale hiérarchisée du procédé de production des détergents afin de minimiser le taux de pollution.

La problématique posée est une pollution enregistrée caractérisée par de sérieuses brûlures de la végétation dues à la présence de SO_2 et SO_3 . Ce taux de pollution dépassait largement les normes internationales.

L'unité industrielle est composée de trois section:

- Fusion et dosage du soufre: $S + O_2 \xrightleftharpoons{K} SO_2$,
- Production du trioxyde de soufre: $2SO_2 + O_2 \xrightleftharpoons{K} SO_3 + Q$
- et Production du DuoDecyl Benzène Sulfonate (DDBS): $DDB + SO_3 \rightarrow DDBS$

Le produit final - le DDBS est neutralisé par une solution de soude (NAOH). La valeur de PH de la pâte neutralisée est l'indice de qualité qui nous renseigne sur la qualité du procédé de sulfonation (la présence d'insulfonés) :



Le procédé est schématiquement représenté par la figure 5.3.

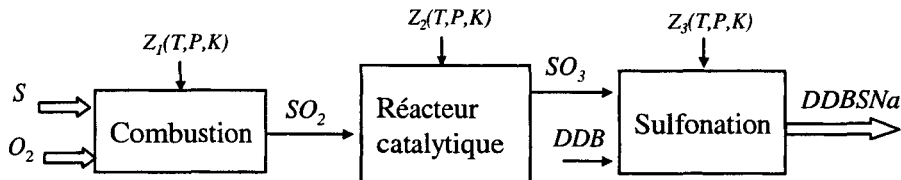


FIG. 5.3 – Schéma de principe de la production des détergents

La stratégie de commande consiste à déterminer un vecteur de commande

$$\mathbf{U} = \left\{ \frac{S}{O_2}, \frac{SO_2}{O_2}, \frac{SO_3}{DDB}, T \right\} \quad (5.7)$$

qui assure un taux de conversion η maximal

$$\eta\left(\frac{S}{O_2}, \frac{SO_2}{O_2}, \frac{SO_3}{DDB}, T, K, P\right) \Rightarrow \max \quad (5.8)$$

en respectant les contraintes de température T , débits F , et pression P :

$$T \in A, P \in B, F \in C \quad (5.9)$$

A , B , et C sont des domaines définis en fonction du cahier des charges.

Un modèle cinétique permettant de connaître les quantités optimales de DDB et de SO_3 pour obtenir un rendement maximal en DDBS, un modèle hydrodynamique afin de connaître le temps de séjour optimal de l'appareil, un modèle thermique pour déterminer la température optimale stable de fonctionnement du réacteur ont été obtenus.

Une système de commande analogue au système réalisé pour le traitement des gaz soufrés a été proposé [OUL 93].

5.4 Conclusion

L'originalité de mes travaux de recherche appliquée (qu'il faut bien situer dans le contexte de l'époque) réside d'abord en l'application de l'automatique à des procédés complexes en vue de diminuer le taux de pollution. Ce sujet est sans doute aujourd'hui conjoncturellement plus d'actualité. D'autre part, il a été montré l'importance de la modélisation dans la conception des stratégies de commande. Habituellement, un problème de pollution dans les unités chimiques est d'abord abordé en termes de solutions technologiques (ajout d'unité de traitement des effluents) ou purement chimique (choix de la température dans les réacteurs, temps de séjour du mélange réactionnel, questions d'aérodynamique du mélange, ..). En regard des travaux existants sur ce thème, l'originalité se situe à plusieurs niveaux :

- Elaboration du modèle mathématique et cinétique du procédé ;
- Sur la base de l'analyse du modèle obtenu (confirmé par des résultats expérimentaux), proposition d'une nouvelle stratégie de commande à trois niveaux (optimisation, prédiction, et stabilisation)
- Application industrielle du système proposé à l'unité d'Orenburg sur la base d'une architecture décentralisée. Un effet économique important a été enregistré suite à l'augmentation du rendement du procédé.

La sensibilité du sujet a limité la publication des résultats de recherche dans une revue russe (traduction en français disponible).

★ *Malgré le peu de moyens et la politique de recherche sur place, ces travaux ont donné lieu à des publications dans une revue [RAD 86], et des communications [OUL 92],*

[ZEL 92] d'un rapport de recherche [OUL 93] et à des présentations dans des colloques et manifestations sans actes que je ne cite pas en référence.

Dans le cadre de ce thème de recherche, j'ai dirigé la thèse de magistère de Menzou Mohamed "Modélisation et commande hiérarchisé des processus chimiques (1992-1993)".

Chapitre 6

Modélisation par bond graph en génie des procédés

”Si la girouette pouvait parler, elle dirait qu’elle dirige le vent”. Jules Renard

6.1 Bond graph thermodynamique et chimique

La modélisation par bond graph des systèmes dynamiques a connu d’énormes progrès depuis son apparition en 1961,[PAY 61] (une bibliographie exhaustive est donnée dans [BRE 91]).

Les processus technologiques en génie des procédés sont caractérisées par l’interaction des phénomènes thermiques, hydrauliques et chimiques. Ces trois formes de puissances sont couplées et sont représentées par ce que nous appelons *bond graph à énergies couplées*. Ainsi, les systèmes thermofluides introduisent une complexité supplémentaire dans leur modélisation, puisque le flux d’énergie thermique est lié à la masse du fluide transporté d’une position à une autre sans effet de dissipation.

En génie des procédés, comprenant la transformation de matière, on propose alors de présenter les variables de puissance sous forme vectorielle [OUL 02d] [OUL 01a].

$$E = \begin{bmatrix} e_h & e_t & e_c \end{bmatrix}^t, F = \begin{bmatrix} f_h & f_t & f_c \end{bmatrix}^t \quad (6.1)$$

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

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

Nous représentons le couplage de ces énergies par un lien entouré par un anneau comme indiqué sur la figure 6.1a [THO 00]. D’autres auteurs [KAR 81], [BRE 85] [KAR 90b] utilisent

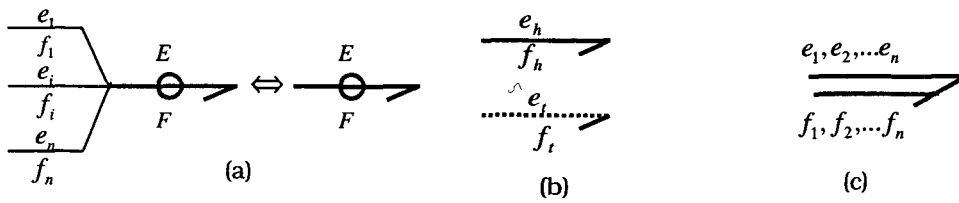


FIG. 6.1 – Représentation des bonds graphs multiénergies

deux liens en pointillés (thermique) et en trait plein (hydraulique) ou par deux liens séparés (c).

En génie des procédés, l'utilisation de vrais bond graphs introduit des variables d'effort thermique et chimique (entropie, potentiel chimique) qui sont de nature complexe et inadaptées aux problèmes de simulation, car ils n'obéissent pas à des lois de conservation simples. On introduit alors pour leur modélisation un pseudo bond-graph [KAR 81] 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 d'un vrai bond graph restent valables pour un pseudo bond graph (causalité, mise en équation ...).

L'autre complexité qui s'ajoute est la définition des variables de puissance. En effet, dans les systèmes mécaniques et électriques, le nombre de variables de liaison est égal au nombre de degrés de liberté. Ainsi, dans un système électrique (ou mécanique) le nombre de degrés de liberté (égal à deux) est égal au nombre de variables de puissance puisque la paire de variables tension-courant (ou force-vitesse) décrit complètement le système. Par contre, les systèmes thermofluides (un fluide en écoulement par exemple) sont caractérisés par un ensemble de variables, qui est pour les efforts : la pression P et la température T , et pour le flux, le débit volumique \dot{V} (ou massique \dot{m} pour le fluide compressible) et le flux d'entropie \dot{S} . D'autres variables peuvent aussi intervenir telles que le flux d'énergie interne, \dot{U} , le flux d'enthalpie \dot{H} , ou la qualité X d'un mélange eau - vapeur. On remarque que le nombre de variables est supérieur au nombre de degrés de liberté, c'est pourquoi le choix de la variable de liaison n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser. La liste et le choix des variables de puissance sont développés dans [THO 00] et [OUL 00f].

En vrai bond graph, la variable de flux thermique est le flux d'entropie \dot{S} . Mais, l'entropie n'est pas conservée dans un processus de convection. Dans le cas de la modélisation de la matière au repos (problème de conduction) qu'on rencontre en général dans les échangeurs de chaleur, dans les fours, dans les pertes thermiques à travers les parois etc., on peut utiliser aussi bien la paire $(T - \dot{S})$ pour constituer un vrai bond graph que la paire température-flux thermique $(T - \dot{Q})$ pour un pseudo bond graph. L'utilisation de cette dernière est toutefois plus commode. En effet, le flux de chaleur échangé entre deux corps (portés à des température

T_1 et T_2) est décrit par une simple équation constitutive en pseudo bond graph (analogue à la loi d'ohm en électricité, où R est la résistance thermique) :

$$\dot{Q} = \frac{1}{R} (T_1 - T_2) \quad (6.2)$$

ce qui se représente facilement par un modèle bond graph. Par contre, l'utilisation du flux d'entropie conduit à écrire les lois sous forme non linéaire couplée (les deux variables \dot{S}_2 et \dot{S}_1 s'expriment en fonction des deux efforts T_1 et T_2 ce qui nécessite l'utilisation d'un élément R à deux ports L'expression des flux d'entropie déduite de l'équation de Carnot est :

$$\dot{Q} = \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \frac{1}{R} \frac{(T_1 - T_2)^2}{T_1 T_2} \quad (6.3)$$

La calcul de l'effort thermique ($T_1 - T_2$) à partir de l'équation 6.3 devient complexe.³⁰

Dans le cas des processus thermofluides, nous modélisons deux énergies (hydraulique avec l'indice h et thermique avec l'indice t). e_t et e_h représentent alors respectivement la pression et l'enthalpie spécifique ou la température. f_t et f_h représentent respectivement le flux thermique et hydraulique.

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

$$\dot{E} = \dot{m} \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{\rho v^2}{2} \right) \quad (6.4)$$

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

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

$$h = u + \frac{P}{\rho} = c_p T \quad (6.5)$$

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

$$\dot{H} = \dot{m} h = \dot{m} c_p T \quad (6.6)$$

(h restant constante pendant le transport du fluide)

En pseudo bond graph, la variable de flux thermique est le flux d'enthalpie \dot{H} dans le cas de la convection (thermodynamique avec matière en mouvement) et du flux thermique \dot{Q} dans le cas de la conduction.

30. Le problème de calculabilité des variables est posé dans les méthodes de surveillance à base de modèle pour la génération des indicateurs de fautes

Un certain nombre de travaux existent dans le domaine thermodynamique, ([THO 75] [THO 77] [BRE 84], [KAR 90a], [THO 90],[MUK 00]), chimique, ([OST 73], [LEF 85]), pneumatique et hydraulique [SCA 00].

Dans le domaine du génie des procédés (chimique, thermofluide, électrochimique) peu de travaux concernent des applications bien définies tels que des processus de génération de vapeur dans les centrales nucléaires, ([TYL 83], [MOK 97]), des phénomènes thermofluides ou changement de phase, ([GRE 01b], [GRE 01a]), des phénomènes physico-chimiques (séparation de gaz, distillation du pétrole, ...), ([HEN 00], [BRO 93], [DET 89]), transport mécanique, ([BRA 93], [DET 89]).

Dans nos travaux [OUL 98b], [OUL 00b], [THO 00], nous avons alors développé essentiellement la modélisation par bond graph de ces phénomènes autour de trois notions : entropie, enthalpie et puissance. L'entropie est approchée non comme quelque chose d'abstrait, mais comme une charge thermique (analogue à une charge électrique), un concept trouvant ses origines chez Sadi Carnot en 1824. La modélisation des phénomènes de changement de phase et de transformation de la matière, les notions de résistance, capacité et tension chimiques sont introduites pour modéliser la dynamique des réactions chimiques. D'autres phénomènes tels que la condensation, l'évaporation de la vapeur ainsi que l'osmose sont développés avec des applications industrielles concrètes (ventilation dans les bâtiments, circuit du carburant diesel dans une voiture, générateur de vapeur, pile à combustible, ...).

★ *Les travaux développés ont donné lieu à plusieurs publications ([OUL 96a], [RIM 96], [OUL 97b], [THO 00], [OUL 00f]). Deux publications présentent une synthèse de ces travaux : un ouvrage de chez Springer verlag et la seconde a fait l'objet d'un chapitre dans l'ouvrage Collection IC2 Systèmes Automatisés Informatique Commande et Communication, Edition Hermes. Cette dernière publication est fournie dans le présent rapport.*

6.2 Bond graphs en électrochimie - application à la pile à combustible SOFC

6.2.1 Positionnement

Face aux problèmes de l'environnement, les industriels se focalisent sur l'idée d'utiliser une source autonome d'énergie électrique, à savoir la pile à combustible [MOR 96]. Parmi les cinq classes de piles à combustible [BLO 96]: les **SOFC** (Solid Oxyde Fuel Cell), les **PAFC** (Phosphoric Acid Fuel Cell), les **AFC** (Alcaline Fuel Cell), les **MCFC** (Molten Carbonate Fuel Cell), les **PEMFC** (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

La SOFC suscite actuellement un grand intérêt compte tenu de ses performances présentes et potentielles; en effet, le haut niveau de température des rejets thermiques (de l'ordre de 800°C) permet une valorisation intéressante au travers de cycles combinés (on peut attaquer une turbine à gaz en sortie de pile) ce qui conduit à un rendement global (électrique + thermique) supérieur à 80%). Le coût élevé des prototypes ne permet pas de multiplier les réalisations et les essais. L'objectif ambitieux de la modélisation est de répondre aux questions soulevées par le problème de l'optimisation d'un groupe électrogène à pile à combustible en limitant le nombre d'expériences sur des systèmes complets.

Notre objectif dans le cadre d'un projet de Recherche avec le Centre de l'Energie Atomique (CEA) (2002-2003) est de modéliser la dynamique de l'ensemble des phénomènes hydraulique, thermiques, chimique et électrochimique d'une pile SOFC à l'aide d'un seul langage : les bond graphs. *Les résultats de cette recherche sont confidentiels conformément aux clauses du contrat avec le CEA, nous ne diffusons qu'un résumé afin de situer notre travail dans ce domaine.*

Très peu de travaux dans la littérature concernent la modélisation dynamique des piles à combustible. Souvent les modèles proposés sont statiques et destinés au dimensionnement. Beaucoup concernent les piles PEMFC. L'équipe de S. Gottesfeld [SPR 91] [SPR 93] du Laboratoire Los Alamos National Laboratory (LANL) s'est focalisé sur le comportement d'une cellule monodimensionnel de PEMFC étudiée en laboratoire dans un régime isotherme et en fonctionnement stationnaire. Le modèle décrit dans [NGU 93] reprend les principes du modèle développé par le LANL en essayant d'étendre son champs d'application aux cellules de grandes tailles. Dans [BER 91] [BER 92], les gaz sont supposés toujours saturés en eau, le modèle ne pourra donc pas rendre compte d'un assèchement de la membrane.

Concernant l'approche bond graph, les premiers travaux sont développés dans la thèse de M.K. Kong ([KON 78], [KAR 90a]). Ce travail concerne la modélisation dynamique de batterie au plomb. C'est un modèle monodimensionnel, qui comporte plusieurs mailles. Plus tard, Karnopp [KAR 90a] a présenté un modèle très simplifié de la réaction électrochimique uniquement dans une demi cellule à zinc galvanisé sans une réelle application.

Le modèle développé [NIE 02] s'applique à un banc de manipulation implanté au LEPMI de Grenoble: le banc SOLO. (fig. La cellule comporte deux demi-plaques bipolaires à canaux, pour l'alimentation en gaz combustible H_2 et air et d'un élément de type CEA (Cathode Electrode Anode) ou EME (Electrode Membrane Electrode). Le schéma fonctionnel est donné (fig. 6.2a)

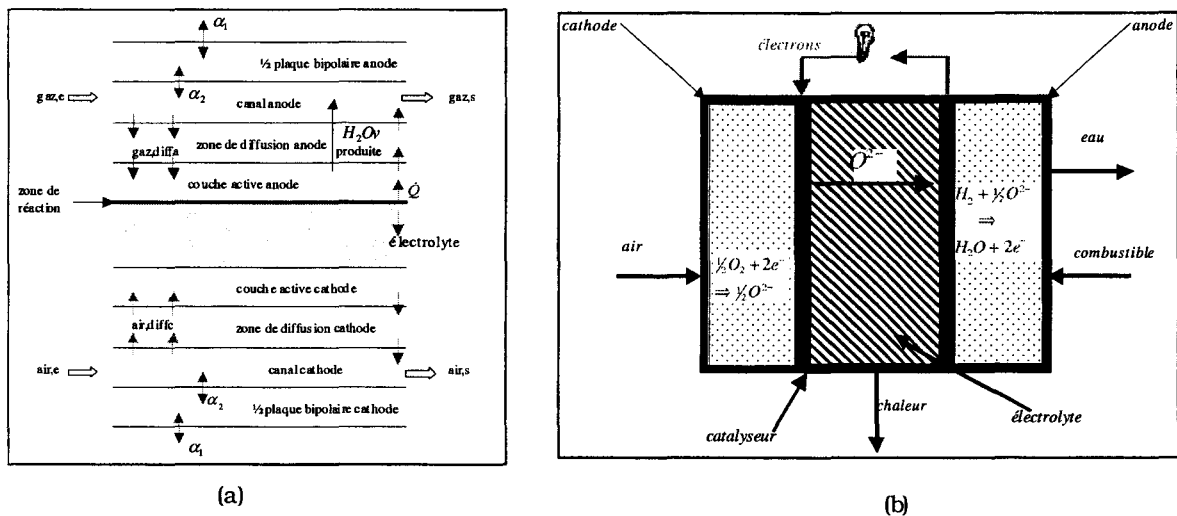
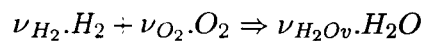
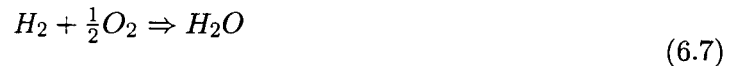


FIG. 6.2 – Représentation schématique de la cellule modélisée et principe de fonctionnement d'une PAC

6.2.2 Modèle bond graph de la réaction électrochimique

Le principe de fonctionnement d'une PAC est simple (fig.6.2b) : il s'agit d'une combustion électrochimique d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte; c'est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau.

Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de température, de $70^\circ C$ à $1000^\circ C$. Selon la température, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé. L'eau est produite sous forme vapeur (H_2O_v), car la température de fonctionnement est élevée ($800^\circ C$).

L'oxydation du combustible (fig. 6.2b), principalement de l'hydrogène, produit des électrons qui sont collectés à l'anode.



A la cathode, des électrons sont au contraire prélevés pour la réduction du comburant, principalement de l'oxygène.



Rappelons que l'affinité chimique A est une variable d'effort qui représente la force motrice qui pilote la réaction. Concernant les relations liants les flux, les transformateurs TF divisent le flux molaire \dot{n}_i par le coefficient stoechiométrique ν pour obtenir la vitesse de réaction J : $J = \frac{\dot{n}_i}{\nu_i}$. Où ν_i sont les coefficients stoechiométriques de la réaction $\nu_{O_2} = \frac{1}{2}$, $\nu_{H_2} = 1$, $\nu_{H_2O} = 1$

D'autre part les affinités chimiques et les vitesses de réactions sont définies par :

$$A = \sum \mu_i \cdot \nu_i \quad (6.10)$$

$$\dot{n}_i = \pm \nu_i J \quad (6.11)$$

Où le signe (+) est utilisé pour les produits de la réaction et (-) pour les réactants. Sur le bond graph le signe est indiqué par le sens de la demi-flèche (O_2 et H_2 sont consommés et H_2O est produite).

Dans le cas plus général si on considère le milieu de la réaction comme un multiport C (un volume de contrôle) où est stockée de l'énergie interne donnée par l'équation de Gibbs :

$$dU = Tds - PdV + \sum \mu_i dn_i \quad (6.12)$$

Dans les réactions chimiques, il est plus commode d'utiliser la fonction de Gibbs :

$$G = U + PV - TS = G(T, P, n_i), \text{ d'où : } dG = -SdT + VdP + \sum \mu_i dn_i \quad (6.13)$$

Si les efforts (température et pression sont imposées) (c'est le cas du modèle bond graph ci dessus), alors l'énergie chimique présente ne vient pas de l'énergie interne U mais de l'énergie libre de Gibbs :

$$-dG = \sum \mu_i dn_i = A \cdot J \quad (6.14)$$

Dans les conditions d'équilibre, la vitesse de réaction est nulle, l'énergie de Gibbs ΔG est constante.

Près des conditions d'équilibre l'affinité directe (A^f) est égale à l'affinité inverse (A^r). L'affinité chimique et la vitesse de réaction deviennent alors très petites, le potentiel de la pile E est déduit de l'énergie libre de Gibbs créée par la réaction et dépend du nombre d'électrons échangés ($n_e = 2$) et de la constante de Faraday ($F = 96484.6 \text{ C.mol}^{-1}$). Sur le bond graph, ce phénomène est modélisé par le transformateur TF (transformant l'énergie chimique en énergie électrique) modulé par le nombre de charge, $n_e \cdot F$:

$$E = -\frac{\Delta G}{n_e \cdot F} \quad (6.15)$$

En équilibre, l'énergie libre de Gibbs est déduite de la relation constitutive de la jonction 1_1 comme la somme des potentiels chimiques pondérés par les coefficients stéchiométrique (avec des signes + pour les produits de la réaction et - pour les réactants) :

$$\sum \mu_i \cdot \nu_i = -\Delta G = \nu_{O_2} \cdot \mu_{O_2,caa} + \nu_{H_2} \cdot \mu_{H_2,caa} - \nu_{H_2Ov} \cdot \mu_{H_2Ov,caa} \quad (6.16)$$

Les potentiels chimiques sont calculés de la façon suivante dans les couches actives: anode $\mu_{H_2,caa}$, $\mu_{H_2Ov,caa}$ et cathode $\mu_{O_2,cac}$

$$\mu_i = \mu_{0i} + R.T. \ln \left(\frac{P_i^*}{P_i} \right)$$

où le potentiel chimique de référence est

$$\mu_0 = 1.85 * 10^4 \text{ mol/J}$$

P_i^* et P_i désignent respectivement la pression partielle et totale.

La différence de potentiel entre les électrodes de la pile fournie au récepteur s'exprime par la relation constitutive de la jonction 1_2 :

$$U = E - \eta_{act} - \eta_{ohm,el} - \eta_{ohm,a} - \eta_{ohm,c} - \eta_{diff} \quad (6.17)$$

Sur le bond graph, RS désigne une résistance active qui d'une part provoque une chute de tension à cause d'une résistance électrique et d'autre part génère de la chaleur par échauffement $\dot{Q}_{ohm,c}$, $\dot{Q}_{ohm,a}$ et $\dot{Q}_{ohm,el}$ respectivement vers la couche active anode (a), vers la couche active cathode (c) et vers l'électrolyte (el).

Les surtensions ohmiques η_{ohm} et la chaleur dégagée \dot{Q}_{ohm} s'expriment par la relation constitutive de RS

$$\eta_{ohm} = \eta_{ohm,el} + \eta_{ohm,a} + \eta_{ohm,c}$$

$$\eta_{ohm,k} = R_k \cdot i \text{ avec } k = \{el, a, c\} \quad (6.18)$$

$$\dot{Q}_{ohm,k} = \eta_{ohm,k} \cdot i \text{ avec } k = \{el, a, c\}$$

Les surtensions d'activation η_{act} et de diffusion η_{diff} se calculent comme suit

$$\eta_{act} = \frac{2.R.T_{caa}}{n_e.F} \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2.i_0} \right)$$

$$\eta_{diff} = \frac{R.T_{caa}}{n_e.F} \cdot \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right)$$

(6.19)

$$\dot{Q}_{act} = \eta_{act} \cdot i$$

$$\dot{Q}_{diff} = \eta_{diff} \cdot i$$

où

- i_0 = densité de courant échangé
- $i_l = \frac{n_e \cdot F \cdot D \cdot C}{\delta}$
- δ = épaisseur de la couche de diffusion
- D = coefficient de diffusion de l'espèce
- C = concentration de l'espèce qui diffuse à l'interface électrode/gaz
- i_0 la densité de courant échangé
- δ l'épaisseur de la couche de diffusion
- D le coefficient de diffusion de l'espèce
- C la concentration de l'espèce qui diffuse
- R_{el}, R_a, R_c sont respectivement les résistances de l'électrolyte, de l'anode et de la cathode
- Modèle hydraulique

$$\begin{aligned} \dot{n}_{H_2, cons} &= -\nu_{H_2} \cdot J \\ \dot{n}_{H_2Ov, prod} &= -\nu_{H_2Ov} \cdot J \\ \dot{n}_{O_2, cons} &= -\nu_{O_2} \cdot J \end{aligned} \tag{6.20}$$

où

$$v = \frac{i}{n_e \cdot F} \tag{6.21}$$

avec i le courant imposé à la pile.

★ *Le travail réalisé dans le cadre d'un DEA financé par le CEA [NIE 02] sera poursuivi dans le cadre d'une thèse CIFRE. Des perspectives de diagnostic des PAC sur la base des modèles obtenus sont aussi envisagées avec le CEA.*

6.3 Modélisation des générateurs de vapeur

6.3.1 Problématique

La modélisation des générateurs de vapeur est une suite logique à mes travaux de recherche, d'autant plus que le LAIL dispose d'un site pilote.

Malgré le nombre impressionnant de publications sur la modélisation des générateurs de vapeurs (une recherche bibliographique détaillée est présentée dans [LAM 00] donnée en annexe), jusqu'à l'heure actuelle, le problème de la modélisation des générateurs de vapeur

présents dans les centrales électriques reste une question de recherche ouverte³¹. La complexité est due principalement aux phénomènes couplés non linéairement et de natures diverses, aux phénomènes de gonflement-tassement, introduisant des dynamiques à déphasage non minimale incontrôlables de la dynamique du niveau et aux différentes configurations de modélisation (monophasique ou phases séparées).

On distingue deux types de modèles développés : à paramètres localisés à l'aide des Equations Différentielles Ordinaires (EDO) à paramètres distribués décrits par des Equations à Dérivées Partielles (EDP).

Deux types de modèles ont été abordés. Un modèle bond graph et un modèle à base des EDP.

6.3.2 Modèle bond graph

Les installations de génération de vapeur sont caractérisées par la mise en oeuvre de plusieurs phénomènes de nature diverses (électrique, hydraulique, thermodynamique et mécanique). La modélisation d'un tel système nécessite alors une approche unifiée de modélisation permettant de représenter tous les phénomènes de stockage et de dissipation d'énergie dans le système. Du point de vue de l'automatique, les variables d'état sont clairement représentées et le modèle d'état (non linéaire) est directement déduit du bond graph.

Même si un grand nombre de travaux en bond graph traitent les accumulateurs de vapeur comme un multiport C, ([KAR 79], [KAR 81], [MUK 00], [GRE 01b]) quelques travaux uniquement ont timidement abordé le sujet de la modélisation plus fine des installations de génération de vapeur, on peut citer [TYL 83], [MOK 97].

Deux types d'application ont été développées. La première concerne une installation pilote du laboratoire LAIL qui représente à échelle réduite le fonctionnement d'une centrale thermique. Les phénomènes complexes tels que le changement de phase, (condensation, évaporation, ...) échange thermique et mélange homogène et diphasique eau-vapeur ont été modélisés par une approche bond graph. Un modèle global de l'installation pilote sous forme d'équation d'état non linéaire a été validée sur le site [OUL 97b], [OUL 96a]. Les phénomènes de gonflement tassement ne sont pas modélisés en raison des faibles dimensions et de la charge de l'installation (60 kw contre 900MW pour un REP).

Forts de cette première expérience, nous avons modélisé un générateur de vapeur industriel d'un réacteur à eau pressurisée (REP) de 900 MW, dans le cadre d'un projet de recherche avec EDF. En plus du modèle global de ce système, les phénomènes de gonflement-tassement du niveau d'eau à basse et à forte charges (bien connus des industriels) dans les générateurs de vapeur ont été modélisés par une approche bond graph non linéaire originale. Notre démarche

31. Ce constat nous a été confirmé (dans le cadre de nos projets avec EDF) par les industriels attachés encore aux commandes classiques PID ne nécessitant aucun modèle dynamique.

peut être résumée de la façon suivante :

Le volume du générateur a été d'abord décomposé en trois sous volumes : le fluide dans le faisceau, la vapeur dans le dôme et l'eau dans le down-comer. Le modèle obtenu en causalité intégrale (donc simulable facilement) avec les trois multiports a conduit à des réponses convenable en régime permanent, mais les phénomènes gonflement-tassement ont mis en évidence en décomposant le volume du faisceau en trois sous volumes (par simple ajout de multiport C sans avoir à reprendre les équations d'où l'intérêt de l'approche bond graph). Les simulations de ce modèle bond graph à basse (10%) et à pleine charge montrent bien la dynamique de ces phénomènes.

★ *La modélisation par bond graph des phénomènes de génération de vapeur (condensation, évaporation, échange de chaleur, ...) a fait l'objet de plusieurs publications ([OUL 97b], [OUL 96a] [OUL 96b] [OUL 97a],[THO 00] (chap.3 et 5). Un modèle bond graph complexe original décrivant à basse et à forte charge la dynamique des phénomènes de gonflement tassement a été obtenu [RIM 96] et appliqué à un générateur de vapeur industriel (REP900) [RIM 97].*

6.3.3 Modèle à base d'Equations à Dérivées Partielles

L'étude d'un système thermofluide dans le cas d'une approche conventionnelle, introduit un modèle constitué d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP) dont l'établissement et la résolution numérique est très complexe. Ce type de modèle est utile pour le dimensionnement, l'analyse du profil de vitesse du fluide, la distribution de la température dans l'espace etc..) des processus thermofluides. Mais, ces modèles ne sont pas toujours exploitables pour la commande ou la surveillance à base de modèle. On s'intéresse dans le cas d'une approche bond graph à un modèle global phénoménologique mettant en évidence la dynamique des phénomènes de stockage, de dissipation et de transport d'énergie en considérant le modèle à paramètres localisés. Il est évident que l'approche système d'équations aux dérivées partielles est quelquefois utilisée pour être intégrée dans les lois constitutives du modèle bond graph. Par exemple, comme le souligne Serge Scavarda [SCA 00], la loi de débit d'un orifice variable en fonction de l'ouverture du clapet peut être intégrée dans la relation caractéristique de l'élément bond graph R représentant le phénomène global de dissipation d'énergie dans l'orifice. Quelques travaux timides développés associent les EDP aux bond graphs dans des application en biotechnologie [OUL 98b] et pour la modélisation d'un condenseur [THO 00] (chap.5). Mais le problème revient en réalité à un modèle à EDO puisque le processus est discrétisé en un ensemble de dynamiques RC.

D'une part, les modèles à paramètres localisés sont utilisés dans le monde industriel pour la simulation et la connaissance de la dynamique des centrales. D'autre part, les modèles à équations aux dérivées partielles, malgré leur complexité, représentent assez bien la connaissance

physique des micro-phénomènes présents dans les centrales. Cependant, ceux qui existaient jusqu'à présent étaient peu adaptés aux systèmes de commande car n'étant pas élaborés sous forme d'entrée/sortie.

Le travail de recherche présenté dans le cadre de la thèse de doctorat de Lamiri ([LAM 01], [LAM 00]) s'intéresse aux divers problèmes résultant de la modélisation d'écoulement diphasique pour lesquels la topologie de l'écoulement est complexe et en général non définie. Quand on connaît le rôle capital que jouent les interfaces séparant les deux constituants dans les échanges entre phases, on comprend que la méconnaissance de la topologie rend très délicate une telle modélisation. Dans ces écoulements, nous pouvons distinguer les écoulements liquide-vapeur, liquide-gaz et liquide-liquide. L'étude de tels écoulements a donné lieu à un grand nombre de travaux, expérimentaux pour la plupart. Toutefois ces travaux ne présentent que peu d'intérêt sur le plan de la modélisation globale du système dynamique entrée-sortie. Ce n'est qu'à partir des années 60 que les premiers modèles théoriques ont été développés. Cependant, ces modèles sont rarement de type entrée-sortie, adaptés à des modélisations de processus de génération de vapeur considérés en régime dynamique. Les modèles utilisés pour la description des générateur de vapeur seront précisés dans [LAM 00].

Les modèles à paramètres distribués consultés ([RIC 62], [STA 64], [NAH 64], [VER 68], [PET 73], [HEU 96]) ne permettent pas une étude des fonctionnements dynamiques (à entrées variables) qui sont pourtant à la base de toutes les questions de commande.

★ *C'est là que se situe la contribution de l'étude, [LAM 01], [LAM 99] puisque nous proposons principalement deux modèles en dimension infinie donnés sous forme d'état. Ces modèles sont également comparés avec des visions localisées correspondant à deux types de configuration : phases eau et vapeur séparées et mélange diphasique homogène. Le travail fournit un modèle dynamique, non-linéaire, et donnant accès à des informations internes importantes, bien que non mesurables, sur le processus réel : hauteur d'eau, répartition spatiale du titre massique de la vapeur et des températures dans la chaudière. Parmi les résultats dérivés de ce travail, il a été montré que la résolution théorique de l'équation de la chaleur dans un milieu quelconque met en jeu des équations à retards (équations de Volterra). Les simulations montrent également les phénomènes de retards distribués liés à la propagation spatiale de la chaleur. Les aspects de la commande constituent également une perspective naturelle de ce travail. Une synthèse de cette contribution peut être consultée dans [LAM 01]. Cette publication est donnée en annexe.*

6.4 Linéarisation des bond graphs à énergies couplées

Le modèle bond graph est aussi un outil d'analyse et afin d'appliquer les propriétés structurelles déduites du bond graph linéaire (commandabilité, observabilité surveillabilité), Les méthodes de linéarisation des bond graph mono énergie sont étendues aux bond graphs non linéaires à énergies couplées.

Pour linéariser des modèles non linéaires à énergies couplées (présents en génie des procédés) (fig.6.4), 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 [RIM 95] 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 composants du bond graph non linéaire (BGNL)

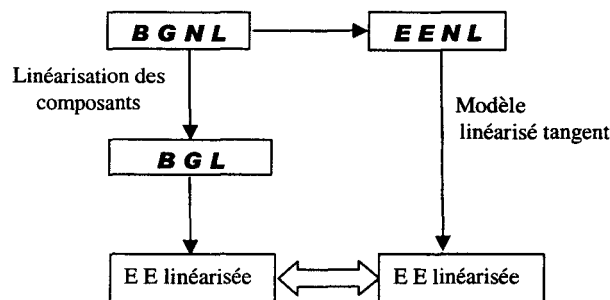


FIG. 6.4 – Chemins possibles pour la construction des équations d'état

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 multipoint C et R) du processus thermofluide en obtenant uniquement les bond graphs linéarisés de chaque composant (classé d'ailleurs selon une approche fonctionnelle développée dans [OUL 02c], [OUL 01a], et [OUL 00a] (cette dernière est jointe en annexe).

Les propriétés structurelles locales que nous mettons ainsi en évidence concernent la paire (A,B) pour la commandabilité et la paire (A,C) pour l'observabilité, ces matrices A,B,C étant les matrices du modèle linéarisé.

Examinons pour fixer les idées quelques exemples.

– Source thermofluide

la source de flux thermique est le flux d'enthalpie calculé par la relation de couplage 6.6 ($\dot{H} = \dot{m}h = \dot{m}c_p T$)

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

$$f_t = F(f_h, e_t) \quad (6.22)$$

On propose de représenter la source thermofluide comme définie par la figure 6.5a.

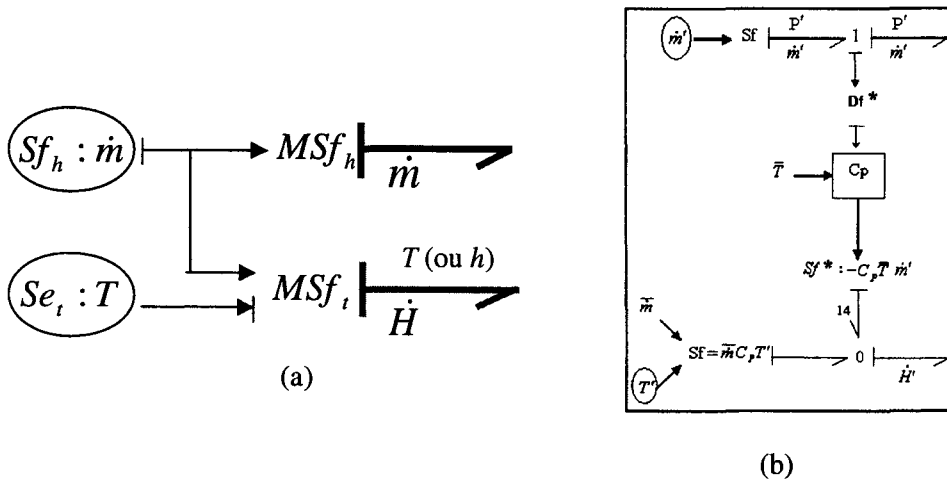


FIG. 6.5 – Bond graph d'une source thermofluide non linéaire (a) et linéarisée (b)

Remarque 6.4.1 Cette représentation est importante du point de vue physique pour l'analyse des systèmes de commande. En effet, le modèle bond graph nous montre bien que les véritables actionneurs sont le flux hydraulique $Sf_h : \dot{m}$ (qui peut être fourni par une pompe), et la source de température $Se : T$ (fourni par une source extérieure). La source de flux thermique (flux d'enthalpie) dépend bien de la température du fluide et de son débit massique. D'autres auteurs [MOK 97], [KAR 81] ainsi que mes travaux antérieurs [OUL 00a] [BUS 00] introduisent une résistance fictive sur le lien thermique modulé par le débit fourni par le lien hydraulique (fig.6.5 b). Cette représentation ne met pas en évidence les véritables actionneurs (sources) utilisés dans le parcours de chemins causaux du graphe lors de l'analyse des propriétés structurelles (observabilité, commandabilité, ...).

La linéarisation de l'équation 6.6 autour du point de fonctionnement $(\bar{m}, \bar{T}, \bar{H})$ donne:

$$\dot{H}' = \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{m}} \right)_{(\bar{m}, \bar{T})} \cdot \dot{m}' + \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_{(\bar{m}, \bar{T})} \cdot T' = C_p \bar{T} \dot{m}' + \bar{m} C_p T' \quad (6.23)$$

Le bond graph correspondant est donné par la figure 6.5b.

On se trouve face à une équation algébrique liant les variables de flux, le terme $\bar{m} C_p T'$ est représenté dans le modèle bond graph linéarisé par une source de flux modulée par T' ,

le terme $C_p \bar{T} \dot{m}'$ par une source de flux modulée par \dot{m}' . Cette dernière est modulée par la variation du débit hydraulique. Le lien d'information sert à fournir l'information sur la valeur de \dot{m}' pour la source modulée. On suppose que le détecteur informant la source modulée est idéal (ne consomme pas de puissance) et par suite le lien liant les deux est représenté par une flèche (représentant un lien d'information). Les représentations Sf^* et Df^* indiquent qu'il s'agit de source et de détecteur fictifs sans signification physique.

– Accumulateur

Les processus d'accumulation d'énergie sont modélisés par un multiport C (fig.6.6b).

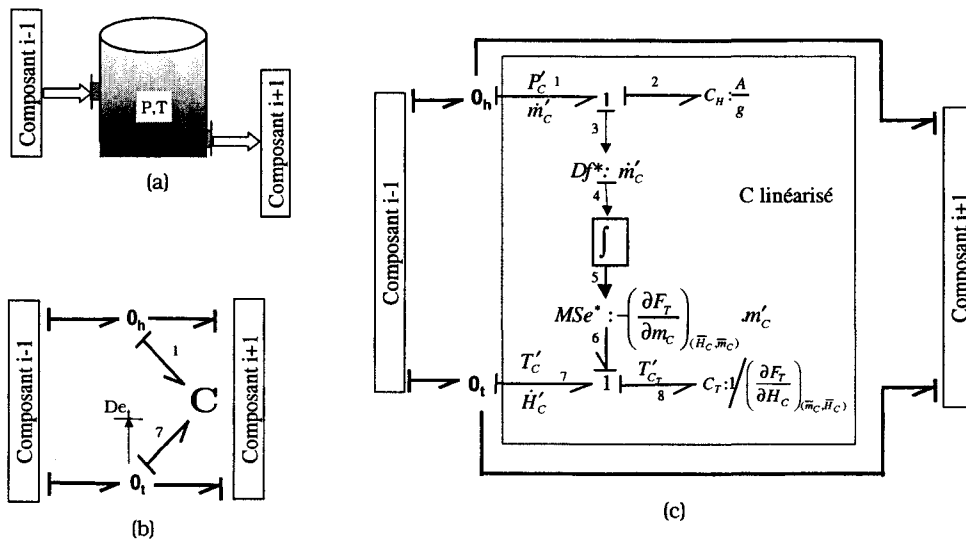


FIG. 6.6 – Linéarisation d'un modèle bond graph C multiport. (a) process associé, (b) bond graph non linéaire (c) bond graph linéarisé

La loi générique qui caractérise le multiport C est composée de deux relations liant les déplacements (ou plutôt les pseudo déplacement, la masse m_c et l'enthalpie totale H_c) aux variables d'effort (pression et température ou enthalpie spécifique) :

$$E = \begin{bmatrix} T_c \\ P_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_T(m_c, H_c) \\ F_H(m_c, H_c) \end{bmatrix} \tag{6.24}$$

F_T et F_H sont fortement non linéaires et dépendent de l'état thermodynamique du fluide (état saturé ou non saturé). Dans le cas sous saturé, la variable effort hydraulique (la pression) est une fonction linéaire de la masse stockée m_c

$$P = \frac{g}{A} \int \dot{m}_c dt = F_H(m_c) \tag{6.25}$$

Par contre, la variable d'effort thermique (la température) est une fonction non linéaire des énergies thermiques et hydraulique:

$$T = \frac{\int \dot{H}_c dt}{\int \dot{m}_c dt} = F_T(m_c, H_c) \quad (6.26)$$

La linéarisation de ces deux fonctions donne les modèles bond graphs linéarisés (fig.6.6c.)

- R-multiport

Les multiports R en thermofluide modélisent les phénomènes de dissipation d'énergie dus à des restrictions hydrauliques par exemple. Pour plus de détails sur ces composants voir [BUS 00]. Sur la figure 6.7 est représenté le modèle bond graph linéarisé de ce multiport mis ici en causalité conductance. Mais,, la causalité peut être quelconque comme développé dans la thèse de Busson [BUS 02] (soutenance prévue 20 décembre 2002) et [OUL 02c].

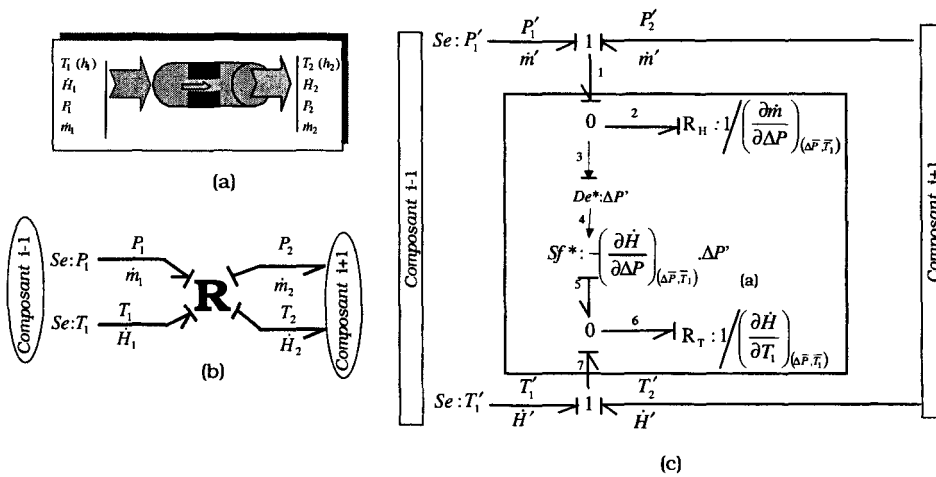


FIG. 6.7 – Bond Graph linéarisé du multiport R (causalité conductance).

- ★ Les résultats de ces travaux ont été utilisés pour l'analyse de la surveillabilité des processus thermofluides et ont fait l'objet de la publication [OUL 00a]. Du point de vue des applications en automatique, cette démarche de linéarisation des modèles bond graphs des composants thermofluides ouvre des perspectives intéressantes. En effet, considérant que les processus industriels sont régulés, ce qui justifie le fonctionnement autour d'un point de fonctionnement nominal, il est aisé de déterminer les propriétés structurelles des processus complexes à l'aide de logiciels spécialisés (Archer ou Symbols [MUK 01]) en introduisant simplement les modèles bond graph linéarisés sous forme modulaire.

Chapitre 7

Surveillance des procédés à l'aide des modèles bond graphs à énergies couplées

7.1 Problématique

Dans le passé, les systèmes automatisés de production (régulation automatique) ont contribué à assister l'opérateur dans ses tâches de conduite automatique du processus pour améliorer la qualité des produits finis, la sécurité et le rendement des unités industrielles. Aujourd'hui un autre challenge est apparu. il s'agit de l'automatisation de la supervision fournissant à l'opérateur humain une assistance dans ses tâches de gestion des situations d'alarmes pour l'augmentation de la fiabilité, de la disponibilité et de la sûreté de fonctionnement du processus.

La supervision est l'ensemble des outils et méthodes qui permettent de conduire des installations industriels tant en fonctionnement normal qu'en présence de défaillances ou de perturbations. Les activités concernées par la supervision sont donc la surveillance et la détection de défaillance de l'installation, le diagnostic et la prise de décision pour l'accommodation ou la reconfiguration.

Le diagnostic a aujourd'hui pleinement conquis sa place surtout pour les processus en génie des procédés en raison de leur caractère à risque (nucléaire, industrie du gaz) et source de pollution (processus chimique, pétrochimique).

Suivant le niveau de connaissance du système à surveiller, les méthodes de surveillance sont principalement basées sur deux approches : les méthodes utilisant des modèles de connaissance et celles utilisant des modèles opératoires. On les classe souvent en méthodes avec ou sans modèle. Dans cette dernière approche, les méthodes utilisées font alors appel à des procédures

d'apprentissage et de reconnaissance de formes ou à l'intelligence artificielle. La communication homme-machine est aussi un volet de la supervision [MIL 88] où on tient compte des problèmes ergonomiques. Mais il est évident que même dans ce cas, la modélisation de l'opérateur humain et la mesure en ligne de sa charge mentale est nécessaire pour évaluer les moments de surcharge qui sont les moments à risque.

Les travaux sur le diagnostic des processus en génie des procédés ne sont pas traités d'une façon spécifique, mais sont utilisés plus comme des applications de méthodologies : détection et l'isolation de fuites de gaz dans un récipient d'injection de charbon dans un fourneau utilisant la méthode GLR (Generalized Likelihood Ratio) [JOH 98], détection et isolation des dégradations des capteurs dans une centrale nucléaire utilisant les redondance matérielle et analytique [DOR 97], [PEN 97].

Notre contribution concerne les méthodes à base de modèle pour la supervision des processus en génie des procédés en utilisant un outil unique : les bond graphs.

7.2 Application de la redondance analytique au diagnostic des processus thermofluides

Les outils de modélisation des procédés développés (cf. thème modélisation) sont systématiquement introduits dans des méthodologies de conception de systèmes de surveillance. Dans ce cadre, *initialement les modèles bond graph couplés obtenus ne sont pas directement utilisés comme support à la surveillance* : une fois le modèle effectué, une transformation de celui-ci vers une forme plus connue pour la surveillance est utilisée pour la génération des Relations de Redondance Analytiques (RRAs).³². Le modèle est alors utilisé en causalité intégrale, ce qui bien sûr pose les problèmes des conditions initiales mais en contre partie évite les difficultés du calcul numérique de la dérivée du résidu lors de sa simulation.

Les méthodes de redondance analytique et de l'analyse structurelle ont fait l'objet d'application à des processus thermofluides représentant un générateur de vapeur et un condenseur d'une installation pilote complexe représentant le fonctionnement d'une centrale à échelle réduite. *Plusieurs scénarios de défaillance sur le processus (fuite d'eau dans la chaudière et bouchage de la conduite de vapeur d'eau,...)* et des fautes capteurs réalisées sur l'installation pour tester le système de surveillance (implémenté ensuite en temps réel sur l'interface de supervision Panorama) ont bien été détectées par les résidus générés sur un système de surveillance à 31 contraintes à 25 inconnues.

★ *Ces travaux de recherche ne représentent pas uniquement une application de l'analyse*

32. Nous rappelons que les RRAs sont obtenues à partir d'un modèle et lient les variables connues (mesurées) du système. Une RRA exprime qu'une fonction des variables connues (résidu de la relation) doit être nulle en fonctionnement normal.

structurelle et de la redondance analytique, mais ont mis en évidence la complexité des procédures de génération des RRAs lorsqu'elles sont appliquées à des modèles non linéaires composés d'un ensemble d'équations différentielles, algébriques et/ ou algébro-différentielles. Ce thème a donné lieu aux publications [OUL 98a], [BUS 98], [AIT 99], [LIT 99], [OUL 00d] (chapitre d'un ouvrage chez hermes collection IC2).

7.3 Pourquoi les Bond Graphs pour la surveillance en génie des procédés?

Ces travaux de recherche ont soulevé les difficultés suivantes :

- *Procédure de génération de RRAs* : La génération sous forme symbolique de RRAs est un problème complexe en raison de la diversité des modèles et de la procédure d'élimination des variables inconnues à partir d'un ensemble d'équations (représentant le modèle dynamique du procédé). Pour les processus thermofluides ces modèles sont principalement sous forme d'un ensemble complexe d'équations algébro-différentielles. La procédure est complexe et le choix des couplages est souvent intuitif. Le graphe devient rapidement complexe avec l'augmentation du nombre de variables.
- *les équations ne mettent pas en évidence explicitement le nombre et le type de variables à inclure dans l'algorithme de surveillance*. Du point de vue général où se situe l'analyse structurelle, le modèle du système est considéré comme un ensemble de contraintes qui s'appliquent à un ensemble de variables, dont seules certaines sont mesurées. Il faut alors un guide pour le choix de ces variables et de ces contraintes.
- *Surveillance des composants des processus thermofluides*. Dans la pratique, l'ingénieur automatique doit se contenter de descriptions graphiques, qui interconnectent un certain nombre de sous-systèmes représentant des équipements élémentaires (réservoir, pompe, vanne, ...) ou complexes (colonne de déshydratation, four de recyclage, ...). Ces sous-systèmes sont décrits par différents types de modèles, qui relient leurs variables d'entrée et de sortie, suivant le type de connaissance disponible au sujet de leur fonctionnement (fonction de transfert, tables ou abaques, règles, équations de bilan, ...). Dans les approches classiques abordées dans la littérature on se contente principalement des descriptions toutes "faites" équations d'état, fonctions de transfert, alors que dans l'industrie le processus est décrit par des schémas (les PID - Plan d'Instrumentation Détaillé) - fournissant l'ensemble des capteurs installés et décrivant les boucles de régulation existantes ou à créer).
- Les défaillances détectées sont principalement les défauts capteurs (alors que dans l'industrie il existe presque toujours des redondances matérielles). Les indicateurs de fautes sensibles aux défauts processus ne sont pas systématiquement déduits.

- Du point de vue de la supervision, les processus industriels sont en réalité vus par l'opérateur en termes de fonctions. Les méthodes de diagnostic développées dans la littérature utilisent soit des modèles de comportement (ou structurelles) pour la redondance analytique [CHO 84], [ISE 84], [BRU 90] ou des modèles fonctionnels [MIL 88], [CHE 98], [CHI 93]. L'intégration des modèles fonctionnels et comportementaux pourrait compléter les insuffisances de chaque méthode.

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

7.4 Positionnement dans la communauté

L'outil bond graph a été initialement utilisé pour la modélisation des systèmes physiques. La démarche habituelle des utilisateurs de cet outil (essentiellement mécaniciens, hydrauliciens, physiciens, ...) consiste à considérer le modèle bond graph comme un modèle de connaissance pour la simulation, dont le seul but est de fournir les réponses du système à des sollicitations connues, soit directement à partir du bond graph si le logiciel (de type Twente Sim, Symbols,...) utilisé le permet, soit à partir des équations mathématiques qui en sont déduites.

Concernant, l'utilisation des bond graphs pour les problèmes de diagnostic, peu d'équipes utilisent cette démarche. Aujourd'hui seules quelques équipes dans le monde travaillent dans cet esprit depuis quelques années ; citons à titre d'exemple Prof. Gawthrop à l'Université de Glasgow, Prof. Linkens à l'Université de Sheffield, Prof. Scavarda à l'INSA de Lyon, Prof Delgado à l'Université Simon Bolivar de Caracas (Vénézuéla). 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 [MAR 91], [LUC 93], étude de l'observabilité pour décider ensuite le nombre, la position des capteurs et des actionneurs défaillants [VER 94]). On peut aussi citer aussi 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, [WAN 96], [GHI 99], et Kohda de l'Université de Kyoto [KOH 93]).

Deux types de modèles bond graph sont utilisés pour le diagnostic : le bond graph *quantitatif et qualitatif*.

1. **Bond graph qualitatif pour la surveillance.** Un mécanisme d'inférence construit avec une stratégie de raisonnement qualitatif est utilisé pour analyser les relations entre la structure du système et son comportement (donné par son modèle bond graph) pour

localiser les pannes du système. Les premiers travaux sur les bond graphs qualitatifs pour le diagnostic sont proposés par Linkens ([LIN 94b], [LIN 95]³³, [WAN 96]). Les bond graphs qualitatifs utilisent des valeurs qualitatives à la place de valeurs numériques définies dans l'ensemble $\left\{ [1] \quad [+]\quad [0] \quad [-]\quad [-1] \quad [?] \right\}$ représentant la déviation dans l'espace des mesures par rapport au fonctionnement normal. Un ensemble d'opérations qualitatives peut être défini en accord avec ces représentations qualitatives en utilisant des opérateurs des nombres réels: $\{+, -, \times, \div, =\}$ [WAN 96], [GHI 99]. Les causes des fautes apparaissant dans le système sont déduites en résolvant un système d'équation qualitatives. Dans [PHI 01] est utilisée une méthode de diagnostic basée sur les graphes causaux temporels déduits du bond graph causal permettant d'isoler les pannes en tenant compte de la dynamique (et de son ordre d'occurrence) de la faute. D'autres auteurs se basent sur une analyse qualitative des équations d'état linéaires [KOH 93] pour déterminer les causes possibles d'une défaillance en vérifiant la cohérence fonctionnelle du système avec le modèle. Les difficultés de telles approches viennent du fait que les modèles qualitatifs peuvent avoir plusieurs comportements possibles (l'augmentation d'un débit d'eau dans un réservoir peut aussi bien augmenter que diminuer la température stockée dans l'accumulateur). Il n'est pas aisé de déterminer les valeurs limites inférieures et supérieures de déviation. D'autre part un problème combinatoire peut apparaître lors des procédures d'inférences pour les systèmes complexes. Les défaillances des capteurs ne sont pas détectées.

2. **L'approche quantitative** est basée sur les lois physiques et nécessite une connaissance profonde de la structure du système et les valeurs numériques des paramètres. Le principe de cette approche est de comparer le comportement normal du processus à celui du modèle numérique. Les modèles (sous forme de fonction de transfert, d'équations d'état, ...) peuvent être obtenus sur la base des lois physiques (lois des premiers principes) [HAV 96] [OUL 00a] ou sur la base d'une identification statistique des paramètres [LEE 96] [FRA 90]. Ces dernières années (depuis 1995), on utilise directement le modèle bond graph quantitatif pour la conception du système de surveillance. Les premiers travaux ont été initiés au laboratoire LAIL UMR CNRS 8021 dans le cadre de la thèse de M. Tagina [TAG 95a]. Cette étude repose essentiellement sur l'analyse de la causalité et des chemins causaux dans un modèle bond graph. Plusieurs méthodes ont été proposées : une première méthode consiste à écrire de manière systématique l'ensemble des relations liant les variables connues et inconnues du modèle regroupées dans un vecteur V sous forme d'une équation matricielle : $MV = 0$. La matrice M regroupe les informations sur la structure du bond graph et les lois caractéristiques des phénomènes retenues pour la modélisation – la forme est générique, et permet de

33. Une implémentation informatique de cette approche existe dans le logiciel Symbols [MUK 01].

déduire, d'une manière elle aussi générique, des RRAs en conduisant la chaîne alternée correspondante. Une deuxième approche consiste à construire des RRAs à partir d'un parcours du bond graph en suivant les chemins causaux. Les travaux ([MOS 00], [HAF 00]) proposent des procédures d'informatisation de ces procédures. La première approche traite du problème des relations implicites qui peuvent apparaître, en les détectant sur le bond graph. La deuxième propose l'utilisation des outils de la recherche opérationnelle et la théorie des matroïdes pour résoudre des problèmes combinatoires liés à la génération de RRAs.

Les travaux existant dans la littérature sur l'analyse structurelle des systèmes sont basés sur un modèle bond graph monoénergie décrivant des processus physiques régis par une seule énergie à la fois. Les défaillances détectées portent sur les sources de contrôle (source d'effort ou de flux) et les capteurs. Toutes les applications concernent des modèles très simples décrits par des modèles en vrai bond graph en boucle ouverte ([TAG 95b], [TAG 95a]).

★ *Mes premiers travaux dans ce domaine représentent une synthèse de la détermination des propriétés structurelles d'un système de surveillance directement à partir du modèle bond graph monoénergie. Ces travaux [OUL 00c] ont permis de situer la suite de mes travaux où la méthodologie est étendue aux bond graph couplés. La publication est jointe au document.*

Dans le cas où les processus à surveiller sont décrits par des pseudo bond graphs à énergies couplées (modélisant les processus thermofluides présents dans de très nombreuses industries, à risques) représentées par des multiports R , RS , C , l'utilisation directe de ces approches n'est plus possible car les modèles BG qui les décrivent sont non linéaires, et "multiports" (les lois caractérisant les phénomènes physiques modélisés ne sont pas scalaires). Une extension des travaux aux systèmes thermodynamiques (BG à énergies couplées) est alors développée.

7.5 Surveillabilité des sources à partir des modèles BG à énergies couplées linéarisés

La première approche proposée dans [BUS 00] et appliquée à un générateur de vapeur consiste à découpler les liens couplés en liens simples puis à appliquer les outils déjà développés pour les bond graphs monoénergie. 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.

La deuxième approche consiste en une linéarisation des multiports (cf. thème modélisation) permettant ensuite une analyse du bond graph par un parcours de chemins causaux. Les non linéarités dans ce type de systèmes concernent plus les multiports R (phénomènes de convection, évaporation, condensation etc..) et les multiports C, stockage d'énergies multiples (thermique et hydraulique) dans des accumulateurs (chaudière, condenseur, réservoir, ...). Les conditions nécessaires de surveillabilité (d'un actionneur ou d'un capteur) du bond graph thermodynamique linéarisé sont alors déduites par un parcours de chemins causaux généralisés.

Le but de cette approche est donc de proposer une méthode pour distinguer les variables surveillables des variables non surveillables à partir d'un modèle bond graph linéarisé (cf. thème modélisation) avant même de générer les relations de redondance analytique.

Certaines propositions pour la surveillabilité des sources ont été données pour des modèles bond graphs monoénergie et avec des monoports [TAG 95b]. Les résultats sont étendus pour les modèles bond graph à énergies couplées linéarisés [OUL 01c], [OUL 00a] en utilisant les chemins causaux généralisés.

Soit un système thermofluide modélisé par un bond graph linéaire (ou linéarisé) composé de p capteurs $D_i (i = 1...p)$ et de n sources $S_i (i = 1...n)$, ($p \geq n$) et décrit par la matrice de transfert

$$Y = M(s).E(s) \quad (7.1)$$

où E sont des entrées représentées par l'ensemble des sources thermofluides de flux et d'effort $E = Sf \cup Se$. Y sont des sorties représentées par l'ensemble des capteurs hydrauliques et thermiques utilisé dans le système d'instrumentation : $Y = Df \cup De$.

$$Y = \begin{bmatrix} D_1 & \dots & D_p \end{bmatrix}^t, E = \begin{bmatrix} S_1 & \dots & S_n \end{bmatrix}^t \quad (7.2)$$

$$M(s) : [m_{ij}] (i = 1...p, j = 1...n).$$

Proposition 1 [TAG 95b] Une condition nécessaire et suffisante pour qu'une défaillance affectant la source S_k soit détectable et isolable est que : pour k dans $(1, \dots, n)$, le vecteur $[m_{1k} \dots m_{pk}]^t$ n'est proportionnel à aucun vecteur colonne $[m_{1i} \dots m_{pi}]^t$ de la matrice de transfert $M(s) (i \neq k)$.

Sur le bond graph, le terme m_{ij} correspondant à la transmittance liant le capteur y_i à l'actionneur (la source) "j" (e_j) est déterminé directement du bond graph [BRO 72] :

$$\frac{y_i(s)}{e_j(s)} = \frac{\sum_n T_n^{ij}(s).D_n^{ij}(s)}{D(s)} \quad (7.3)$$

où $T_n^{ij}(s)$ est le gain du n -*ime* chemin causal reliant la source S_j au capteur D_i , $D(s)$ et $D_n^{ij}(s)$ sont respectivement le déterminant du bond graph et le déterminant du bond graph réduit. Une proportionnalité entre deux colonnes de $M(s)$ est traduite par l'égalité suivante :

$$\sum_k T_n^{ik}(s) \cdot D_n^{ik}(s) = \sum_k T_n^{ij}(s) \cdot D_n^{ij}(s) \quad (7.4)$$

Cette dernière relation se traduit sur le bond graph par la proposition suivante :

Proposition 2 *Il y a proportionnalité entre les colonnes $[m_{1k} \dots m_{pk}]^t$ et $[m_{1j} \dots m_{pj}]^t$ dans $M(s)$ si le chemin en suivant les liens de puissance ou les liens d'information dans un modèle bond graph à énergies couplées linéarisé pour atteindre le capteur i , partant de la source j , est inclus dans le chemin suivi pour atteindre le même capteur en partant de la source k , $\forall i = 1 \dots p, i \neq k$*

★ *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 signature de fautes et enfin d'analyser la surveillabilité des actionneurs. L'application des 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. Les résultats de ces travaux (appliqués à un générateur de vapeur, à une colonne de distillation, ...) ont fait l'objet des publications [OUL 01d], [OUL 01c], et [OUL 00a]. Cette dernière publication est jointe au document.*

7.6 Génération des RRAs formelles des composants thermo-fluides

7.6.1 Positionnement

Les modèles des processus en génie des procédés sont fortement non linéaires. Leur surveillance passe d'abord par la conception des algorithmes de détection et de localisation des défaillances utilisant la redondance analytique.

Les procédures de détection et d'isolation de fautes que nous avons développées dans [BUS 02] sont basées uniquement sur les résidus générés par les RRAs. En comparaison avec les méthodes de génération de résidus basées sur les observateurs ([KAB 99], [MAG 94]) la méthode basée sur les relations de redondance analytique présente quelques caractéristiques intéressantes:

- elles sont simples à comprendre, puisqu'elles correspondent à des relations et des variables qui sont affichés 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.

Depuis les premiers travaux sur la génération des RRAs initiés par Potter et Sunam [POT 77], le problème de génération des RRAs a fait l'objet de nombreux travaux principalement dans le cas linéaire (pour une synthèse de ces travaux cf. [ISE 84]).

Dans le cas non linéaire, seule la théorie d'élimination (basée sur la théorie d'élimination des systèmes algébriques) ([SEI 56], [DIO 91], [COX 92]), valable pour les modèles polynômiaux, propose une méthodologie de génération des RRAs sous forme symbolique. Des applications à la surveillance d'un moteur à induction et à un échangeur de chaleur (décrit par un modèle statique) sont données dans [GUE 97] et [STA 01].

7.6.2 Cahier des charges

Une extension des travaux (initiés dans [TAG 95a] pour les bond graph monoénergie) aux processus en génie des procédés décrits par des bond graphs à énergies couplées [OUL 00a] permet de générer d'une manière systématique, directement à partir du modèle bond graph les RRAs. De plus dans le cadre des travaux développés dans la thèse de F. Busson [BUS 02] nous posons comme cahier de charges, la détection et la localisation des défaillances des processus thermofluides au niveau :

- des capteurs,
- des actionneurs
- des composants physiques. Les défaillances physiques peuvent être de type fuite de matière (fuite du fluide dans un réservoir), ou défaut de calorifugeage thermique au niveau des composants de stockage d'énergie (chaudière, réservoir, ...) ou de type bouchage des conduites
- des contrôleurs et des algorithmes de commande

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 classe de précision des capteurs. On considère aussi que toutes les entrées sont connues. D'autre part les procédures de décision ne sont pas analysées.

7.6.3 Représentation bond graph d'un système de surveillance

Variation et contraintes dans un système de surveillance Rappel. Le modèle structurel est un graphe bi-parti dont la matrice d'incidence représente les liens entre les variables et les paramètres du système d'une part et les contraintes introduites par les composants

d'autre part. Soit Φ l'ensemble des équations du modèle, ici appelées contraintes (chaque équation contraint en effet l'évolution des variables) et $Z = K \cup X$ l'ensemble des variables et paramètres qui décrivent son évolution.

Déduisons d'une façon systématique les variables et les contraintes à introduire dans l'algorithme de génération des RRAs d'un processus réel thermofluide.

Nous proposons de représenter un système de surveillance comme illustré par la figure 7.1. On distingue essentiellement deux parties: la première partie produit de la puissance et de l'énergie (le processus et l'ensemble des actionneurs), alors que la seconde produit des signaux (le système d'information, c.à.d. les capteurs et le système de commande).

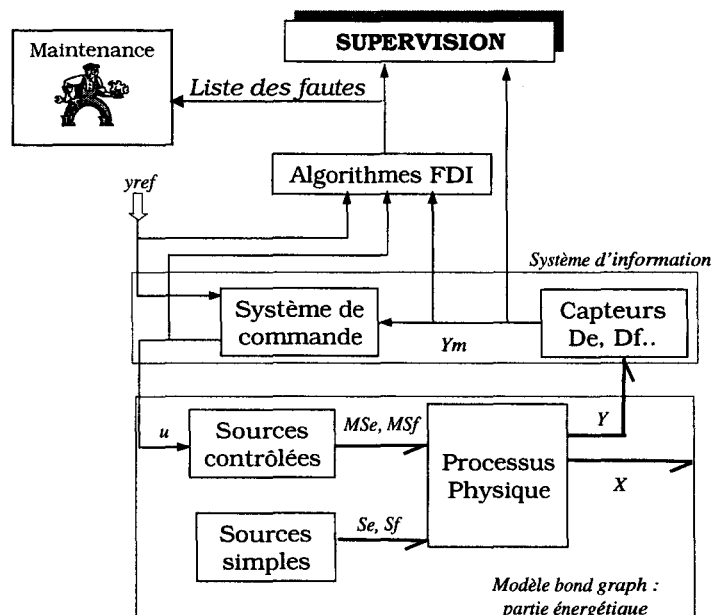


FIG. 7.1 – Représentation bond graph d'un système de surveillance

Les algorithmes de surveillance (de détection et d'isolation de fautes FDI) reçoivent les informations issues des capteurs (détecteurs d'effort De et de flux Df) et délivrent au système de supervision les alarmes. La liste des fautes est envoyée au service de maintenance pour réparation ou entretien. La génération des indicateurs de fautes est basée sur les relations de redondance analytique. Dans la section suivante est montré comment sont déduites les variables et les contraintes directement du bond graph.

1. Les contraintes

Les contraintes Φ peuvent être vues comme des relations qui relient les variables et paramètres du système. L'ensemble de ces contraintes est constitué dans un processus industriels de contraintes qui décrivent la structure (Φ_s), le comportement (Φ_b), les mesures (Φ_m), le

système de commande et/ou l'algorithme de commande (Φ_c), et les actionneurs contrôlés (Φ_a).

$$\Phi = \left\{ \Phi_s \quad \Phi_b \quad \Phi_m \quad \Phi_c \quad \Phi_a \right\} \quad (7.5)$$

Du point de vue de la méthodologie bond graph, les relations de contraintes sont décrites comme suit :

- **Les équations structurelles** Φ_s . Les équations structurelles sont indépendantes des notions métriques, et représentent un ensemble des lois de conservation (de masse, énergie), les équations d'équilibre. Elles sont déduites des équations aux jonctions. Le nombre d'équations Φ_j est égal à la somme des nombres des jonctions 0, de jonctions 1, les éléments 2-ports, Transformateur TF et GYrateur GY .

$$\Phi_s = \{ \Phi_{j0} \} \cup \{ \Phi_{j1} \} \cup \{ \Phi_{TF} \} \cup \{ \Phi_{GY} \} \quad (7.6)$$

$$\Phi_s \in \mathfrak{R}^{n_j}, \text{ où } n_j \text{ est le nombre de jonctions}$$

- **Les équations de comportement** Φ_b . Les lois physiques exprimant comment la transformation d'énergie est réalisée représentent le modèle de comportement. Dans le modèle bond graph, elles décrivent le phénomène physique au niveau des éléments bond graph (\mathbf{R} , \mathbf{C} , et \mathbf{I}), elles sont appelées "les lois constitutives".

$$\Phi_b = \{ \Phi_C \} \cup \{ \Phi_I \} \cup \{ \Phi_R \}$$

$$\Phi_b \in \mathfrak{R}^{l+n_e} \text{ où } n_e \text{ est le nombre d'éléments bond graph, } \mathbf{R}, \mathbf{C} \text{ et } \mathbf{I}. \quad (7.7)$$

l est le nombre de ports du bond ou le nombre d'énergies modélisées.

Les éléments résistifs \mathbf{R} contiennent aussi les résistances actives générant de l'entropie (RS) [THO 00].

Dans le cas d'un modèle bond graph à énergie simple ($l = 1$), le nombre de variables de puissance est égal à 2. Dans le cas d'un processus thermofluide, nous sommes en présence de deux énergies (hydraulique et thermique). ($l = 2$), nous avons alors pour chaque composant bond graph 4 variables de puissance qui sont les couples (P, \dot{m}) et (T, \dot{H}) . Si les phénomènes chimiques (transformation de matière) sont aussi pris en compte, alors ($l = 3$) (en ajoutant le couple (μ, \dot{n}) . (potentiel chimique (ou affinité chimique)-flux molaire). On écrit alors les relations de comportement pour chaque énergie.

- **Les équations de mesure** Φ_m . Elles décrivent les mesures qui sont disponibles. Elles expriment la façon dont les capteurs transforment quelques variables d'état (ou autre)

du processus en signaux de sortie qui peuvent être utilisés pour les algorithmes de détection et d'isolation des défaillances et de commande. Dans la littérature [TAG 95b], [FEE 01], les capteurs sont représentés par uniquement des détecteurs de flux (Df) et d'effort (De):

Dans un système thermofluide le système d'instrumentation est plus large. Les principales mesures susceptibles d'être utilisées sont celles du débit massique, du débit d'enthalpie, de la température, du niveau, de la pression et même parfois de la puissance. Les capteurs de pression et de température sont représentés par les détecteurs d'effort hydraulique et thermique que nous désignerons par De_h , et De_t .

En qualité de détecteur on utilise aussi les capteurs de niveau que nous désignons par Dl .

$$De = \begin{bmatrix} De_h & De_t & Dl \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

L'information fournie le capteur de niveau peut être directement proportionnelle à celle fournie par le capteur de pression, par exemple dans le cas d'un réservoir de stockage (régime sous-saturé) d'un fluide de densité ρ , on a :

$$De_h = \rho g (Dl - z_p) \quad (7.9)$$

où z_p est la position où est placé le capteur de pression ($z_p \in [0, Z \text{ max}]$). Il existe alors juste une redondance matérielle. Par contre dans le cas d'un mélange saturé (eau-vapeur en équilibre thermodynamique), les informations fournies par ces deux capteurs sont indépendantes.

Les capteurs de flux seront désignés par :

$$Df = \begin{bmatrix} Df_h & Df_t^* \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

Df_h , et Df_t^* sont les capteurs de débit massique \dot{m} (kg/s) et thermique \dot{H} (J/s) respectivement. Le flux d'enthalpie véhiculé par un fluide n'est pas en pratique directement mesuré par un capteur, il peut toutefois être évalué indirectement connaissant la température De_t mesurée du fluide, le débit massique, et la capacité thermique à pression constante c_p . Df_t^* est alors considéré comme un capteur logiciel :

$$Df_t^* = Df_h \cdot c_p \cdot De_t \quad (7.11)$$

Finalement,

$$\Phi_m = \{\Phi_{De}\} \cup \{\Phi_{Df}\} \cup \{\Phi_{Dpu}\} \quad (7.12)$$

$\Phi_m \in \mathfrak{R}^{n_s}$ où n_s est le nombre de capteurs.

Les capteurs de puissance D_{pu} peuvent aussi être utilisés dans le système d'instrumentation

- **Le modèle des algorithmes de commande Φ_c .** Il décrit les algorithmes de commande. Les variables d'entrée sont les grandeurs de consignes y_{ref} et les variables issues des capteurs y_m (Df, De). La sortie agit sur l'actionneur et est notée source d'effort modulée (MSe) ou de flux (MSf).

$$\Phi_c(u, y_{ref}, De, Df, \theta_{reg}) = 0 \quad (7.13)$$

$$\Phi_c \in \mathbb{R}^{n_c} \quad \text{où } n_c \text{ est le nombre de contrôleurs}$$

où θ_{reg} sont les paramètres du contrôleur (gain, temps d'intégration,...) et y_{ref} les valeurs de consigne.

- **Le modèle de sources contrôlées Φ_a .** Ces modèles décrivent les sources d'énergie contrôlées (pompe régulée, source de tension commandée,...). Les signaux d'entrée u sont fournis par les contrôleurs et les sorties sont les variables réglantes MSe et MSf (exemple, débit massique fourni par une pompe de débit pour contrôler le niveau dans un réservoir).

$$\Phi_a(MSf, MSe, u) = 0 \quad (7.14)$$

$$\Phi_a \in \mathbb{R}^{n_a} \quad \text{où } n_a \text{ est le nombre de sources contrôlées}$$

Contrairement aux équations de comportement et de structure qui utilisent des variables de puissance en entrée-sortie, les équations de mesures et des algorithmes de commande utilisent des signaux d'information. Les sources thermofluides sont $Sf = \begin{bmatrix} Sf_h & Sf_t \end{bmatrix}$. Toutefois, pour les mêmes raisons citées, le flux d'enthalpie sera évalué par la relation de couplage $Sf_t^* = Sf_h \cdot c_p \cdot De_t$. On aura alors:

$$SF = \begin{bmatrix} Sf_h & Sf_t^* \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Finalement le nombre de contraintes à utiliser dans un système de surveillance déduit du modèle global bond graph de l'installation est égal à $(n_j + n_e + n_s + n_c + n_a)$:

2. Les variables

L'ensemble des contraintes décrites Φ s'applique à l'ensemble des variables Z , connues (K) et inconnues (X).

$$Z = X \cup K \quad (7.16)$$

- - Les variables inconnues X sont les variables de puissance (flux et effort) supportées par le lien de puissance du bond graph. Le vecteur X contenant toutes les variables de puissance est :

$$X(t) = \{e_1(t), f_1(t)\} \cup \{e_2(t), f_2(t)\} \dots \cup \{e_{n_e}(t), f_{n_e}(t)\} \quad (7.17)$$

$$X \in \mathfrak{R}^{2l \cdot n_e} \text{ où } n_e \text{ est le nombre de composants (I,R,C)}$$

On rappelle comme indiqué plus haut que les composants peuvent être multiports. Dans ce cas, $l = 1, 2$ ou 3 selon qu'on modélise, une deux ou trois énergies (explicitement visibles sur le modèle bond graph en fonction du type de variables utilisées).

- - Le sous-ensemble K des variables connues contient les variables de commande u , les variables dont les valeurs sont mesurées par les capteurs De et Df , les sources contrôlées (MSe , MSf), et les sources (Se , Sf) :

$$K = \{MSe\} \cup \{MSf\} \cup \{Se\} \cup \{Sf\} \cup \{De\} \cup \{Df\} \cup \{u\} \quad (7.18)$$

$$K \in \mathfrak{R}^{n_k}$$

où $n_k = n_s + n_a + n_c$

Finalement,

$$Z \in \mathfrak{R}^{2l \cdot n_e + n_k} \quad (7.19)$$

3. Les paramètres

$\theta \in \mathfrak{R}^p$ est le vecteur des paramètres. Dans le modèle bond graph les paramètres sont associés aux caractéristiques des éléments R , C et I , TF, GY ... c.à.d. les coefficient de débit, les valeurs de capacité (qui peuvent être variables), des coefficients d'échange de chaleur, ... Ces paramètres peuvent être constants ou variables (la capacité thermique d'un fluide peut être fonction de l'état température par exemple).

7.6.4 Algorithme de génération des RRAs

En forme bond graph l'expression de l'équation de la RRA peut s'écrire sous forme :

$$f(De, Df, Se, Sf, MSe, MSf, \theta, u) = 0 \quad (7.20)$$

Le résidu est alors :

$$r = f(De, DF, Se, Sf, MSe, MSf, \theta, u) \quad (7.21)$$

L'application s définit un graphe bi-parti $G = [\Phi, Z, V]$. Φ correspond à l'ensemble des relations du procédé, Z à l'ensemble des variables et V l'ensemble des arcs (fig. 7.2).

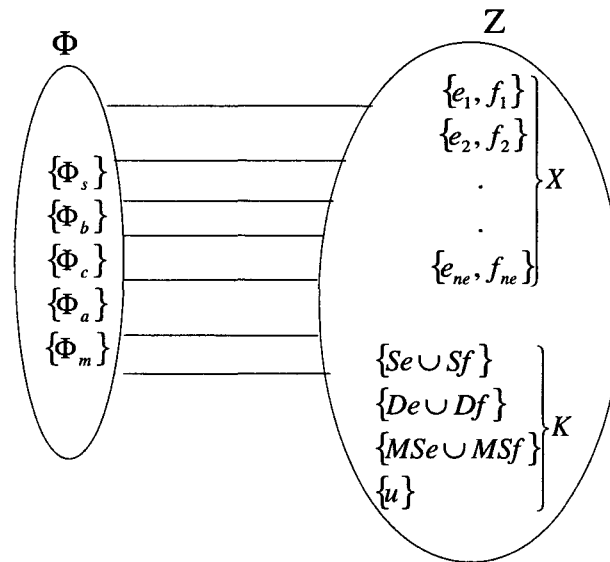


FIG. 7.2 – Graphe biparti de la structure du modèle bond graph



La calculabilité des variables dans une procédure de génération des RRAs est liée à la causalité et l'inversibilité ou non de la relation utilisée. Dans un processus thermofluide, les causalités affectées aux bond graphs à énergies couplées sont complexes car les variables étant couplées, les causalités sont souvent imposées par le type de processus. L'affectation des causalités est systématique et suit les règles énoncées dans [KAR 90b], à la différence que dans notre cas, est considéré comme un élément bond graph tout composant thermofluide (représenté par un bond graph global). La classification de systèmes thermofluides est basée sur une modélisation fonctionnelle et bond graph développée dans [OUL 02e] (jointe au document).

Définition 1 On rappelle que *l'architecture du système* est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau de composants industriels. Chaque composant thermofluide est donné par son modèle bond graph.

Avant de procéder à la détermination des RRAs, on réalise le modèle architectural sur la base des classes prédéfinies. Nous allons déterminer trois ensembles de RRAs.

- Le premier ensemble concerne la partie énergétique du procédé (le système en boucle ouverte), comprenant le processus physique, les capteurs et l'ensemble des sources (actionneurs).

- Le deuxième ensemble de RRAs concerne le système d'information: les contrôleurs (ou algorithmes de commande) faisant intervenir les signaux délivrés par les capteurs (De et Df), les signaux de commande u et les consignes (comme paramètres).
- Enfin des RRAs complémentaires peuvent être déduites des sources contrôlées (actionneurs) en faisant intervenir les signaux de commande u et les variables de sortie MSf et MSe .

7.6.4.1 RRAs du système énergétique

Le bond graph est un graphe dans lequel sont définis des boucles et des chemins causaux, parcourus en suivant la propagation de l'information effort ou flux, et quel que soit le sens des demis flèches. Le modèle bond graph par rapport à d'autres formes de représentation explicite aussi bien la structure que le comportement du système. Au niveau de la structure de jonction ($0, 1, TF$ et GY), plusieurs relations entre les différents flux et efforts parcourant le système peuvent être établies.

La génération des RRAs sur le bond graph est basée sur le parcours de chemins causaux sur le modèle graphique. Ceci est exprimé sur un graphe bi-parti orienté par l'ordre d'élimination des variables inconnues. Pour exprimer une variable inconnue en fonction des variables connues, l'étude des relations reliant ces variables aux sources et aux capteurs en parcourant les chemins causaux simples et généralisés est une méthode pratique et facile à appliquer. Le parcours des chemins causaux n'est qu'un couplage particulier qui respecte la causalité affectée au modèle.

Le point de départ de l'algorithme pour la génération de RRAs peut appartenir à la structure de jonctions ($0, 1, TF$, et GY), i.e. les équations structurelles Φ_s aussi bien qu'à l'ensemble des composants R, C, I (les équations de comportement Φ_b) reliées à cette jonction.

Proposition 3 *Partir de l'équation régissant le comportement d'un composant (R, C et I) pour générer une relation de redondance analytique, revient à choisir la jonction à laquelle se rattache cet élément.*

- **Preuve.** Considérons un modèle bond graph à énergies couplées (fig. 7.3). n et m sont respectivement le nombre de ports des énergies hydrauliques, modélisés par la paire des variables (P, \dot{m}) et thermiques modélisés par la paire des variables (T, \dot{H}) . Sans perte de généralité, on considère que le multiport C est composé de deux éléments couplés : un élément hydraulique C_h connecté à la jonction hydraulique 0_h et un élément thermique C_t connecté à la jonction thermique 0_t . La causalité affectée ici en intégrale au bond graph ne change rien à la démonstration.
- 1. En partant de la jonction 0_h (loi de conservation de masse) on a :

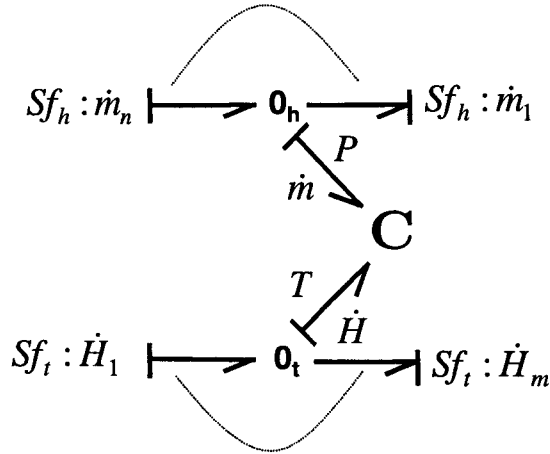


FIG. 7.3 – Modèle bond graph multi-énergie quelconque

$$\Phi_s : \dot{m} + \sum_{i=1}^{nh} a_i \dot{m}_i = 0 \quad (7.22)$$

a_i est une variable booléenne valant ± 1 selon l'orientation de la demi-flèche.

Pour exprimer les variables inconnues en fonction des variables connues à surveiller on passe par la relation régissant le comportement du composant C . Dans notre cas, la pression dépend aussi bien de l'énergie hydraulique \dot{m} que thermique \dot{H} . on a :

$$\Phi_b : P = \Phi_h(\dot{m}, \dot{H}) \quad (7.23)$$

En remplaçant l'expression de \dot{m} dans la relation 7.22, on obtient :

$$\Phi_h^{-1}(P, \dot{H}) + \sum_{i=1}^{nh} a_i \dot{m}_i = 0 \quad (7.24)$$

- 2. En partant du multiport C . La pression est déterminée de l'équation constitutive de la capacité C couplée à l'énergie thermique \dot{H} . On a :

$$P = \Phi_h \left(- \sum_{i=1}^{nh} (a_i \dot{m}_i), \dot{H} \right) \quad (7.25)$$

d'où la relation :

$$\Phi_h^{-1}(P, \dot{H}) + \sum_{i=1}^{nh} a_i \dot{m}_i = 0 \quad (7.26)$$

Cette dernière relation est équivalente à celle déduite en partant de l'équation de structure (equ. 7.24).c.q.f.d.

Le même résultat pourrait être déduit pour la partie thermique et pour un autre type de jonction.

Les relations en partant de la jonction "0" (correspondant aux contraintes de structure Φ_s) et celles en partant de la relation constitutive régissant le comportement (correspondant aux contraintes de comportement Φ_b) d'un élément (eq.7.24) sont donc bien équivalentes (equ.7.25).

A partir de cette proposition, on peut se limiter à la génération de RRAs à partir des équations structurelles.

Dans le cas de la surveillance d'une installation, le point de départ de la génération des RRAs est le Plan des Instruments Détaillé du processus thermofluide. Il représente le modèle architectural du processus qu'on note Σ constitué de n composants thermofluides.

Soit $COMP_i \in \Sigma, i = 1 \dots n$, le système des composants qui peut être présenté sous la forme $s(\Phi_i, X_i \cup K_i, \theta_i)$, où Φ_i, X_i, K_i , et θ_i sont respectivement l'ensemble des contraintes, des variables inconnues, des variables connues et des paramètres déduits du modèle bond graph de $COMP_i$.

La procédure de génération des RRAs peut être énoncée. Un exemple pédagogique représentant un système hydraulique est donné afin d'illustrer la méthodologie 7.4. De et Df sont les capteurs de pression et de débit. R et C désignent respectivement la résistance hydraulique introduite par la vanne et la capacité hydraulique du réservoir. La pompe délivre un flux de masse Sf. Se est une source de pression (qui peut être atmosphérique).

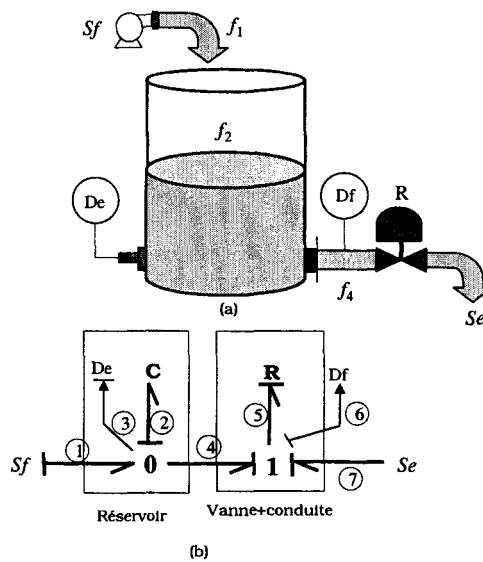


FIG. 7.4 – Exemple pédagogique pour la génération des RRAs

1. Sur la base du modèle architectural, est élaboré pour chaque composant i son modèle

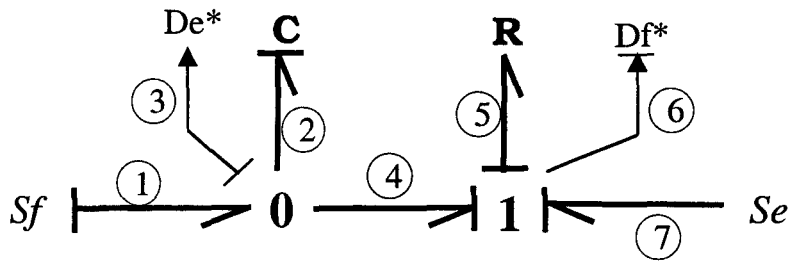


FIG. 7.5 – Modèle bond graph en causalité dérivée par dualisation des détecteurs

bond graph acausal et son système d'instrumentation.

2. Le modèle bond graph est initialement déduit en causalité préférentielle intégrale (fig. 7.4b)
3. Afin de générer les RRAs en causalité dérivée, le modèle est mis en causalité dérivée en utilisant la notion de dualisation des détecteurs (en transformant les détecteur d'effort en détecteur de flux). Cette étape permet de vérifier aussi l'observabilité structurelle des états³⁴. Si un des états ne peut pas être mis en causalité dérivée, l'état n'est pas observable. Le détecteur d'effort dualisé De^* et le détecteur de flux dualisé Df^* imposent (à l'équivalent d'une source) leurs valeurs aux jonctions respectives 0 et 1. Si nous avons plusieurs capteurs connectés à une même jonction, alors seul un des capteurs peut être dualisé (afin de respecter la règle d'affectation de la causalité à cette jonction) : nous avons alors une redondance matérielle. Le modèle ainsi obtenu (fig. 7.5) peut être utilisé pour la génération des RRAs. Nous avons deux jonctions, donc deux relations de structure, deux éléments bond graph (deux relations de comportement), deux capteurs (deux équations de mesure) $\Phi \in \mathfrak{R}^6$. Nous avons 4 variables inconnues (e_2, f_2) et (e_5, f_5) et 4 variables connus (De, Df, Se, Sf), et enfin le vecteur des paramètres lié aux valeurs de C et R . Ayant six relations de contraintes et quatre variables inconnues, nous allons donc obtenir deux RRAs indépendantes.
4. Dédire du bond graph en causalité dérivée, les relations de contraintes. Dans le cas thermofluide, on écrit les relations de structure Φ_{sk} ($k = 1, n_{ji}$) de chaque jonction. n_{ji} est le nombre de jonctions du modèle bond graph du composant i . On écrit les relations

34. On rappelle le théorème général proposée dans [DAU 92] sur l'observabilité structurelle. Un système modélisé par bond graph est structurellement observable ssi :

il existe un chemin causal liant un capteur à chaque élément I et C en causalité intégrale quand on met le bond graph en causalité intégrale

Tous les éléments I et C admettent une causalité dérivée quand on met le bond graph en dérivée, et qu'on dualise éventuellement les capteurs

pour le domaine hydraulique Φ_{sk_h} et thermique Φ_{sk_t} : $\Phi_{sk} = \Phi_{sk_h} \cup \Phi_{sk_t}$. k_h et k_t sont respectivement le nombre de jonctions hydrauliques et thermiques.

$$\begin{aligned}
\Phi_{j0} : 0 &= Sf - f_2 + f_5 \\
\Phi_{j1} : 0 &= e_2 - e_5 + Se \\
\Phi_{m1} : e_3 &= e_2 = De, \\
\Phi_{m2} : f_6 &= f_5 = Df \\
\Phi_{b1} : e_5 &= \Phi_R(f_5) \\
\Phi_{b2} : f_2 &= Cse_2
\end{aligned} \tag{7.27}$$

5. Considérer un type de jonction comme point de départ connecté à un capteur (De , Df , ou Dl)., Considérons à titre d'exemple la relation Φ_{j0} . Exprimons les variables inconnues en fonction des variables connues en suivant les chemins causaux simples et généralisés (dans le cas de plusieurs énergies). Dans le cas général les variables connues utilisées sont un sous ensemble de l'ensemble K_i du composant i , que nous notons K_{oi}

$$K_{oi} = \{MSe_i\} \cup \{MSf_i\} \cup \{Se_i\} \cup \{Sf_i\} \cup \{De_i\} \cup \{Df_i\} \tag{7.28}$$

Dans la relation Φ_{j0} , f_2 et f_5 sont des variables inconnues. f_2 est déduit du chemin causal 2-C-2-3: $f_2 = CsDe$, et f_5 du chemin 5-6: $f_5 = Df$. On déduit alors la première RRA en substituant les variables connues dans Φ_{j0} : $RRA1 : Sf - CsDe + Df = 0$

6. Passer à la jonction suivante. De la relation Φ_{j1} , e_2 et e_5 sont des variables inconnues. e_2 est déduit du chemin causal 2-3: $e_2 = De$, et e_5 du chemin 5-R-6: $e_5 = e_5 = \Phi_R(Df)$. On déduit la deuxième RRA: $RRA2 : De - \Phi_R(Df) + Se = 0$
7. Si la deuxième relation de redondance analytique est indépendante de la première, alors la garder, sinon passer à une autre jonction. Les deux RRAs ont des signatures différentes.
8. Répéter (5) jusqu'à ce que des signatures distinctes puissent être obtenues.

RRAs sensibles aux défaillances physiques On distinguera deux types de défaillances physiques:

- *Défaillances physiques de type fuite* : on distingue des fuites matières (fuite d'un fluide d'un réservoir, fuite de pression dans un gazoduc) et des fuites d'énergie thermique (défaut de calorifugeage). Ce type de défaut apparaît dans les processus de stockage

d'énergie et dans les canalisations, dans les joints d'étanchéités, brides de raccordements etc...

- *Défaillances physiques de type bouchage* : ces défaillances apparaissent dans les canalisations suite à un encrassement ou à un dépôt de sédiments par exemple.

Les défaillances physiques de type fuite de matière, fuite d'énergie thermique et bouchage seront notées respectivement par $Faute_C_h$, $Faute_C_t$ et $Faute_R$. Elles sont liées du point de vue bond graph aux éléments C hydraulique, C thermique et R.

1. RRAs sensibles aux défaillances de type fuite

Proposition 4 *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).*

- **Preuve**: Les équations constitutives d'une jonction "0" vectorielle expriment que les liens reliés à cette jonction sont soumis au même effort et que la somme algébrique des flux circulant dans ces liens est nulle, ce qui correspond à une conservation d'énergie thermique (noté "0_t") et hydraulique (noté "0_h") dans les accumulateurs d'énergie. Elles s'écrivent :

$$\sum_{i=1}^n a_i f_{hi} = \sum_{i=1}^n a_i \dot{m}_i = 0 \quad (7.29)$$

$$\sum_{i=1}^{n+m} a_i f_{ti} = \sum_{i=1}^n a_i \dot{H}_i + \sum_{i=n+1}^m a_i \dot{Q}_i = 0 \quad (7.30)$$

n et m désignent respectivement le nombre de ports hydrauliques (transférant de l'énergie hydraulique et thermique par convection \dot{H}) et thermique (transférant de l'énergie thermique par conduction \dot{Q}).

Partant des relations 7.29 et 7.30 et en exprimant les variables qui y figurent en fonction des variables à surveiller on aboutit à des RRAs.

Soit r_{0h} le résidu généré à partir de l'équation 7.29 (par la procédure décrite plus haut). Il sera sensible à toute fuite de matière dans l'accumulateur puisque la loi de conservation d'énergie du modèle sans faute ne sera pas respectée.

Soit r_{0t} le résidu généré à partir de l'équation 7.30. il sera sensible à toute fuite de matière $Faute_C_h$ (car le flux d'enthalpie \dot{H} dépend du flux de masse \dot{m}) et d'énergie thermique $Faute_C_t$. Il sera par contre sensible uniquement à une fuite thermique si le défaut est de type calorifugeage.

r_0	$Faute_{C_h}$	$Faute_{C_t}$
r_{0h}	1	0
r_{0t}	1	1

TAB. 7.1 – Signature de fautes physiques pour un accumulateur

La table de signature théorique de défaillances physiques pour un accumulateur peut être présentée par le tableau 7.1.

2. RRAs sensibles aux défaillances de type bouchage

Proposition 5 *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).*

- **Preuve:** Dans les processus de convection, le flux d'enthalpie est véhiculé par le transport du fluide, on considère qu'il n'y a pas de phénomène de conduction. C'est pourquoi le phénomène de convection dans une résistance est modélisé par deux liens de puissance séparés : le lien de puissance hydraulique modélisé par une jonction "1" et la résistance R et un lien thermique modélisé par la résistance de couplage modulée par l'information du débit représenté par un lien d'information fourni par le lien hydraulique [OUL 00f]. La force motrice provoquant le déplacement du fluide est due à la différence des efforts : des pressions dans le cas hydraulique, des potentiels chimiques (ou des concentrations) dans le cas chimique (ou de diffusion), et des températures dans le cas de la conduction thermique. En bond graph ces phénomènes sont modélisés par un élément résistif R accroché à une jonction "1". (loi de Bernoulli, loi de Fick [OUL 98b], loi de Kirchhoff, ...). La jonction "1" dans un processus thermofluide est lié à un élément R_h qui modélise dans le cas hydraulique une restriction et une résistance thermique dans le cas de la conduction et/ou radiation. La résistance hydraulique R_h est le coefficient de perte de charge alors que la résistance thermique est associé au coefficient d'échange thermique. Dans le cas général, le flux de matière transportée dépend des efforts hydraulique e_h et thermique e_t (cf. thème modélisation) alors que le flux de chaleur transporté par conduction \dot{Q} dépend de l'effort thermique e_t (gradient de température par exemple). Ces relations sont de type algébrique :

$$\Phi_{Rh}(e_h, R_h, e_t, f_h) = 0 \quad (7.31)$$

$$\Phi_{Rt}(e_t, R_t, \dot{Q}) = 0 \quad (7.32)$$

Partant des relations 7.31 et 7.32 et en exprimant les variables qui y figurent en fonction des variables à surveiller on aboutit à des RRAs.

Soit r_{1h} le résidu généré à partir de l'équation 7.31. Il sera sensible à des fautes de type bouchage hydraulique (encrassement des conduites, sédimentation, ...). Soit r_{1t} le résidu généré à partir de l'équation 7.32. Il sera sensible à des fautes dues à un défaut d'encrassement des échangeurs de chaleur (due à une variation du coefficient d'échange de chaleur).

7.6.4.2 RRAs des régulateurs

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

$$RRA = f(De, Df, y_{ref}, u, \theta_{reg}) \quad (7.33)$$

7.6.4.3 RRAs des sources contrôlées

Les sources contrôlées transforment le signal de u (mesurée) en action réglante MSf ou MSe , ou en une variable d'énergie (exemple: déplacement de la tige d'une vanne) qu'on considère aussi mesurée. Les RRAs (si elles existent) sont calculées sous la forme:

$$RRA1 = F_a(MSf, MSe, u). \quad RRA_{na} = F_{a,na}(MSf, MSe, u) \quad (7.34)$$

7.6.5 Surveillabilité des composants thermofluides

7.6.5.1 Matrice des signatures de fautes du composant

- Notations

Soit R_Σ l'ensemble des résidus déduits du modèle bond graph global BG de l'installation constitué de n_c composants thermofluides:

$$R_\Sigma = \{R_1\} \cup \{R_2\} \dots \cup \{R_{nc}\} \quad (7.35)$$

et R_i ($i = 1 \dots nc$) le sous-ensemble des RRAs déduites du modèle bond graph MBG_i du composant i noté $COMP_i$:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{il} \end{bmatrix} \quad (7.36)$$

r_{ij} est le j -ième résidu du composant, l est le nombre de résidus déduit du modèle bond graph du composant BG_i

Soit $Faute_k$ ($k = 1 \dots n_{Fi}$) l'ensemble des fautes affectant $COMP_i$. n_{Fi} est le nombre de fautes auxquelles le sous-ensemble des résidus r_i est sensible.

Soit MC_i la matrice de cohérence (table de signature de panne) pour $COMP_i$. Une valeur "1" à la j -ième ligne et à la k -ième colonne indique que le résidu r_i est sensible à la k -ième faute. La matrice MC_i est donnée par le tableau 7.2.

r_i	Défaillances affectant le composant i , C_i				
	$Faute_{1,C_i}$	$Faute_{k,C_i}$		$Faute_{n_{Fi},C_i}$
r_{i1}	1	0	0	0	0
r_{i2}	0	1	0	0	0
.	.	.	0	.	.1
r_{ij}	.	.	1	.	.
.
r_{il}	0	0	0	0	1

TAB. 7.2 – Matrice des signature des fautes du i -ème composant MC_i

7.6.5.2 Matrice des signatures de fautes du processus global

– Notation

L'indicateur noté IC_i associé au composant i est égal à 1 si le sous-ensemble des résidus R_i ($i = 1 - nc$) n'est sensible qu'aux fautes affectant le composant $COMP_i$, sinon $IC_i = 0$.

Le modèle bond graph du processus global BG est constitué de l'ensemble des modèles bond graph des composants :

$$BG = \{BG_1 \cup BG_2 \dots \cup \dots BG_{nc}\} \tag{7.37}$$

La matrice globale de signatures de fautes de l'installation MC_Σ du processus global constitué de n_c composants peut être représentée comme sur le tableau 7.3.

★ Pour un système non linéaire la procédure de génération de RRAs est complexe et le choix des couplages est souvent intuitif. Le graphe devient rapidement complexe avec l'augmentation du nombre de variables. Seule la théorie d'élimination (valable pour les modèles polynômiaux) propose une méthodologie de génération des RRAs sous forme symbolique. La génération des RRAs sur le bond graph est basée sur le parcours de

MC_{Σ}	Composants thermofluides				
	COMP ₁	COMP _i	COMP _{nc}
IC_1	1	0	0	0	0
IC_2	0	1	0	0	0
.
IC_i	0	0	1	0	0
.
IC_{nc}	0	0	0	0	1

TAB. 7.3 – Matrice de signature de fautes du processus global

chemins causaux sur le modèle graphique. Ceci est exprimé sur un graphe bi-parti orienté par l'ordre d'élimination des variables inconnues. Le modèle bond graph par rapport à d'autres formes de représentation explicite aussi bien la structure que le comportement du système. Ses propriétés causales et fonctionnelles permettent alors de générer les RRAs d'une façon modulaire en considérant le modèle bond graph global de chaque composant. La méthodologie a été appliquée à une installation industrielle représentant un générateur de vapeur dans le cadre de la thèse de F. Busson [BUS 02].

Chapitre 8

Contribution à la conception d'un outil de supervision

8.1 Problématique

La supervision est l'ensemble des outils et méthodes qui permettent de conduire des installations industrielles tant en fonctionnement normal qu'en présence de défaillances. La contribution de l'outil bond graph pour la conception d'un système de supervision s'inscrit dans les contributions des travaux de l'équipe SFSD sur deux points de vue, la détection et l'isolation de défauts (FDI) et la tolérance aux fautes (FTC) c.à.d. les moyens de continuer à conduire le processus en présence de fautes.

Le thème de recherche développé dans ce chapitre est une suite aux travaux déjà réalisés. Il consiste en la conception d'un générateur de modèles des systèmes thermofluides pour leur diagnostic basé sur la méthodologie développée plus haut et l'intégration des modèles fonctionnels et bond graph pour le filtrage d'alarmes et le diagnostic des actionneurs intelligents. Ce thème est développé dans le cadre de deux projets européens (CHEM et DAMADICS) et un contrat national avec EDF.

8.2 Conception d'un générateur de modèles en génie des procédés pour leur diagnostic

8.2.1 Positionnement

On a souligné l'importance du modèle dans les méthodes de surveillance à base de modèles. Une fois le modèle généré, les indicateurs de fautes peuvent être déduits. L'obtention de ces modèles est une tâche complexe notamment pour les processus en génie des procédés en raison de leur diversité et du couplage des énergies les caractérisant.

Un certain nombre de logiciels permettent la génération de modèles en génie des procédés en régime stationnaires [WES 85], [BRI 89]. Les modèles dynamiques non linéaires ou linéaires peuvent être simulés numériquement en se basant sur les bibliothèques de modèles existants dans le logiciel Matlab-Simulink [SIM 97] ou en utilisant le langage Modelica [ELM 93], [WOL 96]. D'autres produits sont plus spécialisés dans les processus chimiques tel que la boîte à outil de Odysseo (Object-oriented Dynamic Simulation Software Environment) du logiciel Prosim [MOY 99] qui permet la simulation dynamique de ce type de processus.

Toutefois, il n'existe pas dans la littérature de logiciel permettant la génération de modèles dynamiques sous forme d'équations d'état non linéaires et de RRAs.

Dans le cadre du projet CHEM (cf. activités contractuelles) pour la supervision des processus chimiques et pétrochimique, nous avons implémenté la méthodologie de génération de modèles et de RRAs pour le diagnostic des processus thermofluides. L'architecture globale du système est donnée par la figure 8.1.

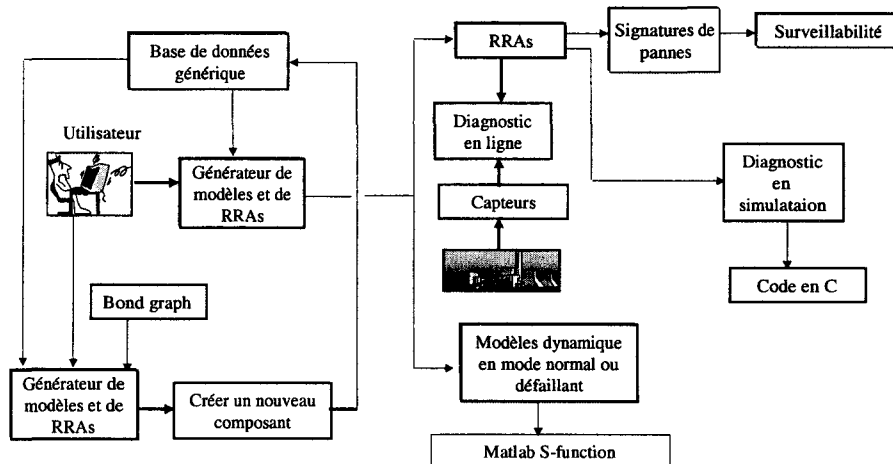


FIG. 8.1 – Architecture du générateur de modèles en génie des procédés pour leur diagnostic

Les fonctionnalités du système développé peuvent être résumées comme suit.

Sur la base du Plan d'Instrumentation Détaillé, le modèle architectural est réalisé en connectant les différents composants en respectant des règles de connections basées sur une approche fonctionnelle développée par Féliot dans [FEL 97]. La base de données contient trois classes : classe de processus (formée sous forme de composant générique vanne, conduite, chaudière etc.), classe de contrôleurs (régulateur PID, tout ou rien, ..) et une classe de capteurs (détecteurs d'effort, i.e. température, pression, ..et détecteurs de flux (débit)).

Le modèle dynamique (sous forme d'équations d'état modélisant l'énergie thermique et hydraulique) ainsi que les RRAs sont alors générés sous forme symbolique. L'analyse structurelle du modèle global permet alors d'obtenir la surveillabilité du processus (donnée par le

tableau de signature des fautes) sur la base de l'instrumentation utilisée. Ceci permet alors à l'opérateur d'une façon graphique de placer convenablement les capteurs pour satisfaire le cahier des charges fixés.

Pour l'implémentation de ces procédures, une boîte à outil est développée dans le logiciel SYMBOLS-2000 [MUK 01] dont l'interface graphique est donnée (fig. 8.2).

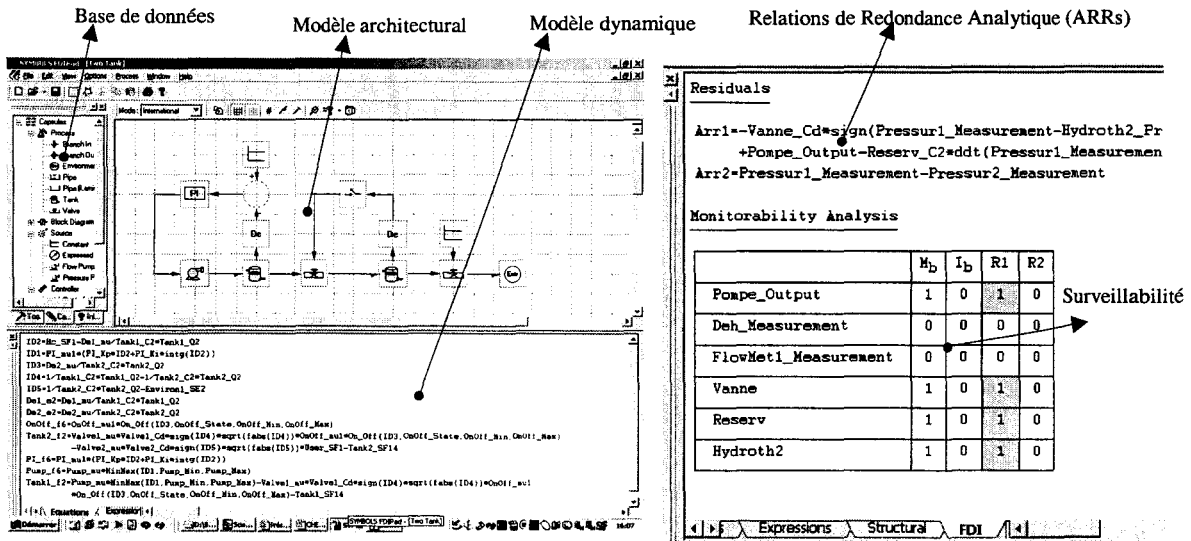


FIG. 8.2 – Interface du logiciel pour la génération de modèles pour le diagnostic

Une aide en ligne pour chaque composant de la bibliothèque de modèle permet à l'utilisateur d'enrichir la bibliothèque de modèles existante ou de la modifier.

Les sorties sont affichées sous forme d'équations et de matrices et peuvent être exportées sous une forme d'un langage standard de type XML (eXtended Mark-up Language), afin d'être utilisées par d'autres modules du superviseur global.

- ★ Une méthodologie basée sur l'analyse structurale des modèles bond graph et les modèles fonctionnels est développée et implémentée pour la conception d'un générateur de modèles dynamiques pour la détection et la localisation des défaillances des processus thermofluides. Le logiciel implémenté est présenté avec une interface de façon que l'utilisateur puisse aisément (grâce à l'intégration de l'outil fonctionnel comme interface avec l'opérateur humain), construire les modèles dynamiques et architectural de la plupart des processus thermofluides (en se basant sur le P&ID de l'installation) et générer les RRA. Ce thème de recherche développé dans le cadre du projet européen CHEM pour la supervision de processus chimiques et pétrochimiques a fait l'objet de plusieurs rapports de contrat, d'une communication [OUL 01a] et d'une publication soumise à CEP [OUL 02e]. Cette dernière est jointe en annexe. Ce travail de recherche est en cours

de développement dans le cadre de la thèse de Medjaher afin d'étendre l'application aux processus chimiques modélisés par un bond graph à trois énergies. Une application sur l'installation pilote est donnée en annexe.

8.3 Intégration des modèles fonctionnels et des modèles bond graphs

Dés lors que l'opérateur humain est présent, le système est vu en termes de fonctions, le problème de tolérance aux fautes s'élargit au problème de supervision, qui pose celui de la décision en termes de filtrage d'alarmes.

Les principales limites de l'approche fonctionnelle [KEU 91], [CHI 93], [LIN 94a] concernent l'ambiguïté introduite par la notion de fonction et l'absence de considérations physiques du processus. Il existe autant de modèles que d'utilisateurs. L'outil bond graph apparaît alors comme un outil complémentaire pour ces tâches [OUL 02b].

Du point de vue fonctionnel, les modèles externes ([ROB 93], [ALB 96], [STA 96], [BAY 97], [MAF 98]) permettent de structurer le fonctionnement des processus industriels selon plusieurs modes d'exploitation. Ce modèle repose sur les notions de services, de modes d'exploitation et de missions. A un instant donné, un système poursuit un sous-ensemble cohérent de missions définies par le cahier des charges. Chacun de ces sous-ensembles est dénommé mode d'exploitation. Les conditions logiques de passage d'un mode d'exploitation vers un autre sont décrites par un graphe états-transitions appelé graphe de gestion des modes d'exploitation. Du point de vue de la surveillance des processus industriels, les propriétés causales du bond graph sont utilisées pour la détection et l'isolation des fautes affectant les capteurs, les actionneurs ou les composants physiques du procédé. Ainsi, la disponibilité des services (nécessaires pour la réalisation d'une mission) sera fournie par l'algorithme de surveillance au graphe de gestion des modes d'exploitation. Au sens des bond graphs, un service est associé à une fonction réalisée par un ensemble d'éléments bond graph tels que: C (stocker), TF , (transformer), R , élément résistif (transporter (conduite), réguler (vanne), ...), Se , source d'effort (fournir de l'énergie). Les services offerts par les capteurs (mesurer) sont assurés par les détecteurs d'effort (De) et de flux (Df).

A chaque instant une installation fonctionne dans un mode opératoire dont le comportement est associé à son modèle bond graph MBG_i (fig. 8.3). Soit MBG l'ensemble des modèles bond graph d'un processus technologique et, MBG_j le modèle bond graph correspondant au j -ième mode opératoire, et n le nombre des modes opératoires :

$$MBG = \{MBG_1, MBG_2, \dots, MBG_l, \dots, MBG_n\} \quad (8.1)$$

Soit b l'ensemble des transitions $b = \{b_{ij}\}$, où b_{ij} indique la condition de changement de mode opératoire MBG_i vers MBG_j . Cette condition est représentée par une variable

booléenne $b_{ij} \in \{0,1\}$. Le mode opératoire en fonctionnement peut être représenté comme suit:

$$\begin{aligned}
 MBG_j &= \{s_{j1}(V_{j1}), s_{j2}(V_{j2}), \dots, s_{ji}(V_{ji}), \dots, s_{jm}(V_{jm})\} \\
 &= \{S_j\} / s_{ji} (i = 1, k) = \{\{C_{ji}\}, \{R_{ji}\}, \{TF_{ji}\}, \\
 &\quad \{GY_{ji}\}, \{Se_{ji}\}, \{Sf_{ji}\}, \{De_{ji}\}, \{Df_{ji}\}\}
 \end{aligned}
 \tag{8.2}$$

m est le nombre de services rendus pour réaliser le mode opératoire associé au modèle bond graph MBG_j . k est le nombre d'éléments bond graph nécessaires pour la réalisation physique du i me service s_i . V est la version du service.

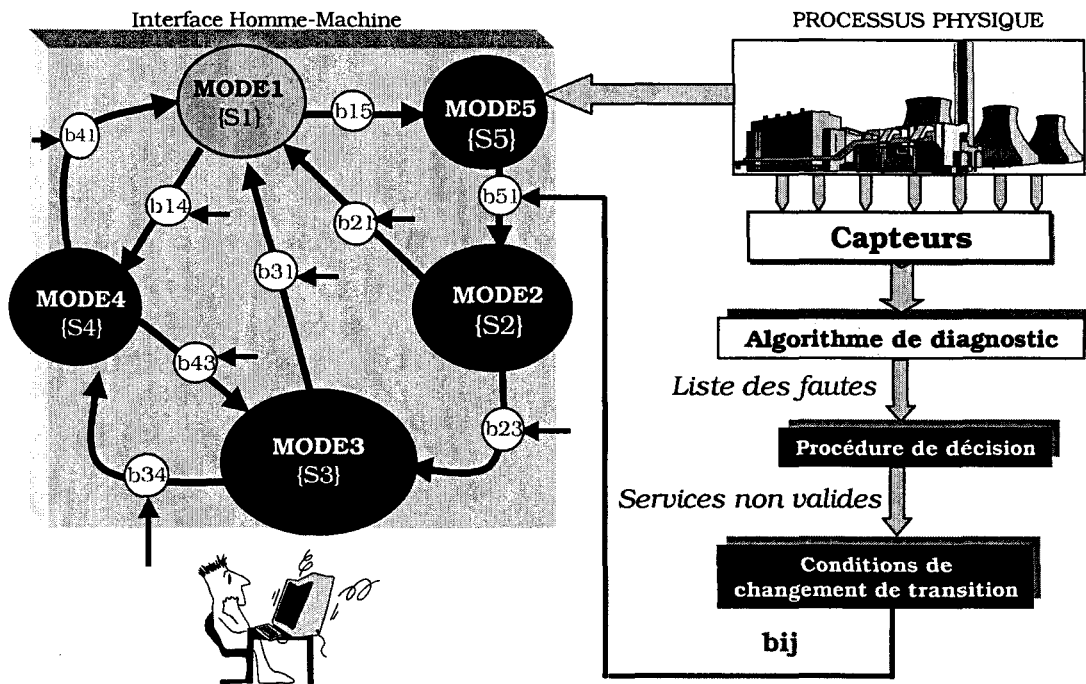


FIG. 8.3 – Système de supervision intégrant les modèles externes et l'outil bond graph

8.3.1 Application au diagnostic des actionneurs intelligents

La méthodologie est appliquée à une vanne pneumatique industrielle (figure 8.4) choisie comme banc d'essai dans le cadre du projet DAMADICS [BAR 02]. L'actionneur est constitué principalement d'une vanne de commande, d'un servo-moteur et d'un positionneur avec un système d'alimentation en air.

Le cahier des charges fixé concerne la détection d'un ensemble de dix neuf (19) fautes [KOJ 98] classées en quatre groupes : les fautes sur la vanne de commande (sédimentation de

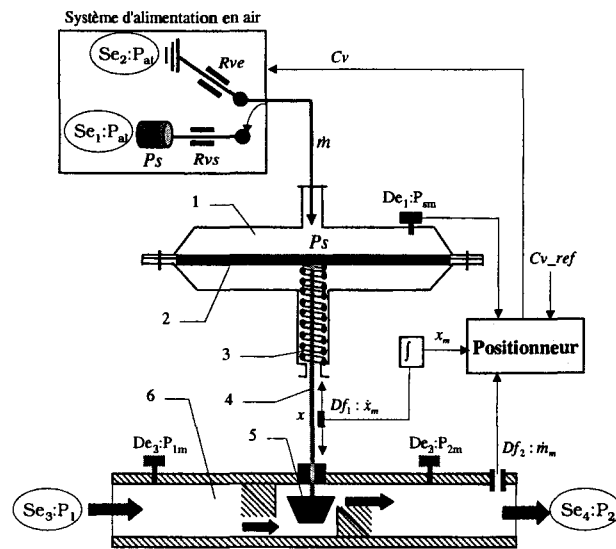


FIG. 8.4 – Vanne pneumatique

la vanne ou du siège, érosion de la vanne, augmentation des frictions, fuites, ...), les fautes sur le servo-moteur pneumatique (piston tordu, étanchéité de la cage du servomoteur, perforation du diaphragme, ...), les fautes sur le positionneur (faute capteurs, transducteur, ...), et les fautes générales telle que l'alimentation en air.

La force du fluide est fonction de la différence des pressions en amont ($Se_3 : P_1$) et en aval ($Se_4 : P_2$). Ces pressions sont mesurées par les capteurs De et De . La position de la vanne est contrôlée par le servo-moteur afin d'éliminer l'hystérésis. Le servo-moteur est constitué d'une chambre pneumatique (1), d'un ressort (3), d'un diaphragme (2), et d'une tige (4). La source de puissance est fournie par l'air compressible stocké dans (1). La force de pression agit sur un diaphragme flexible pour fournir un mouvement linéaire à la tige du servo-moteur.

La sortie du positionneur Cv agit sur le système d'alimentation en air afin de délivrer la pression Ps désirée. Le signal de commande Cv est défini par : la position de la tige x_m , le débit volumique commandé du fluide \dot{m}_m , la pression dans la chambre pneumatique, P_{sm} , et la valeur de référence Cv_ref . x_m , \dot{m}_m , P_{sm} , et Cv_ref sont fournis respectivement par les capteurs Df_1 , Df_2 , De_1 et par l'utilisateur.

Le débit massique de l'air délivré par le système d'alimentation en air dépend de l'état des orifices d'alimentation (R_{vs}) et d'échappement (R_{ve}). Selon le signal de commande délivré par le positionneur Cv_ref , la chambre pneumatique (1) est exposée à la pression d'alimentation $Se_1 : P_{al}$ ou à l'échappement (pression nulle) $Se_2 : P_{at}$.

Le modèle bond graph en mode normal est donné par la figure (8.5).

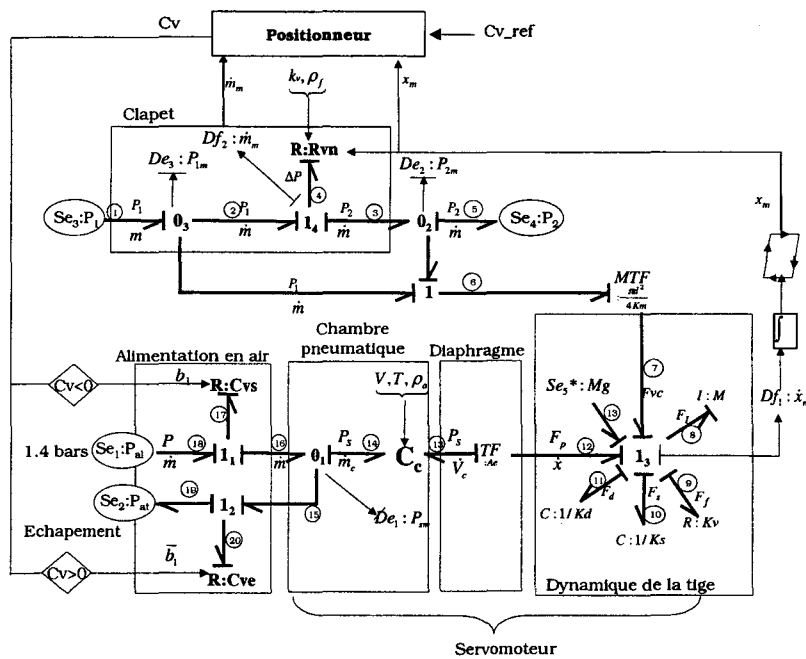


FIG. 8.5 – Modèle bond graph en mode normal

L'effet de compressibilité et le stockage de la masse d'air dans la chambre pneumatique sont modélisés par l'élément double ports C (C_c). Ce multi-port permet de calculer la pression qui dépend de la masse et du volume d'air. A l'intérieur de la chambre pneumatique les gaz sont considérés comme parfaits.

A partir de la loi de continuité :

$$m = f(V) \Rightarrow \dot{m} = \dot{V} + V\dot{\rho} \tag{8.3}$$

et sachant que,

$$\frac{P_1}{(\rho_1)^n} = \frac{P_2}{(\rho_2)^n} \Rightarrow n = \frac{\frac{\dot{p}}{P}}{\frac{\dot{\rho}}{\rho}} \tag{8.4}$$

on obtient à partir de ces deux relations :

$$\dot{P} = \frac{1}{\left[\frac{\rho V}{n P} \right]} \left(\dot{m} - \rho \dot{V} \right) \tag{8.5}$$

où n est l'indice polytropique, ρ la masse volumique du fluide et V le volume de la chambre, qui est variable.

Le multiport C_c a par conséquent un port $P\dot{m}$ et un autre $P\dot{V}$. L'énergie totale dépend de m et V . Le bond graph de cet élément représente une version sophistiquée de modèles des

effets de compressibilité dans les servo-mécanismes à air dans lesquels le volume est variable. Dans le modèle bond graph (fig.8.5), le pseudo-lien bond graph (14) modélise le stockage de la masse et le lien (13) le stockage du volume. Les pression sont les mêmes dans ces liens ($P_{13} = P_{14}$).

$$\begin{bmatrix} P_{14} \\ P_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & -K\rho_a \\ K & -K\rho_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{m} \\ \dot{V} \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

où ρ_a est la densité de l'air air et $K = 1 / \left[\frac{\rho V}{nP} \right]$.

En causalité intégrale, cette pression est calculée par la loi de conservation de la jonction "O₃" et de l'élément Cc.

$$e_{14} = \int \frac{n \cdot e_{14}}{\rho_a V} (f_{14} - \rho_a \cdot f_{13}) dt + e_{14}(0) \quad (8.7)$$

– Gestion des modes d'utilisation de l'actionneur intelligent

En se basant sur les objectifs fixés par les spécifications techniques de l'actionneur, une liste non exhaustive des missions et des services associés, i.e. les éléments bond graph a été définie (table 8.1).

L'actionneur intelligent correspond aux mode de fonctionnement suivants.

- *MBG0: Mode d'arrêt de fonctionnement.* Dans ce mode, l'actionneur exécute la mission 13. Puisque le processus est en repos (pas de puissance), le modèle bond graph ne représente aucun intérêt dans ce mode,et n'est donc pas représenté.
- *MBG1: Régime nominal.* Les missions exécutées sont 1 à 12.
- *MBG2- Mode de fonctionnement manuel.* Dans ce mode, l'actionneur exécute les missions 1 à 4, et 7 à 12.

Le mode de fonctionnement en Cavitation est un mode en faute. Le phénomène de Cavitation se produit quand la pression de sortie de la vanne (la pression en aval) est au dessous de la pression de vapeur du liquide. Ce phénomène génère de forts bruits et peut provoquer des accidents tel que par exemple le desserrage de la boulonnerie de la vanne.

Le graphe de gestion des modes d'utilisation correspondant est donné (fig. 8.6).

N°	Missions	éléments	N°	Missions	éléments
		Bond graph	7	Fournir du fluide	Se ₃
1	Alimenter la chambre pneumatique en air	Se ₁ , C _v , R: C _{vs} R: C _{ve} , Se ₂	8	Mesurer la pression dans la chambre pneumatique	R: R _{vn} De ₁
2	Stocker de l'air dans la chambre pneumatique	C: C _c	9	Mesurer la pression d'entrée	De ₃
			10	Mesurer la pression de sortie	De ₂
3	Transformer l'énergie pneumatique en énergie mécanique	TF	11	Mesurer la position de la tige du servo-moteur	Df ₁
			12	Mesurer le débit volumique qui traverse la vanne	Df ₂
4	Faire déplacer la tige du servo-moteur	TF, C: 1/K _d , TF C: 1/K _s , R: K _v	13	Maintenir les équipements	-
5	Commander la position de tige du servo-moteur	Df ₁ , Positionneur			
6	Réguler le débit	Df ₂ , Position.			

TAB. 8.1 – Liste non exhaustive des services de la vanne intelligente

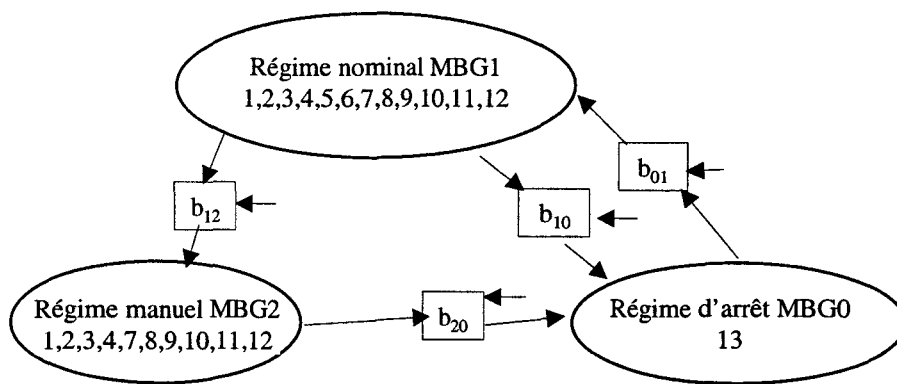


FIG. 8.6 – Gestion des modes d'utilisation de la vanne intelligente

- Disponibilité des services : détection et isolation des fautes

Sur la base du modèle bond graph en mode normal sont générés six résidus. Les signatures

des fautes sont données par la figure 8.2. En se basant sur le vecteur binaire de chaque composant donné par la table 8.2, toutes les fautes peuvent être détectées et isolées sauf la faute qui peut affecter les sources Se_1 , et Se_2 . Cc_f et pos_f désignent respectivement une faute de type fuite affectant la chambre pneumatique et une défaillance du positionneur.

	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6
Se_1	1	0	0	0	0	0
Se_2	1	0	0	0	0	0
Se_3	0	1	1	1	0	0
Se_4	0	1	1	0	1	0
De_1	1	1	0	0	1	0
De_2	0	0	0	0	1	0
De_3	0	0	0	1	0	0
Df_1	1	1	1	0	0	1
Df_2	0	0	1	0	0	0
Cc_f	1	0	0	0	0	0
pos_f	0	0	0	0	0	1

TAB. 8.2 – Signatures des fautes

Cette signature de faute est utilisée pour la génération de l'alarme pour la gestion des modes d'utilisation de l'actionneur intelligent donnée par la figure 8.6. Par exemple si le service "stocker l'air dans la chambre pneumatique" qui est associé à l'élément bond graph double ports C:Cc (table 8.1) n'est pas disponible (à cause d'une fuite dans la chambre pneumatique, seul le résidu r_1 sera sensible. Ainsi, la requête "mode régime nominal" devrait être rejetée tant que ce service (fourni par la procédure de décision) n'est pas disponible. Donc, selon la figure 8.6 le passage du mode d'utilisation MBG3 ou MBG2 sera rejeté puisque le service 2 appartient à ces modes d'utilisation. Seul le passage au MBG0 est autorisé.

8.3.2 Application au filtrage d'alarmes

La surcharge des informations due à un grand nombre d'alarmes est un problème fréquent dans les systèmes de supervision. Les problèmes rencontrés sont alors nombreux, on peut citer

l'absence d'émission d'une alarme, le phénomène d'avalanche liée au couplage fort de entre les variables.

Par son organisation causale, le bond graph permet de mettre en évidence les causes et effets, ce qui permet de retrouver les origines des alarmes. Le traitement des alarmes à partir des propriétés causales peut être étudié de deux façons :

Mise en évidence des conséquences d'un défaut: A partir d'une panne ou défaut physique, on retrouve par une voie descendante le long du graphe toutes les conséquences. De plus, ces conséquences peuvent être quantifiées grâce aux relations déduites du bond graph.

Détermination des causes par voie ascendante: A partir d'une conséquence d'une alarme, il est possible par voie ascendante dans le graphe de retrouver toutes les causes de l'alarme.

Le graphe est déduit directement du modèle bond graph couplé. La méthode développée a été appliquée dans le cadre du contrat avec EDF sur deux systèmes réels d'une centrale : le Système de Réfrigération Intermédiaires (SRI) et le Système de Contrôle Volumétrique et Chimique (RCV). Le Système de Réfrigération Intermédiaire (SRI) a pour rôle d'assurer le refroidissement des auxiliaires de la partie conventionnelle d'une centrale nucléaire. Le système de contrôle volumétrique et chimique (RCV) assure trois fonctions essentielles vis-à-vis du circuit primaire d'une centrale nucléaire qui sont : le contrôle volumétrique (le système sert de circuit tampon chargé d'absorber les variations de volume d'eau du circuit primaire non compensées par le pressuriseur), le contrôle chimique (le système maintient une qualité de l'eau primaire qui permet de minimiser la corrosion et l'érosion des constituants du circuit primaire) et le contrôle neutronique (le système ajuste une concentration de poison neutrophage soluble dans l'eau primaire afin de respecter les impératifs de conduite et de sécurité du réacteur).

★ *L'intégration des modèles fonctionnels et bond graph est développé en collaboration avec le thème tolérance aux fautes de l'équipe SFSD et SED et avec le dans le cadre de deux projets: Européen, sur le diagnostic des actionneurs intelligents (DAMADICS) et national (avec EDF) sur le filtrage d'alarmes. Les résultats de ces travaux ont donné lieu aux publications co-signées [OUL 02a]. [OUL 01b] [OUL 02d], à une revue soumise à CEP dans le cadre du projet DAMADICS [OUL 02b]. Dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH, UMR CNRS 8530) est proposé une modélisation multiple par l'intégration des méthodologies fonctionnelles, structurelles, et bond graph pour la supervision des systèmes complexes appliqués à un générateur de vapeur [OUL 00e]. Cette publication est jointe au document.*

Chapitre 9

Conclusion générale et Perspectives

9.1 Conclusions générales

Arrivé au terme de ce rapport je crois utile d'en résumer les points importants et de définir à court et à long terme les perspectives en terme d'axes de recherche à développer.

J'ai exposé mes travaux autour de deux thèmes majeurs, il s'agit, d'une part de *la modélisation et la commande de processus chimiques* en vue de diminuer le taux de pollution et d'autre part de *la modélisation et la supervision des systèmes en génie des procédés à l'aide de la méthodologie bond graph*.

Ces deux thèmes de recherche ont été développés dans deux périodes distinctes de ma vie. *La première étape (1988-1994)* en qualité de chef de département d'automatique dans un établissement public de l'enseignement supérieur (Ecole d'ingénieur INHC) en Algérie concerne des applications de la commande et de la modélisation des processus chimiques. Une bonne expérience pédagogique, de responsabilité et de recherche appliquée a été acquise dans ce domaine. Toutefois, le peu de moyens et la structure de recherche sur place expliquent le type et le nombre réduit de publications réalisées.

Dans la deuxième période en qualité de maître de conférences associé (1995-1997) puis de titulaire après 1997, le thème dominant de mes recherches développé au LAIL peut être résumé comme suit:

- Modélisation des processus en génie des procédés et plus spécialement les processus thermofluides en utilisant un outil intégrateur, les bond graphs. Ce type de modélisation, à caractère multidisciplinaire est particulièrement intéressant quand on traite des problèmes en génie des procédés faisant intervenir des technologies diverses, thermique, hydraulique, chimique, ...c'est pourquoi certains industriels ont été très rapidement intéressés, ce qui s'est traduit par un certain nombre de projets nationaux EDF, CEA, Sherpa Engineering..

- Conception d'un système de supervision à l'aide du bond graph (en exploitant ses propriétés causales et structurelles). Cette démarche intégrée représente aussi une recherche finalisée, des applications sur des processus énergétiques (générateur de vapeur, centrale EDF), chimique et pétrochimique (dans le cadre du projet européen CHEM) et mécanique (dans le cadre du projet Européen DAMADICS). Pour faciliter le transfert et l'utilisation des méthodologies, nous avons développé un logiciel à support graphique : FDIPAD pour la surveillance des processus en génie des procédés par l'intégrations de la modélisation fonctionnelle et bond graph.

L'originalité ou la contribution de mes recherches sont à situer par rapport à la méthode classique et les méthodes bond graphs, elle se situe à plusieurs niveaux :

- L'utilisation de l'outil bond graph couplé pour leur application à la modélisation des processus thermodynamiques et chimiques.
- La modélisation des générateurs de vapeur à l'aide des Equations à Dérivées partielles et bond graph, permettant une description dynamique en termes d'entrées sorties adaptée pour la commande, l'évolution spatiale du titre et la modélisation par bond graph des phénomènes de gonflement et tassement.
- La linéarisation des bond graphs couplés.
- La surveillabilité des actionneurs à partir des modèles bond graph couplés linéarisés sans la détermination préalable des RRAs
- La génération formelle des RRAs des composants thermofluides.
- La conception d'un système de supervision avec un point de vue détection et isolation des fautes, par une génération automatique des modèles et des RRAs des processus industriels, et un point de vue tolérance aux fautes, grâce à l'intégration des modèles fonctionnels et bond graph pour la reconfiguration et le filtrage d'alarmes des processus.

Cette thématique de recherche a été développée principalement dans le cadre de l'opération transversale "Bond Graph et Surveillance" au sein du LAIL que je dirige depuis 1998 et de projets européens et nationaux (CHEM, DAMADICS, EDF, ...), mais aussi au gré de la contribution des jeunes chercheurs encadrés ou coencadrés.

En enseignement , domaine qui me passionne et où j'essaie d'innover, en conciliant la charge de la recherche et celle de l'enseignement (lourde dans les IUT). Mes activités d'enseignement en France ont été le prolongement de celles assumées antérieurement. Mon apport personnel dans cette activité au sein de l'université de Lille (EPUL, IUT "A" GEII, et IUP QEPI) est le développement des applications des outils de l'automatique (modélisation, commande, et l'approche bond graph) au génie des procédés. Le site pilote du générateur de vapeur du LAIL (dont je suis le responsable scientifique) a été au centre des applications de ces outils dans le cadre de nombreux encadrements de projets d'ingénieurs.

Le transfert de la connaissance est aussi important, ainsi j'ai participé à la publication de trois ouvrages (deux chez Hermes et un chez Springer) rassemblant les principaux résultats des travaux ainsi que des exemples concrets de mes collaborations industrielles aussi bien dans le domaine de la modélisation que de la surveillance. Je suis invité fréquemment à donner un cours sur les bond graphs dans le cadre du programme Socrates en Europe ou dans le cadre de collaboration avec des universités algériennes, ou dans le cadre de workshops ou des collaborations nationales (S3, PRI, SFGP, programmes européens...).

Enfin dans mes divers travaux, mon approche n'est pas de me cantonner dans le domaine méthodologique ou mathématique en considérant que je traite simplement une application. Mon expérience personnelle m'a convaincu que souvent cette démarche donne certes des résultats structurés dans une théorie, parfois difficile à mettre en oeuvre, mon ambition est de devenir moi-même un spécialiste des domaines d'applications abordés et d'y apporter mes éclairages spécifiques tout en comprenant les problématiques. Les méthodologies sont souvent mal adaptées (en bond graph on ne considère que deux types de capteurs : détecteurs d'effort et de flux alors que d'autres existent de niveau, de puissance ..).

9.2 Perspectives

L'idée sous-jacente aux différents résultats exposés dans ce rapport est fondée dans l'intégration à l'aide d'un langage unifié (les bond graphs), de concepts issus de la physique (modélisation), de la théorie de graphes, de l'analyse structurelle et de l'analyse fonctionnelle. Il ne s'agit pas évidemment d'introduire sans raison des extensions en juxtaposant des éléments de divers domaines. Mais, il apparaît bien que ces concepts et techniques s'intègrent de manière cohérente et utile.

Les perspectives de mes recherches seront inscrites dans un axe de recherche : **Supervision des processus en génie des procédés** incluant les processus énergétiques, chimiques et pétrochimiques. Convaincu de l'importance d'un modèle plus proche de la physique en particulier assurant la continuité des échanges énergétiques, l'utilisation d'un outil fédérateur les bond graphs, me paraît bien adapté. Il n'en reste pas moins vrai que pour aborder la supervision globale d'un processus de production, il est important de considérer l'intégration de plusieurs approches que je peux résumer en : des outils pour la connaissance du processus, des outils pour une détection et l'isolation (rapide) des fautes, des outils pour les procédures de reconfiguration prenant en compte l'opérateur humain et des outils pour la surveillance sans modèles (apprentissage, analyse des données, etc...).

Les outils développés dans ce rapport font apparaître plusieurs limites qui ouvrent des thèmes de recherche à développer :

- Les incertitudes paramétriques (constantes ou variables) peuvent être prises en compte

dans la modélisation bond graph en caractérisant chaque élément bond graph X (R, C, I,..) de sa valeur nominale X_n et d'incertitude ΔX . Des travaux dans le domaine de la modélisation des modèles linéaires incertains où les incertitudes concernent les paramètres des éléments passifs (R,C,I) ont déjà été développés dans le cadre d'une thèse encadrée par le prof. G. Dauphin-Tanguy. Ces incertitudes peuvent être prises en compte dans l'étape de décision dans le traitement des résidus (en aval du module de génération des RRAs). L'approche des Séquences des Bandes Temporelles (SBT) appliquée aux processus thermofluides et que nous développons dans le cadre de la thèse de Rim Amraoui paraît bien adaptée. Les incertitudes paramétriques sont alors prises en compte pour la définition des limites supérieures et inférieures de la SBT du résidu.

- Les modèles développés concernent des processus thermofluides (deux énergies, thermique et hydraulique), une extension à des processus chimiques est en cours de développement (thèse de Kamel Medhafer depuis septembre 2002). Dans ces modèles les phénomènes de transformation chimiques (caractérisés par la paire de pseudo variables de puissance: potentiel chimique (ou affinité chimique) et le flux molaire proche et loin de l'équilibre) seront développés. Le développement de ces modèles ouvriront une autre voie de recherche : **le diagnostic dans le domaine de la sûreté et de la protection de l'environnement des processus chimiques (thème d'actualité)** avec une approche à base de modèle. En effet, sommairement, l'apparition de réactions secondaires dans des processus chimiques peut être considérée comme un modèle défaillant donc source d'apparition de la pollution ou de catastrophe technologique suite à la production de produits explosifs par exemple.
- Dans la procédure de génération de RRAs, l'étude de l'existence de chemins entre un élément de X (ensemble des variable inconnues) et un élément de Y (ensemble des variable connues Y) traduit les propriétés de surveillabilité structurelle du système en fournissant les séquences de calcul. L'existence des éléments multiports dans le modèle bond graph introduit nécessairement des sommets dans le graphe qui peuvent rassembler plusieurs sous-sommets d'où la nécessité d'utiliser un hypergraphe. Dans les processus en génie des procédés, il existe plusieurs possibilités de dépendances causales donc de calculabilité d'une variable à partir de la relation de structure, (à cause du couplage des énergies), il y a alors apparition d'un problème combinatoire qui peut être résolu par l'introduction de critères multiples (physique, instrumentale, contrainte de complexité) en pondérant les arcs du multi-hypergraphe correspondant aux critères définis afin d'appliquer des algorithmes du plus court chemin³⁵.

35. Cet aspect est en cours de développement en utilisant les matroïdes dans le cadre d'une collaboration avec H. Haffaf de l'Université d'Oran (Algérie) (présent au laboratoire pour trois mois comme maître invité).

- Enfin, je souhaite étendre à long terme mes recherches à la **modélisation et la surveillance des processus décrits par des modèles à paramètres distribués**. Le problème posé est pertinent car il nécessite alors une détection de défaillance dans le temps et dans l'espace. La détection de fuites dans les gazoducs ou dans les réacteurs (qui sont décrits surtout par des EDPs) reste un domaine d'application privilégié. Le développement croissant des gazoducs, leurs grandes dimensions, les considérations économiques et écologiques ainsi que le niveau de sécurité et de fiabilité qui en est exigé nécessitent la mise au point de techniques de surveillance performantes. Dans ce domaine³⁶, quelques travaux portant principalement sur l'optimisation (au sens de minimisation de consommation d'énergie) sont publiés. Par contre le problème de surveillance des gazoducs et plus particulièrement la détection et la localisation de défauts physiques (fuite, encrassement, dépôts de gazoline etc.) reste industriellement posé. Les travaux existant (principalement prof. R. Iserman) sont basés sur la mesure des variables entrée - sortie pour le suivi des changements pouvant intervenir sur le process en utilisant des techniques de seuillage des variables ou de l'identification paramétrique ou en s'appuyant dans l'industrie sur la gestion de l'information en temps réel en utilisant le système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

³⁶. Nous avons entamé cette recherche dans le cadre d'une thèse en cotutelle avec l'industrie du gaz en Algérie, mais qui n'a duré qu'une année.

Annexe A

Générateur de RRAs : Application à un site pilote

A.1 Fonctionnalités du logiciel par un exemple pédagogique

Le but de ce chapitre est de montrer l'applicabilité de la méthodologie développée pour la génération automatique de modèles dynamiques et d'indicateurs de fautes pour la surveillance d'un processus thermofluide complexe. Je développerai initialement les fonctionnalités du logiciel développé "FDIPAD" à l'aide d'un exemple simple puis une application à une installation pilote de générateur de vapeur. Les détails théoriques peuvent être consultés dans la publication soumise au journal CEP [OUL 02e] et fournie dans le présent document.

Examinons le même exemple donné sur la figure 7.4, mais en tenant compte des énergies thermiques et hydrauliques. Il s'agit tout simplement d'un réservoir alimenté par une pompe et évacuant le fluide vers l'atmosphère au travers d'une conduite sur laquelle est montée une vanne de section fixe.

Considérons les différentes étapes pour la génération du modèle dynamique, des RRAs et l'analyse de la surveillabilité du processus.

A.1.1 Construction du modèle architectural valide

On rappelle que l'architecture du système est un modèle orienté composant qui décrit directement le processus industriel comme un réseau des composants industriels. L'opérateur construit le modèle architectural (à partir de la base de données) en sélectionnant les composants technologiques et le système d'instrumentation constituant le processus (fig.A.1a). Du point de vue fonctionnel le processus est constitué d'une pompe de débit qui appartient à la classe des sources d'énergie [OUL 02c], fournissant un flux hydraulique $SF1$, d'un réservoir appartenant à la classe "accumulateur d'énergie", et d'une conduite avec une vanne apparte-

nant à la classe des processus de transport d'énergie. Le fluide est déversé vers l'environnement qui est une source de pression (qui peut être atmosphérique). Le système d'instrumentation disponible est constitué d'un capteur de pression dans le réservoir et d'un capteur de débit traversant la vanne.

Les liens de puissance représentés sur le modèle architectural et indiquant la direction du flux sont dans le cas thermofluide vectoriels (en gras) car il véhiculent deux types d'énergies. Par contre les liens d'informations (vers les capteurs) sont scalaires (traits fins). L'opérateur (s'il est familier de l'outil bond graph) pourra éventuellement afficher et modifier le bond graph associé à chaque composant.

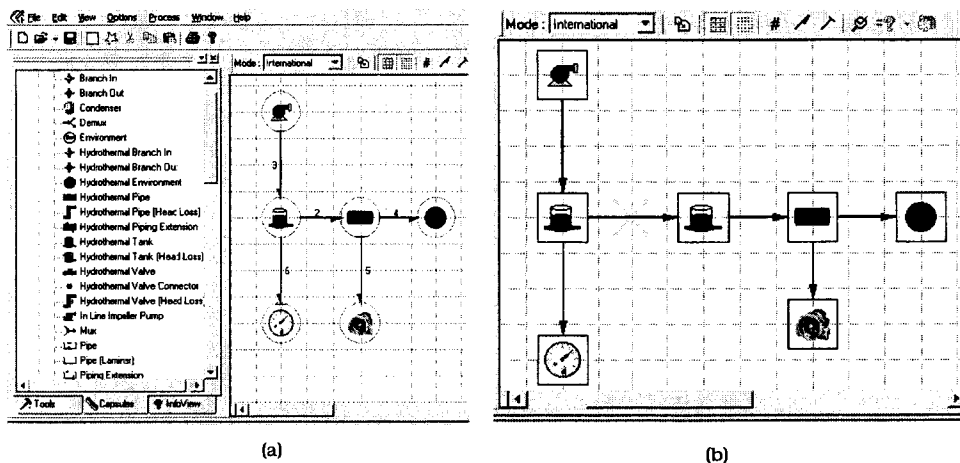


FIG. A.1 – Modèle architectural du système validé (a) et non validé (b)

– Vérification de la consistance du modèle architectural

Le modèle architectural est ensuite validé en vérifiant les connexions des différents composants énergétiques. Cette règle syntaxique est basée sur le type des entrées et des sorties de chaque composant ([OUL 02c], p.25). Dans cette mesure il apparaît qu'à un processus de type "accumulation d'énergie" ne peut succéder que des processus de type transport ou transformation d'énergie comme indiqué par l'erreur de syntaxe sur la figure A.1b.

A.1.2 Génération du modèle d'état dynamique

Le modèle d'état (avec ou sans fautes) peut alors être généré A.2. Nous avons deux variables d'état : la masse $Y[3]$ et l'enthalpie totale stockée par le réservoir $Y[2]$. $Y[0]$ et $Y[1]$ sont les équations de mesure.

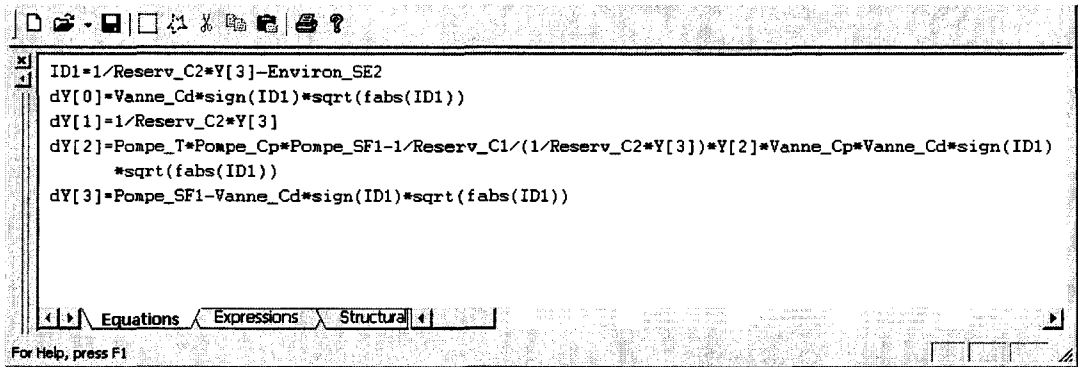


FIG. A.2 – Génération du modèle dynamique sous forme d'équations d'état

Les paramètres du modèle sont associés au composant correspondant "Composant_paramètre" (cf. figure A.3). Des valeurs numériques peuvent leur être affectées en vue de la simulation du modèle. Des boucles causales peuvent apparaître et introduire alors des équations implicites. Toutefois, il est possible de "casser" ces boucles algébriques (dus principalement à la mise en série ou en parallèle d'éléments résistifs) par l'introduction d'un élément capacitif (réservoir fictif) de très grande capacité. (Cet élément existe dans la base de données)

Variable	Assignment
Vanne_Cd (double) : Coefficient	
Vanne_Cp (double) : Coefficient	Vanne_Cp=Cp;
Pompe_Flow (double) : Additional	
Cp (double) : Specific heat at c	
Pompe_SF1 (double)	Pompe_SF1=Pompe_Flow;
Pompe_Cp (double) : Coefficient	Pompe_Cp=Cp;
Pompe_T (double) : Temperature o	
Reserv_Area (double) : Cross-Sec	
Rho (double) : Density of fluid	
Reserv_Rho (double) : Density of	Reserv_Rho=Rho;
g (double) : Gravitational const	
Reserv_g (double) : Gravitational	Reserv_g=g;
Reserv_h0 (double) : Initial hei	
Reserv_C2 (double)	Reserv_C2=Reserv_Area/Reserv_g; if (first_time) Reserv_Q2=Reserv_Rho*Reserv_Area*Reserv_h0; // Q2 is the state for total mass
Reserv_Cp (double) : Coefficient	Reserv_Cp=Cp;
Reserv_T0 (double) : Initial flu	
Reserv_C1 (double)	Reserv_C1=Reserv_Area/Reserv_g*Reserv_Cp; if (first_time) Reserv_Q1=Reserv_Rho*Reserv_Area*Reserv_h0*Reserv_Cp*Reserv_T0; // Q1 is the state for total enthalpy = nCpT
Environ_Pata (double) : Gage env	
Environ_SE2 (double)	Environ_SE2=Environ_Pata;

FIG. A.3 – Affichage des expressions des paramètres du modèle

A.1.3 Génération des RRAs

En définissant la mesure de pression par Deh et la source de pression de l'environnement par Po, les ARRs générés sous forme symbolique sont donnés par la figure (A.4). L'opérateur de dérivation est indiqué par ddt. Ces expressions (comme celles du modèle) peuvent être

exportés sous forme HTML ou XML.

```

Residuals
Arr1=Df-Vanne_Cd*sign(Deh-Po)*sqrt(fabs(Deh-Po))
Arr2=-Df+Sfin-Reserv_C2*ddt(Deh)

```

FIG. A.4 – Affichage des ARR_s générés

A.1.4 Analyse de la surveillabilité

Le cahier des charges est fixé par l'utilisateur (fig. A.5a). Nous rappelons (cf. chap7) qu'il concerne la détection et la localisation des défaillances du processus au niveau : des capteurs (De, Df), des actionneurs (Sfin), des composants physiques (vanne et réservoir). Ces dernières défaillances sont de type fuite (pour les accumulateurs d'énergie) et bouchage (pour les conduite et vanne), et enfin des contrôleurs. Dans notre cas, on pourra à titre d'exemple ne pas considérer les fautes sur le composant environnement car en réalité il ne constitue pas un composant technologique mais une source de pression externe.

On obtient alors comme résultat de ce cahier de charges la matrice donnée par la figure (fig. A.5b). M_b , I_b , $R1$ et $R2$ représentent respectivement Détectabilité (Monitorability), Isolabilité et résidus associés aux RRAs. M_b et I_b prennent la valeur "1" si la défaillance est respectivement détectable et isolable. A titre d'exemple avec le système d'instrumentation installé dans notre cas, toutes les défaillances sont détectables, mais seule une défaillance sur la vanne (due à un bouchage où à une sédimentation par exemple) peut être isolée.

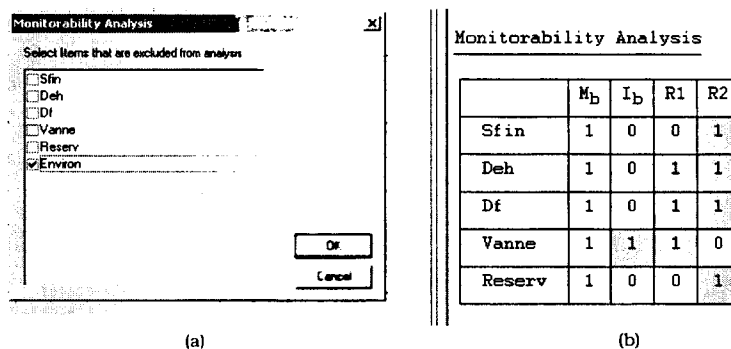


FIG. A.5 – Analyse de la surveillabilité du système

Afin d'augmenter les performances du système de surveillance, on doit soit ajouter un capteur (ce qui peut être aisément introduit sur le modèle architectural) ou spécifier un autre

cahier des charges (en ne surveillant plus la pompe par exemple), comme indiqué sur la figure A.6a. Il sera alors possible maintenant de détecter et d'isoler aussi une défaillance affectant le réservoir puisque son vecteur de signature de fautes $\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$ est distinct (cf. A.6b).

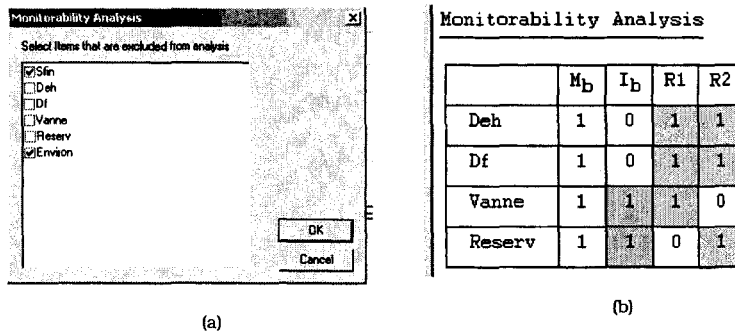


FIG. A.6 – Amélioration des performances du systèmes de surveillance des composants

A.2 Application sur une installation pilote de génération de vapeur

A.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. Elle est située à l'université de Lille (France) et appartient au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL). L'installation est constituée principalement d'une chaudière d'une capacité de 175 litres qui réalise la chauffe et la vaporisation de l'eau au moyen d'un thermoplongeur, élément chauffant d'une puissance électrique de 60 kilowatts. Le schéma de conception (P&IDiagramme) est donné par la figure A.7.

A la différence d'une centrale industrielle, l'énergie produite par le circuit primaire est engendrée ici par un thermoplongeur électrique, tandis que l'énergie fournie à la turbine dans une centrale est dissipée par un poste de détente et de refroidissement composé d'un ensemble de vannes modulantes et d'un condenseur couplé à un échangeur de chaleur.

Le modèle bond graph de l'installation est déjà présenté dans plusieurs de nos travaux (cf. [THO 00], [OUL 96a] par exemple). Les hypothèses de modélisation adoptées sont les suivantes : l'eau et la vapeur sont saturées. Les propriétés thermodynamiques sont calculées en équilibre thermodynamique (justifié par le fait qu'il se produit une bonne homogénéisation de l'écoulement eau - vapeur), le mélange est à une pression uniforme, les variables sont considérées à paramètres localisés, le générateur de vapeur a une capacité thermique et subit des pertes par conduction vers l'extérieur, le liquide dans le circuit d'alimentation est

incompressible.

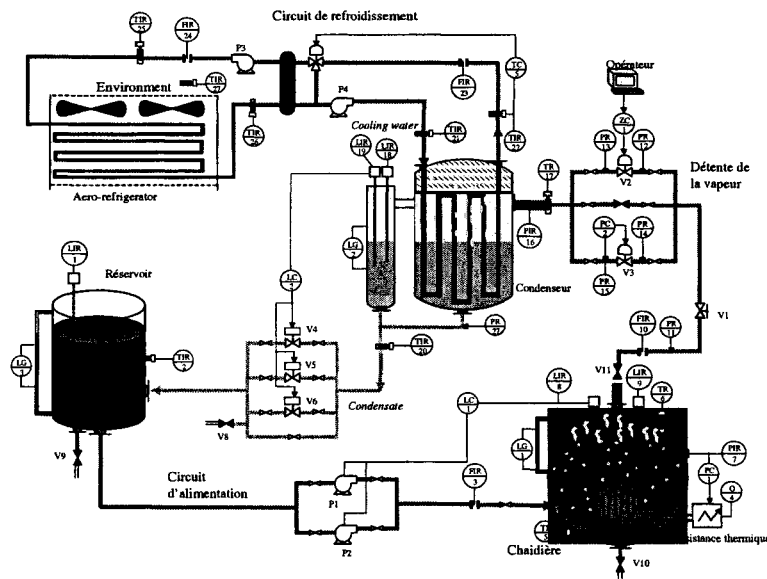


FIG. A.7 – P&IDiagramme de l'installation pilote

Le condenseur échangeur de chaleur est un système complexe. La vapeur d'eau arrivant du poste de détente de l'installation et passant dans le condenseur est condensée par contact avec les serpentins verticaux du circuit de refroidissement dans lequel circule l'eau froide. La température de cette eau est régulée à 35 °C et est considérée alors constante. Ce changement de phase de la vapeur s'accompagne de la libération de sa chaleur latente de vaporisation et le liquide est refroidi à une température inférieure à une température de saturation. Le liquide mouille la surface des tubes froids et forme ainsi un film continu de condensât qui s'écoule vers le bas sous l'effet de la pesanteur. Les tubes sont divisés en trois sections : à l'entrée du condenseur au contact de la vapeur, dans le liquide du condensât et enfin de nouveau au contact de la vapeur à la sortie du condenseur. On considère que le condenseur est parfaitement calorifugé, que les paramètres sont localisés et que la vapeur dans le condenseur est à saturation. Le modèle bond graph déduit (fig. A.8) permet de mettre en évidence dix variables d'état : les énergies thermiques et hydrauliques accumulées par la partie vapeur par la partie condensât (modélisés par deux multiports C_V et C_L), les températures moyennes sur les tubes dans les trois sections (modélisés par trois éléments C simple C_{ti}). Dans le circuit de refroidissement (divisé en trois sections) on ne considère que le stockage de l'énergie thermique (trois éléments C_{si}). L'élément Hexa (Heat Exchanger) est le composant échangeur de chaleur modélisé par un élément C (stockage de l'énergie thermique des murs) mis entre deux éléments R (échange de chaleur du côté chaud R_{vti} vers les tubes et des tubes vers le côté froid R_{tic}).

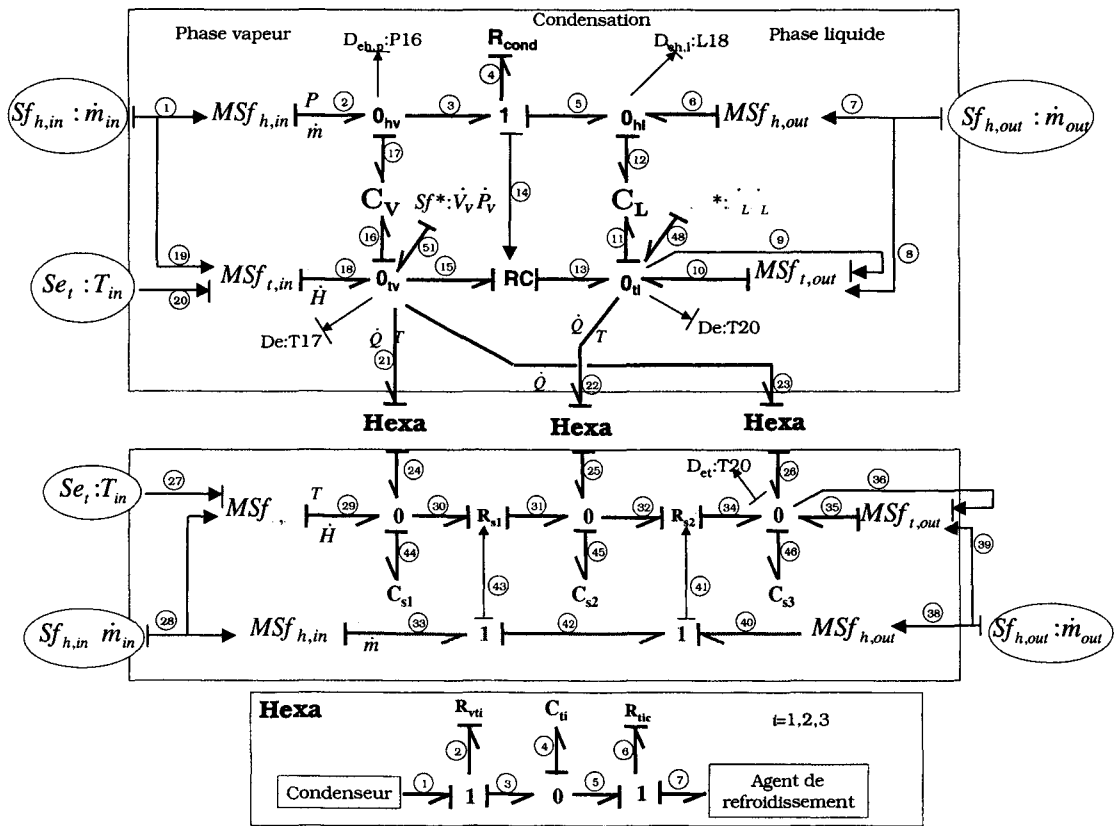


FIG. A.8 – Modèle bond graph du condenseur pour la génération des RRAs

A.2.2 Modèle architectural

On ne considère pas dans cette partie le processus du circuit de refroidissement. La température à l'entrée du condenseur (côté circuit de refroidissement) est considéré fixe. Sur la base du P&ID diagramme (fig. A.7) est construit le modèle architectural par l'utilisateur A.9. Le modèle dynamique peut aussi être généré.

A.2.3 Génération des RRAs

Vingt trois RRAs sont générés (fig. A.10). Les RRAs (20-23) sont des relations de redondance matérielles. En effet, à titre d'exemple la perte de charge entre les positions du capteur P16 et P13 est négligeable : ces deux capteurs sont alors redondants. Les RRAs 1, 10 et 17 concernent la chaudière. Les RRAs 4, 5 et 19 sont générés du modèle bond graph du condenseur. Les RRAs 7 et 16 sont générés à partir du modèle de la partie détente. Les RRAs 8 et 9 sont sensibles aux défaillances des actionneurs, elles sont déduites des relations de contrainte des sources contrôlées : la pompe et le thermoplongeur. Les RRAs 3 et 11 sont sensibles aux fautes affectant le réservoir. Enfin les autres RRAs sont sensibles aux défaillances régulateurs.

Dans les expressions des RRAs, les fonction $hl(P7)$, $vl(P7)$, $hs(P7)$, $vs(P7)$ sont des fonctions polynomiales thermodynamiques de la pression $P7$, des enthalpies spécifiques h et des volumes massiques ν du liquide et de la vapeur. Elles sont déterminées à partir des tables thermodynamiques introduites dans la base de données. "Pow" est la fonction de la caractéristique de la pompe donnée par le constructeur. "Eqpc" est la fonction de la caractéristique des vannes de réglage égal pourcentage.

```

Arr1=-ddt(L8*hl(P7)/vl(P7)+(Boiler_Vb-L8)*hs(P7)/vs(P7)-P7*Boiler_Vb+Boiler_Mt+Boiler_Cpa*P2T(P7))+T2*Cp*F3+Q4
-hs(T2*P(T6))*F10-(T6-T0)/Boiler_HCoeff
Arr2=a02-On_Off(L8,OnOff2_State,OnOff2_Min,OnOff2_Max)
Arr3=V6_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a05)+V4_Cd*sign(P16+Rho*g*L19
-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a03)+V5_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16
+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a04)-Tank_C2*ddt(Rho*g*L1)-F3
Arr4=ddt((Cond_Vc-L19*Cond_Area)/vs(P16)+L19*Cond_Area*Rho)+V2_Cd*sign(P12-P16)*sqrt(fabs(P12-P16))*aU2
+V3_Cd*sign(P12-P16)*sqrt(fabs(P12-P16))*Eqpc(aPI,Con1_x)-V6_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16
+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a05)-V4_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19
-Rho*g*L1))*sqrt(a03)-V5_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a04)
Arr5=ddt((Cond_Vc-L19*Cond_Area)*hs(P16)+vs(P16)+L19*Cond_Area*Rho*Cp*T20-P16*Cond_Vc+Cond_Mt+Cond_Cpa*P2T(P16))
+hs(P12)*V3_Cd*sign(P12-P16)*sqrt(fabs(P12-P16))*Eqpc(aPI,Con1_r)+hs(P12)*V2_Cd*sign(P12-P16)*sqrt(fabs(P12
-P16))*aU2-T20*Cp*V5_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a04)
-T20*Cp*V4_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a03)-T20*Cp*V6_Cd*sign(P16
+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a05)-F23*(T22-Cond_TcIn)*Cp
Arr6=a04-On_Off(L19,OnOff4_State,OnOff4_Min,OnOff4_Max)
Arr7=-V2_Cd*sign(P12-P16)*sqrt(fabs(P12-P16))*aU2+F10-V3_Cd*sign(P12-P16)*sqrt(fabs(P12-P16))*Eqpc(aPI,Con1_r)
Arr8=Rho*g*L1-P7-g/vl(P7)*Boiler_V2L(L8)-sign(F3)/pow(V7_Cd,2)/aU3-(-pow((F3-Pump_K2)/Pump_K1,1/Pump_n)
+Rho*g*Pump_dZ)/aO2
Arr9=Q4-Heater_Power*aO1
Arr10=F10-ddt(L8/vl(P7)+(Boiler_Vb-L8)/vs(P7))+F3
Arr11=T20*Cp*V5_Cd*sign(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a04)+T20*Cp*V4_Cd*sign(P16
+Rho*g*L19-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a03)+T20*Cp*V6_Cd*sign(P16+Rho*g*L19
-Rho*g*L1)*sqrt(fabs(P16+Rho*g*L19-Rho*g*L1))*sqrt(a05)-T20*Cp*F3-Tank_C1*ddt(Rho*g*L1)
-Tank_C1*Rho*g*L1*ddt(T2)
Arr12=a01-On_Off(P7,OnOff1_State,OnOff1_Min,OnOff1_Max)
Arr13=a03-On_Off(L19,OnOff3_State,OnOff3_Min,OnOff3_Max)
Arr14=a05-On_Off(L19,OnOff5_State,OnOff5_Min,OnOff5_Max)
Arr15=aPI-P1_Kp*(Famt-P16)-PI_Ki*intg(Famt-P16)
Arr16=F10-V1_Cd*sign(P7-P12)*sqrt(fabs(P7-P12))*aU1
Arr17=T6-P2T(P7)
Arr18=T17-P2T(P16)
Arr19=P16+Rho*g*L19-P27
Arr20=P16-P13
Arr21=P16-P15
Arr22=P12-P14
Arr23=P12-P11
    
```

FIG. A.10 – Affichage des RRAs de l'installation

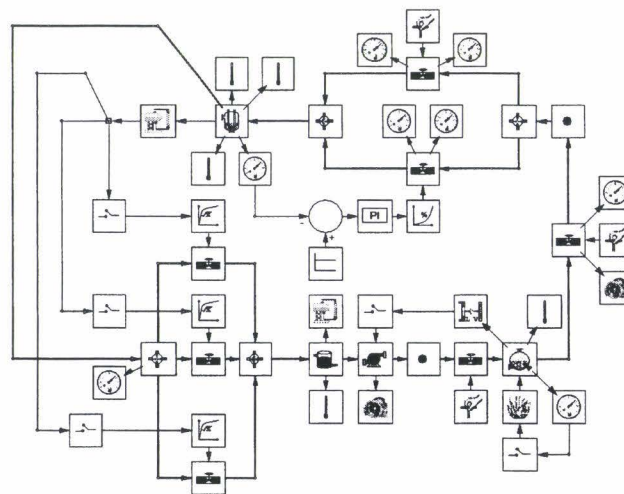


FIG. A.9 – Modèle architectural de l'installation

A.2.4 Surveillabilité de l'installation

Sur cinquante deux (52) défaillances (capteur, process, actionneur et régulateur) que le système de surveillance peut détecter, sur la matrice des signature de fautes sont spécifiées uniquement vingt et une (21) (fig. A.11).

	V _b	I _b	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23
L1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P27	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
P15	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
P14	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
F3	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puap	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tank	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Boiler	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cond	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OnOff4	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OnOff5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PI	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V6	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V4	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V5	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heater	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V2	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V3	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIG. A.11 – Génération de la table de surveillabilité de l'installation

Il apparaît sur cette table que seules les défaillances pouvant affecter les vannes de décharge (V4, V5, et V6) et les vannes de détente (V1, V2, V3), la vanne du circuit d'alimentation et la pompe ne sont pas isolables. Il est possible par exemple de rendre la vanne V6 surveillable en ajoutant un capteur de débit sur la conduite (fig. A.12a).

Les résidus générés peuvent être simulés aisément sur le logiciel en introduisant différents scénarios de défaillances (cf. [OUL 02e])

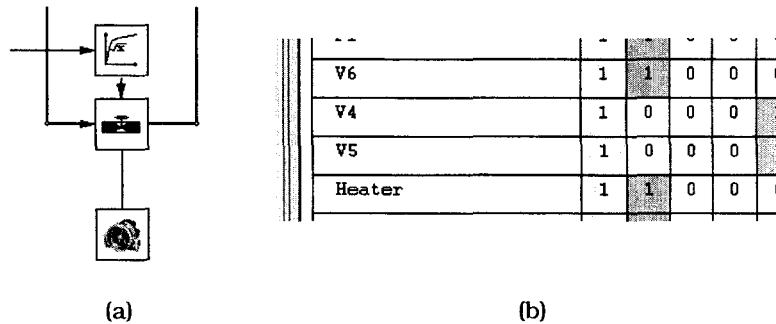


FIG. A.12 – Isolabilité de la vanne de décharge par ajout d'un capteur de débit

A.3 Conclusion

L'utilisation de l'outil bond graph pour la génération des RRAs pour un système complexe est systématique et générique, ce qui facilite son implémentation informatique. Il est possible d'analyser la surveillabilité du processus et de proposer une architecture d'instrumentation en fonction des cahier des charges fixé grâce à l'interface graphique et simple du logiciel. L'outil développé trouve aussi un intérêt dans les modèles dynamiques générés pour la simulation. Les RRAs générés seront implémentés pour la surveillance en temps réel de l'installation pilote en utilisant le logiciel de supervision "Panorama".

Bibliographie

- [AIT 99] A. AITOUCHE, F. BUSSON, B. OULD BOUAMAMA ET M. STAROSWIECKI. Multiples sensor faults detection of steam condensers. *Computers and Chemical Engineering*, pages 585–588, 1999.
- [ALB 96] J.S. ALBUS ET F.G. PROCTOR. A reference model architecture for intelligent hybrid control systems. In *IFAC 13th Triennial World Congress*, pages 483–488, San Francisco (USA), 1996. IFAC.
- [BAR 02] M. BARTYS ET S. DE LAS HERAS. Benchmark simulation model in simulink. In *3rd DAMADICS Workshop on "Robust Methods in Fault Diagnosis"*, The University of Hull (England), 2002.
- [BAY 97] M. BAYART ET E. LEMAIRE. Intelligent formal description applied to hybrid systems. In *IFAC, SICICA '97*, pages 715–720, Annecy, France., 1997. IFAC.
- [BER 91] D. BERNARDI ET M. VERBRUGGE. Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte. *AIChE journal*, 37(8):1151, august 1991.
- [BER 92] D. BERNARDI ET M. VERBRUGGE. A mathematical model of the solid polymer fuel cell. *journal of electrochemical society*, 139(9):2477, 1992.
- [BLO 96] L.J.M.J. BLOMEN ET M.V. MUGERWA. *Fuel Cell Systems*. Plenum Press, New York, 1996.
- [BRA 93] P. BRASSART ET S. SCAVARDA. Modélisation d'un élément du circuit de freinage d'une rame de métro par une approche bond-graph. In *Symposium International sur L'innovation Technologique Dans Les Transports Guidés (I.T.T.G.93)*, Lille, 28-30 sept. 1993.
- [BRE 84] P. C. BREEDVELD. *Physical Systems Theory in Terms of Bond Graphs*. PhD thesis, University of Twente. The Netherlands, 1984.
- [BRE 85] P. C. BREEDVELD. Multibond graph elements in physical systems theory. *Special issue of Journal of Franklin Institute*, 319(1/2):1–36, 1985.
- [BRE 91] P.C. BREEDVELD, R.C. ROSENBERG ET T. ZHOU. Bibliography of bond graph theory and applications. *Journal Of Franklin Institute*, 328(5/6), 1991.

- [BRI 89] L. T. BRIEGLER. Chemical process simulation. *Chemical Engineering*, pages 50–61, October 1989.
- [BRO 72] F.T. BROWN. Direct application of the loop rule to bond graphs. *Journal of Dynamics systems, measurements and control*, pages 253–261, 1972.
- [BRO 93] B.A. BROOKS ET F. E. CELLIER. Modelling of a distillation column using bond graphs. In *Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling (ICBGM'93)*, pages 315–320, 1993.
- [BRU 90] 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 édition, 1990.
- [BUS 98] F. BUSSON, A. AÏTOUCHE, B. OULD BOUAMAMA ET M. STAROSWIECKI. Sensors failures detection in steam condensers. In *3rd IFAC Workshop, on-Line-Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, volume 2, 1998.
- [BUS 00] 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.
- [BUS 02] F. BUSSON. *Modélisation et Surveillance Des Processus En Génie Des Procédés À L'aide Des Bond Graphs Multiénergies*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de lille1, Villeneuve d'Ascq (France), 10 Décembre 2002.
- [CHE 98] E. CHERIFI. *Analyse Fonctionnelle et Structurelle Des Systèmes Homme-Machine Pour la Supervision*. PhD thesis, University of Valenciennes, France, 1998.
- [CHI 93] 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.
- [CHO 84] E.Y. CHOW ET A.C. WILLSKY. Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. *IEEE, Trans. A. C.*, 29(7), 1984.
- [COX 92] D. COX, J. LITTLE ET D. O'SHEA. *Ideals, Varieties, and Algorithms, Undergraduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, 1992.
- [DAU 92] G. DAUPHIN-TANGUY, A. RAHMANI ET C. SUEUR. Formal determination of controllability/observability matrices for multivariable systems modelled by bond graph. In *International IMACS/SILE Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems'92*, pages 573–578, Kobe, japon, 1992.
- [DET 89] F. DET, S. SCAVARDA ET E. RICHARD. Modelling and simulation of a position and force control of an electropneumatic gripper with pseudo bond-graph. In *12ème Congrès Mondial IMACS*, Paris, 1989.
- [DIO 91] S. DIOP. Elimination in control theory. *Mathematical Control Signals Systems*, 4:17–32, 1991.

- [DOR 97] R. DORR, F. KRATZ, J. RAGOT, LOISY ET J.L. GERMAIN. Detection, isolation and identification of sensor faults in nuclear power plants. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(1), January 1997.
- [ELM 93] H. ELMQVIST, F. E. CELLIER ET M. OTTER. Object oriented modelling of hybrid systems. In *ESS'93 European Simulation Symposium*, The Netherlands, 1993.
- [FEE 01] J. FEENSTRA, P. J. MOSTERMAN, BISWAS G. ET P. C. BREEDVELD. Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of complex flow processes. In *Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation*, pages 77–82, Phoenix Arizona, January 2001.
- [FEL 97] C. FELIOT. *Modélisation de Systèmes Complexes : Intégration et Formalisation de Modèles*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille1, Villeneuve D'Ascq (France), 1997.
- [FRA 90] 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.
- [GHI 99] C. GHIAUS. Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. *Energy and buildings*, 30:221–232, 1999.
- [GRE 01a] 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.
- [GRE 01b] J. GREIFENEDER ET F. E. CELLIER. Modeling multi-phase systems using bond graphs. In *Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM'2001)*, pages 285–291, Phoenix, Arizona, 2001.
- [GUE 97] 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.
- [HAF 00] H. HAFFAF. *Contribution À la Résolution Des Problèmes Combinatoires Dans un Bond-Graph Par la Théorie Des Matroides*. PhD thesis, Université d'Oran, 2000.
- [HAV 96] 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.
- [HEN 00] C. HENY, D. SIMANCA ET M. DELAGADO. Pseudo-bond graph model and simulation of a continuous stirred tank reactor. *Journal of The Franklin Institute*, (337):21–42, 2000.
- [HEU 96] P.A. HEUSSER. *Modelling and Simulation of Boiling Channels with a General Front Tracking Approach*. Doctor of technical sciences, Swiss Federal Institute of technology, Zurich, 1996.

-
- [ISE 84] R. ISERMAN. Process fault detection based on modeling and estimation methods. *A Survey Automatica*, 20(4):387–404, 1984.
- [JOH 98] A. JOHANSON, W. BIRK ET A. MEDVEDEV. Model-based gas leakage detection and isolation in a pressurized system via laguerre sptectrum analysis. In *Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Control Applications*, Trieste, Italy, September 1998.
- [KAB 99] 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.
- [KAR 79] D.C. KARNOPP. State variables and pseudo-bond graphs for compressible thermo-fluid systems. *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 101(3):201–204, September 1979.
- [KAR 81] 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.
- [KAR 90a] D.C. KARNOPP. Bond graph models for electrochemical energy storage: Electrical, chemical and thermal effects. *The Franklin Institute*, 327:983–992, 1990.
- [KAR 90b] D.C. KARNOPP, D. MARGOLIS ET R. ROSENBERG. *Systems Dynamics: A Unified approach*. John Wiley, New York, second edition, 1990.
- [KEU 91] A. KEUNEKE. Device representation: The significance of functional knowledge. *IEE Expert*, 6(2):22–25, 1991.
- [KOH 93] 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.
- [KOJ 98] J. KOJ. The fault sources of pneumatic servo- motor-control valve assembly. In *III Polish National Conference on "Diagnostics of Industrial Processes"*., pages 415–419 (in polish), Jurata, Poland, 1998.
- [KON 78] M.K. KONG. A system dynamics model for performance prediction of electric vehicule batteries. Technical report, University of California, Davis, 1978.
- [LAM 99] S. LAMIRI, B. OULD BOUAMAMA ET J.P. RICHARD. Modelling of a steam generator using distributed parameter equations. In *3rd World Multiconference on Circuits, Systems, Communications and Computers, CSC'99*, pages 217–222, Athens, Greece, 1999. IMACS, IEEE, CSCC'99.
- [LAM 00] S. LAMIRI. *Modélisation de Procèdes de Génération de Vapeur En Dimension Finie et Infinie*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de lille1, Villeneuve d'Ascq (France), november 2000.

- [LAM 01] S. LAMIRI, B. OULD BOUAMAMA ET J.P. RICHARD. Modélisation d'un générateur de vapeur par équations à paramètres distribués. . *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 35(3):239–263, 2001.
- [LEE 96] 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.
- [LEF 85] J. LEFÈVRE ET J. BARRETO. A mixed block diagram bond graph approach for biochemical models with mass action rate law kinetics. *J. of Franklin Institute*, 319(1/2):201–215, January/February 1985.
- [LIN 94a] M. LIND. Modeling goals and functions of complex industrial plants. *Applied Artificial Intelligence*, 8:258–283, 1994.
- [LIN 94b] D. LINKENS ET A. WANG. Fault diagnosis based on a qualitative bond graph model, with emphasis on fault localisation. In *International Conference on Control'94*, volume 2, pages 1329–1334, 1994.
- [LIN 95] D. LINKENS ET H. WANG. Qualitative bond graph reasoning in control engineering. ii. fault diagnosis. *ICBGM'95, Proceedings of the 1995 Western Multiconference*, pages 189–194, 1995.
- [LIT 99] R. LITWAK, B. OULD BOUAMAMA ET M. STAROSWIECKI. Modélisation et surveillance d'un générateur de vapeur. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 33(5-6):611–650, 1999.
- [LUC 93] 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.
- [MAF 98] C. MAFFEZZONI, L. FERRARINI ET E. CARPANZANO. Object-oriented models for advanced automation engineering. In *Symposium on Information Control in Manufacturing, INCOM'98*, volume 1, pages 21–31, Nancy (France), 1998.
- [MAG 94] 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.
- [MAR 91] 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.
- [MIL 88] P. MILLOT. *Supervision Des Procédés Automatisés et Ergonomie*. Editions Hermes, Paris, 1988.
- [MOK 97] 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.

-
- [MOR 96] MORROW. Cadmium takes on a greener hue. *Batteries international*, 29, octobre 1996.
- [MOS 00] 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.
- [MOY 99] A. MOYSE, L. JOURDA, J. M. LE-LANN ET X. JOULIA. Process, hydraulic and control devices in odysseo, an object-oriented framework for process dynamic simulation. Montpellier, 5-7 October 1999.
- [MUK 00] A. MUKHERJEE ET R. KARMAKAR. *Modelling and Simulation of Engineering Systems Through Bond Graphs*. Alpha Sciences International, Pangbourne, UK, 2000.
- [MUK 01] 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.
- [NAH 64] A. N. NAHAVANDI ET R. F. VON ROLLEN. A space dependant dynamic analysis of a bwr. *Nuclear Science Engeneering*, 20:392–413, 1964.
- [NGU 93] T. NGUYEN ET R. WHITE. Awater and heat management model for proton exchange membrane fuel cells. *journal of electrochemical society*, 140(8):2178, 1993.
- [NIE 02] C. NIESNER. *Modélisation et Simulation D'un Générateur Électrique Utilisant Une Pile À Combustible À L'aide de L'outil Bond Graph*. Dea, Université des Sciences et technologies de Lille1, LAIL UMRCNRS8021, Villeneuve d'Ascq (France), 2002.
- [OST 73] G. OSTER ET A. PERELSON. Network thermodynamics: Dynamic modeling of biophysical systems. *Quarterly Reviews of Biophysics*, 6(1):1–134, 1973.
- [OUL 87] B. OULD BOUAMAMA. *Commande Optimale Du Procédé de Production de Soufre Par la Méthode de Claus Dans Le But de Diminuer Le Taux de Pollution*. PhD thesis, Académie pétrole et gaz "Goubkine", Russie, Moscou, 1987.
- [OUL 92] B. OULD BOUAMAMA. Modélisation et commande optimale des procédés chimiques catalytiques d'oxydation du soufre en vue de minimiser le taux de pollution. In *Séminaire International En Modélisation et Outils d'Aide à la Décision (MOAD'92)*, pages 259–266, Bédjaia, Algérie, 1992.
- [OUL 93] B. OULD BOUAMAMA, M. DJALLAL ET M. ZELMAT. Identification, modélisation et commande du procédé de production de détergents. Rapport de contrat, Projet de recherche industriel N°J3520/02/01/93, Boumerdes, Algérie, 1993.
- [OUL 96a] 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.

- [OUL 96b] B. OULD BOUAMAMA ET G. DAUPHIN-TANGUY. Modèle bond graph d'un accumulateur de vapeur. In *Colloque Automatique Génie Informatique Image E3I, AGI'96*, pages 83–86, Tours, France, Juin 1996.
- [OUL 97a] B. OULD BOUAMAMA ET J.P. CASSAR. Modélisation par graphes de liaisons en génie des procédés. In *Congrès Français de Génie Des Procédés*, volume 11, pages 193–198, Paris, 1997.
- [OUL 97b] 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.
- [OUL 98a] B. OULD BOUAMAMA, R. LITWAK ET M. STAROSWIECKI. Detection and isolation of process faults in an industrial boiler. In *3rd IFAC Workshop, on-Line-Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, volume 1. IFAC, 1998.
- [OUL 98b] B. OULD BOUAMAMA ET A. NAKRACHI. Bond graph model of pervaporation process. In *IEEE-SMC, IMACS Multiconference, Symposium on Modelling Analysis and Control CESA '98*, volume 1, pages 547–551, Nabeul-Hammamet, Tunisia, 1998. IMACS.
- [OUL 00a] 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.
- [OUL 00b] B. OULD BOUAMAMA ET J. PH. CASSAR. Integrated bond graph modelling in process engineering linked with economic system. In *ESM'2000, 14th European Simulation Multiconference*, pages 23–26, Ghent, Belgium, May 2000. ESM.
- [OUL 00c] B. OULD BOUAMAMA, G. DAUPHIN-TANGUY, M. STAROSWIECKI ET D. AMO-BRAVO. Bond graph analysis of structural FDI properties in mechatronic systems. In *1st IFAC Conference on Mechatronic Systems*, volume 3, pages 1057–1062, Darmsdadt, Germany, 18-20 september 2000. IFAC.
- [OUL 00d] B. OULD BOUAMAMA, M. STAROSWIECKI ET R. LITWAK. *Automatique et Statistiques Pour Le Diagnostic Sous la Direction de B. Dubuisson*. Paris, France, hermes edition, 2000.
- [OUL 00e] B. OULD BOUAMAMA, M. STAROSWIECKI, B. RIERA ET E. CHERIFI. Multimodelling of industrial steam generator. *Control Engineering Practice (CEP)*, 8/11:1249–1260, 2000.
- [OUL 00f] B. OULD-BOUAMAMA ET J.U. THOMA. *Les Bond Graphs, Sous la Direction de G. Dauphin-Tanguy*. Systèmes Automatisés. Paris, France, hermes edition, 2000.

-
- [OUL 01a] B OULD BOUAMAMA. Model builder for thermo-fluid systems using a bond graph and functional modelling. In *Proceedings of 13th European Simulation Symposium, ESS01*, pages 822–826, Marseille, France, October, 18-20 2001. ESS'01.
- [OUL 01b] B. OULD BOUAMAMA, A.L. GEHIN ET M. STAROSWIECKI. Alarm filtering by component modelling and bond graph approach. In *Proceedings of 4th IFAC Workshop on "on-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, pages 198–203, Jeju Island, South Korea, June 7-8 2001. IFAC.
- [OUL 01c] B. OULD-BOUAMAMA, M. STAROSWIECKI ET G. DAUPHIN-TANGUY. Actuator fault detection using bond graph approach. In *Proceedings of European Control Conference (ECC'2001)*, pages 2735–2740, Porto, Portugal, september 2001. IFAC, IEEE.
- [OUL 01d] B. OULD-BOUAMAMA, M. STAROSWIECKI, G. DAUPHIN-TANGUY, A. KHELASSI, A. BENHALLA ET M. ZELMAT. Monitoring ability analysis using bond graph approach. application to distillation column. In *Proceedings of 4th IFAC Workshop on "on-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries*, pages 388–393, Jeju Island, South Korea, June 7-8 2001. IFAC.
- [OUL 02a] 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.
- [OUL 02b] 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.
- [OUL 02c] B. OULD BOUAMAMA, M. BAYART, J. QUEVEDO, S. DE LAS HERAS ET K. MEDJAHER. Bond graph and external modeling for FDI design of smart actuators. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Hammamet Tunisia, 2002.
- [OUL 02d] B. OULD BOUAMAMA, G. DAUPHIN-TANGUY ET M. STAROSWIECKI. Intégration des modèles externes et bond graphs pour la supervision des processus en génie des procédés. In *Journées d'Etudes de Diffusion Technologique. Instrumentation et Traitement Du Signal et Des Images, Dans Les Procédés Agroalimentaires et Biotechnologiques*, Ecole centrale de Nantes, 2002.
- [OUL 02e] B. OULD BOUAMAMA, M. STAROSWIECKI, G. DAUPHIN-TANGUY ET A.K. SAMANTARY. Model builder using functional and bond graph tools for FDI design. *submitted to Control Engineering Practice (CEP) journal*, 2002.
- [PAY 61] H.M. PAYNTER. *Analysis and design of Engineering Systems*. M.I.T. Press, 1961.
- [PEN 97] Y. PENG, A. YOUSOUF, P. ARTE ET M. KINNAERT. A complete procedure for residual generation and evaluation with application to a heat exchanger. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(6), November 1997.

- [PET 73] J.F. PETETROT. *Modélisation d'un générateur de vapeur d'une centrale nucléaire*. Thèse de doctorat, Université de Paris XI, Orsay, 1973.
- [PHI 01] A. PHILIPPUS. Temporal causal graph. 2001.
- [POT 77] J.E. POTTER ET M.C. SUMAN. Tresholdless redundancy management with array of skewed instruments. *Electronic Flight Control Systems*, 224:15–25, 1977.
- [RAD 86] V.V. RADKEVITCH, N.I. DOUDKIN ET B. OULD BOUAMAMA. Méthodes d'optimisation du procédé d'obtention de l'élément soufre à l'aide de calculateurs numériques (en russe). *Gazovaya Promichlenost: Seria Avtomatisasia i telemecanisasia. Industrie gazière - série: Automatisation et télémechanisation*, page 36 p., 1986.
- [RIC 62] J. RICARD. *Equipement thermique des usines génératrices d'énergie électrique*. Dunod, 1962.
- [RIM 95] S. RIMAU. *Etude Des Propriétés Structurelles de Certaines Classes de Systèmes Physiques Non Linéaires Modélisés Par Bond Graph*. Thèse de doctorat, Université de Lille, France, 1995.
- [RIM 96] S. RIMAU, 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.
- [RIM 97] S. RIMAU, B. OULD BOUAMAMA ET G. DAUPHIN-TANGUY. Modélisation par bond graph des phénomènes gonflement-tassement dans un générateur de vapeur d'une centrale nucléaire REP. Rapport de contrat, Contrat n° : P33/2M3502/EP732, Villeneuve d'Ascq, France, Mars 1997.
- [ROB 93] M. ROBERT. *Capteurs Intelligents et Méthodologie d'Evaluation*. Hermes, Paris, France, 1993.
- [SCA 00] S. SCAVARDA. *Les Bond Graphs*, chapter Systèmes hydrauliques et pneumatiques. Hermes, Paris, France, 2000.
- [SEI 56] A. SEIDENBERG. An elimination theory for differential algebra. *University of California, Publication Mathematics*. 3:31–65, 1956.
- [SIM 97] SIMULINK. *Dynamic System Simulation for Matlab*. Math Works, France, 1997.
- [SPR 91] T.E. SPRINGER, T.A. ZAWODZINSKI ET S. GOTTESFELD. Polymer electrolyte fuel cell model. *journal of electrochemical society*, 138(8):2334–2342, 1991.
- [SPR 93] T.E. SPRINGER, M.S. WILSON, F. GARZON, T.A. ZAWODZINSKI ET S. GOTTESFELD. Polymer electrolyte fuel cells for transportation applications, 1993. Ab. of the spring meeting of the electrochem soc Hawaii.
- [STA 64] G. STANDART. The mass, momentum and energy equations for heterogeneous flow systems. *Chemical Ingeneering Science*, 19(3):227–236, 1964.

-
- [STA 96] M. STAROSWIECKI ET M. BAYART. Models and languages for the interoperability of smart instruments. *Automatica*, 32(6):859–873, 1996.
- [STA 01] M. STAROSWIECKI ET G. CONTET-VERGA. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37:687–699, 2001.
- [TAG 95a] 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.
- [TAG 95b] 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.
- [THO 75] J.U. THOMA. *Introduction to Bond Graphs and their Applications*. Pergamon Press, 1975.
- [THO 77] J. THOMA ET H. ATLAN. Network thermodynamics with entropy stripping. *J. of Franklin Institute*, 303(4):319–328, 1977.
- [THO 90] J.U. THOMA. *Simulation by Bondgraphs. Introduction to a Graphical Method*. Springer -verlag, Berlin Heidelberg, 1990.
- [THO 00] J. U THOMA ET B. OULD BOUAMAMA. *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach*. Springer Verlag, 2000.
- [TYL 83] L. TYLEE. Pseudo bond graph representation of PWR pressurised dynamic. *Trans. ASME J. Daic Sys. Measure Control*, 105:255–261, 1983.
- [VER 68] P. VERNIER ET J. M. DELHAY. Equations générales des écoulements diphasiques appliquées à la thermohydrodynamique des réacteurs nucléaires à eau bouillante. Acte Technique E. P. E. IV, Belgique, 1968.
- [VER 94] 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.
- [WAN 96] H. WANG ET D. LINKENS. Intelligent supervisory control. *World scientific series in Robotics and intelligent Systems*, 14, 1996.
- [WES 85] L. T. WESTERBERG ET B. R. BENJAMIN. Thoughts on a future equation-oriented flowsheeting system. *Computers and chemical Engineering*, 9(5):517–526, 1985.
- [WOL 96] C. WOLLHAF, K. SCHULTZ ET S. ENGELL. BaSiP-batch process simulation with dynamically reconfigured process dynamics. *Computer and Chemical Engineering supplement*, pages 1281–1286, 1996.
- [ZEL 92] M. ZELMAT ET B. OULD BOUAMAMA. Approche sur la modélisation d'un système a paramètres distribués par un modèle à paramètres localisés. In *Séminaire En Signaux, Systèmes et Automatismes (SAA '92)*, volume 1, pages 342–351, Blida (Algérie), 1992.

Troisième partie

**PUBLICATIONS
SELECTIONNEES**

Publications sélectionnées

1 Thème 1 : Modélisation par bond graph

1. [OUL00_OC] **Ould Bouamama B.** et Thoma J.U. (2001). *Les Bond Graphs sous la direction de Geneviève Dauphin-Tanguy. Chap. 6 : Procédés thermodynamiques et chimiques.* pp. 236-277, Collection IC2 Systèmes Automatisés Informatique Commande et Communication, Edition Hermes, 383 pages, Paris 2000.
2. [LAM01_RI] Lamiri S., **B. Ould Bouamama** et J. P. Richard (2001). *Modélisation d'un générateur de vapeur par équations à paramètres distribués.* Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 35, N° 3/2001, pp. 239-263, 2001.

2 Thème 2 : Surveillance

– Méthode de surveillance à l'aide du modèle bond graph mono-énergie

1. [OUL00c_CI] **Ould Bouamama B.**, G. Dauphin-Tanguy, M. Staroswiecki et D. Del Amo Bravo (2000). *Bond Graph Analysis of Structural FDI Properties in Mechatronics System*, 1st IFAC Conference Mechatronic System, pp. 1057-1062, Vol. 3, Dusseldorf, Septembre 2000.

– Propriétés structurelles d'un modèle bond graph multiénergies couplées

2. [OUL00a_CI] **Ould Bouamama B.**, F. Busson, G. Dauphin-Tanguy et M. Staroswiecki (2000). *Analysis of a structural properties of thermodynamics Systems.* SAFEPROCESS. 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, pp. 1068-1073, Vol.2, Budapest, 14-16 juin 2000.

– Intéragtion des modèles fonctionnels et bond graph

3. [OUL00_RI] **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki, B. Riera et E. Cherifi (2000). *Multi-Modelling of Industrial steam Generator.* Control Engineering Practice, CEP, Vol. 8, N° 11, pp. 1249-1260, 2000.

- **Conception d'un générateur de modèles et de RRAs à partir d'un modèle bond graph multiénergies couplées**
- 4. [OUL02b_RI] **B. Ould Bouamama**, M. Staroswiecki, K. G. Dauphin-Tanguy, A.K. Samantary (2002). *Model builder using Functional and bond graph tools for FDI design (soumise à CEP)*, (en review).

Chapitre 6

Procédés thermodynamiques et chimiques

6.1. Intérêt des Bond Graphs en génie des procédés

La modélisation des systèmes thermiques, thermodynamiques ou tout simplement en génie des procédés reste encore un domaine ouvert en raison de la complexité de ces phénomènes. Ce sont pourtant ces types de processus, présents dans les industries à risque qui nécessitent pour leur connaissance et leur contrôle des modèles de plus en plus précis et exploitables. Bien plus, si les vieilles techniques de la régulation classique restent encore très utilisées dans des industries aussi complexes que le nucléaire par exemple, c'est parce qu'on est encore incapable de produire des modèles précis nécessaires à l'application de commandes avancées.

Ces procédés industriels possèdent un comportement fortement non linéaire dû principalement à l'interaction mutuelle de plusieurs phénomènes de natures diverses et l'association de composants technologiques qui mettent en œuvre des lois issues de disciplines différentes (mécanique, thermique, chimique...). Le comportement dynamique de ce type de système est décrit généralement par des équations différentielles ou algèbro-différentielles non linéaires. Leur mise en équations par les méthodes classiques et la déduction des variables d'état est compliquée. Leur modélisation nécessite en conséquence une approche unifiée et capable de mettre en évidence la nature physique et la localisation des variables d'état.

L'application de cette approche unifiée pour la modélisation en génie des procédés est justifiée principalement par le fait que, par opposition à la modélisation de connaissance classique, on peut affiner le modèle en ajoutant ou en supprimant des

éléments bond graph en fonction des hypothèses simplificatrices. Cette propriété est particulièrement importante, car les processus chimiques et thermodynamiques sont en réalité non stationnaires : les coefficients d'échange de chaleur, les constantes de vitesse des réactions et la conductibilité thermique des conduites varient en fonction du régime technologique (encrassement, vieillissement du catalyseur etc.). Pour adapter le modèle, il suffit alors simplement d'ajouter par exemple des éléments dissipatifs R pour les phénomènes de transfert thermique ou de résistance hydraulique, des éléments C pour la compressibilité des fluides, pour les capacités thermiques des parois et pour le stockage de masse et de volume et des éléments I pour tout apparition de phénomènes d'inertie.

6.2. Variables de puissance en génie des procédés

6.2.1. Représentation par bond graph à multiliens

Nous avons noté que les processus technologiques en génie des procédés sont caractérisés par l'interaction des phénomènes thermiques, hydrauliques et chimiques. Ces trois formes de puissances sont couplées. Elles seront représentées par un lien entouré par un anneau comme indiqué sur la figure 6.1.b. Il existe aussi une autre représentation des bond graphs multidomains (*cf.* chapitre 4 du présent ouvrage) indiquée par figure 6.1.c .

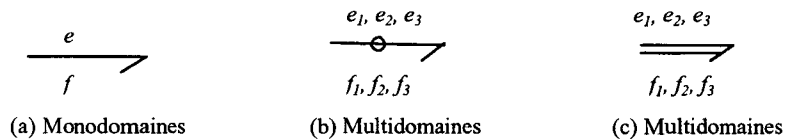


Figure 6.1. Représentation des bond graphs

Les indices 1, 2 et 3 désignent les puissances correspondantes (par exemple thermique, hydraulique et chimique) et les lettres « e » et « f » l'effort et le flux.

6.2.2. Variables de puissance en vrai et en pseudo bond graph

Les systèmes mécaniques ou électriques sont modélisés par des bond graphs dans lesquels le produit effort flux est la puissance instantanée transférée le long du lien ou à travers les ports des composants du système. Ces bond graphs sont appelés « vrais » bond graphs.

En génie des procédés, l'utilisation de « vrais »bond graphs introduit des variables d'effort thermique et chimique (entropie, potentiel chimique) de nature complexe et mal adaptées aux problèmes de simulation, car ils n'obéissent pas à des lois de conservation simples. On introduit alors pour leur modélisation un pseudo bond graph pour lequel le produit des variables d'effort et de flux n'a plus la dimension d'une puissance [KAR 79]. Toutefois, il faut noter que les propriétés classiques d'un vrai bond graph restent valables pour un pseudo bond graph (causalité, mise en équation ...).

Sur le tableau 6.1 sont représentées les variables de puissance en vrai et en pseudo bond graph utilisées en génie des procédés.

Domaine	Vrai bond graph		Pseudo bond graph	
	Effort (e)	Flux (f)	Effort (e)	Flux (f)
Chimique (transformation)	Potentiel chimique μ [J/mole]	Flux molaire \dot{n} [mole/s]	Concentration C [mole/m ³]	Flux molaire \dot{n} [mole/s]
Chimique (Cinétique)	Affinité chimique A [J/mole]	Vitesse de la réaction $\dot{\xi}$ [mole/s]	-	-
Hydraulique	Pression P [Pa]	Débit volumique \dot{V} [m ³ /s]	Pression P (Pa)	Débit massique \dot{m} [kg/s]
Thermique	Température T [°K]	Flux d'entropie \dot{S} [J/°K.s]	Température T (°c) ou enthalpie spécifique h [J/kg]	Flux thermique \dot{H} ou \dot{Q} [W]

Tableau 6.1. Variables de puissance en génie des procédés

Afin de distinguer les différents types de puissance, nous désignerons dans la suite de l'ouvrage par \dot{H} le flux d'enthalpie transporté par convection en watt (W), par \dot{Q} le flux thermique transmis par conduction (W) et par \dot{E} toute autre forme de puissance (électrique, mécanique ...)

Les symboles de l'ensemble des variables utilisées ainsi que leurs unités sont donnés à la fin de ce chapitre

6.3. Bond graph des systèmes thermiques

6.3.1. Phénomène de conduction

Dans le cas de la modélisation de la matière au repos (problème de conduction) qu'on rencontre en général dans les échangeurs de chaleur, dans les fours, dans les pertes thermiques à travers les parois etc., on peut utiliser aussi bien la paire température-flux d'entropie (T, \dot{S}) pour constituer un vrai bond graph que la paire température-flux thermique (T, \dot{Q}) pour un pseudo bond graph. L'utilisation de cette dernière est toutefois plus commode pour la modélisation du phénomène de conduction de chaleur (voir figure 6.2).

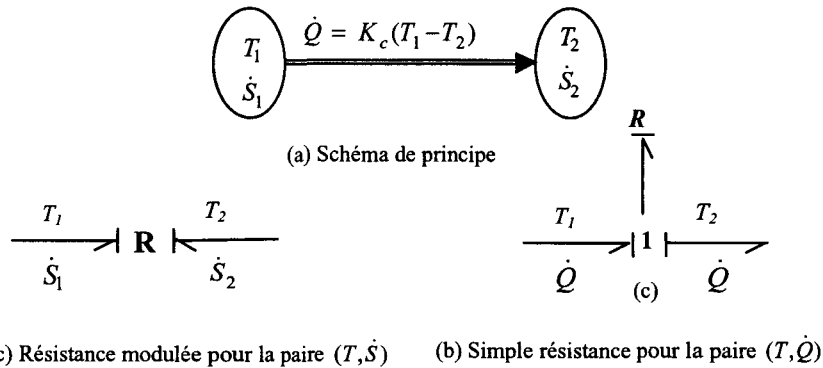


Figure 6.2. Choix des variables de puissance pour le phénomène de conduction

En effet, le flux de chaleur échangé entre deux corps (fig.6.2.a) est décrit par une simple équation constitutive en pseudo bond graph (analogue à la loi d'ohm en électricité) :

$$\dot{Q} = K_c(T_1 - T_2) \quad [6.1]$$

ce qui se représente facilement figure 6.2.b. Par contre, l'utilisation du flux d'entropie conduit à écrire les lois sous forme non linéaire (équation [6.2]) couplée (les deux variables \dot{S}_1 et \dot{S}_2 s'expriment en fonction des deux efforts T_1 et T_2 ce qui nécessite l'utilisation d'un élément R à deux ports comme le montre la figure 6.2.c.

L'expression des flux d'entropie est déduite de l'équation de Carnot :

$$\dot{S}_1 = \frac{\dot{Q}}{T_1} = \frac{K_c(T_1 - T_2)}{T_1}, \quad \dot{S}_2 = \frac{\dot{Q}}{T_2} = \frac{K_c(T_1 - T_2)}{T_2} \quad [6.2]$$

6.3.2. Application : modélisation par bond graph d'un système thermique

Nous allons illustrer la méthodologie de la modélisation par bond graph par un exemple simple donné par la figure 6.3.

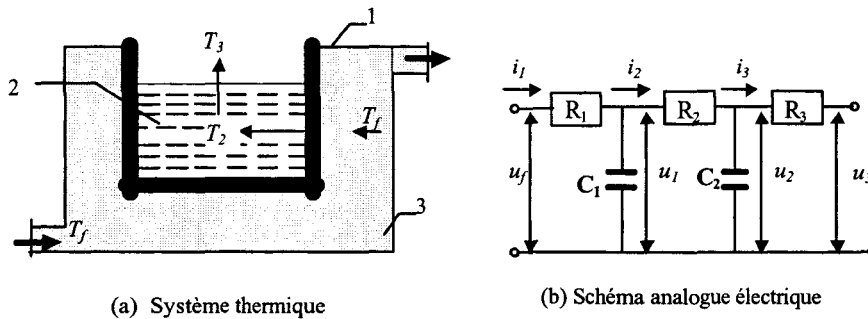


Figure 6.3. Chauffage thermique d'un bain par un fluide chaud

Le système à modéliser est un processus de chauffage thermique d'un bain d'eau 2 par échange de chaleur à travers les parois 1 du récipient métallique avec un fluide chaud 3 porté à une température T_f . Le bain 2 est au contact de la température ambiante T_3 . Le schéma analogue électrique est donné figure 6.3b où la tension u prend la place de la température et l'intensité du courant i est similaire au flux thermique. Nous allons modéliser uniquement les phénomènes thermiques.

6.3.2.1. Bond graph à mots

Le bond graph à mots représente le niveau technologique de la modélisation. Dans cette étape, on décompose le système global en sous systèmes simples comme représenté sur la figure 6.4 pour notre exemple.

A l'entrée de chaque sous système, on représente les variables de puissance, et non les signaux comme dans les schémas bloc classiques. On choisit dans notre cas, en qualité de variables de puissance, la température T pour l'effort et le flux thermique \dot{Q} pour le flux car nous sommes en présence de conduction thermique.

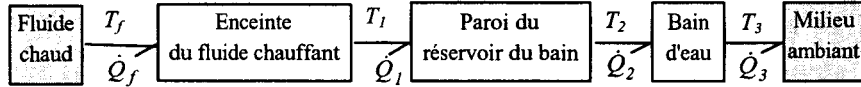


Figure 6.4. Bond graph à mots du processus thermique

Notons que nous sommes en présence de pseudo bond graph et que nous n'avons pas tenu compte de l'énergie hydraulique que nous considérons négligeable.

6.3.2.2. Modèle bond graph

Cette étape est physique, puisqu'elle nous permet de représenter graphiquement tous les phénomènes pris en considération. Nous devons en conséquence poser les hypothèses de modélisation, pour recenser les phénomènes à modéliser.

On considère que le système est à paramètres localisés (température moyenne répartie d'une façon homogène). Supposons d'abord que la capacité thermique de la paroi, que nous notons par C_1 est négligeable. Par contre, le bain d'eau possède une capacité thermique C_2 .

Le modèle bond graph est construit sur la base d'une description énergétique du processus. La source d'effort Se (température T_f) étant imposée, il y a un transfert thermique par conduction (modélisé par R_{12}) du fluide chaud T_f vers l'enceinte du bain à chauffer à travers la paroi, une partie est accumulée par la capacité thermique de l'eau (modélisé par C_2) et l'autre partie est dissipée (modélisée par R_3) vers l'environnement porté à une température ambiante T_3 . Tous ces phénomènes sont couplés par des jonctions « 0 » et « 1 ». La jonction « 0 » traduit la loi de conservation d'énergie et la jonction « 1 » met en évidence l'égalité des flux. On construit ainsi l'architecture du système par le modèle bond graph représenté sur la figure 6.5.

6.3.2.3. Affectation des causalités

Ce niveau de modélisation est algorithmique. On commence d'abord par les causalités obligatoires : elles concernent les sources d'effort - température ambiante T_3 et température du fluide T_f . On met ensuite l'élément C_2 en causalité intégrale (pour éviter de dériver en simulation). On affecte enfin, les causalités restantes à R_{12} et R_3 . On est quelquefois contraint d'ajouter des éléments (auxquels il faut donner un sens physique) pour éviter des conflits de causalité. A titre d'exemple, le lecteur s'apercevra qu'en absence de la résistance thermique R_{12} , l'élément C serait en causalité dérivée. Pour éviter cette causalité, il faudrait alors imposer une source de flux au lieu d'une source d'effort ou bien ajouter une résistance thermique et maintenir ainsi la source d'effort.

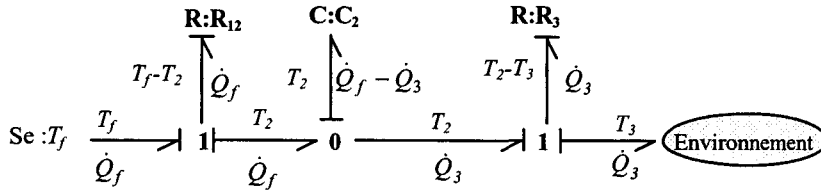


Figure 6.5. Modèle bond graph du processus en négligeant la capacité thermique de la paroi du réservoir du bain

6.3.2.4. Mise en équation mathématique

C'est le niveau mathématique de modélisation. En tenant compte des causalités imposées, on peut écrire les lois constitutives de chaque élément, supposées linéaires :

$$\begin{aligned} \text{Elément R : } f &= \frac{1}{R} \cdot e \Rightarrow \dot{Q}_f = \frac{T_f - T_2}{R_{12}}, \dot{Q}_3 = \frac{T_2 - T_3}{R_3} \\ \text{Elément C : } e &= \frac{1}{C} \int f dt \Rightarrow T_2 = \frac{1}{C_2} \int (\dot{Q}_f - \dot{Q}_3) dt \end{aligned} \quad [6.3]$$

6.3.2.5. Mise en équation d'état

Nous avons négligé l'énergie hydraulique. Nous avons donc dans notre cas un seul élément C mis en causalité intégrale, donc une seule variable d'état. La variable d'état associée à l'élément C est la quantité d'énergie thermique Q_{C2} accumulée par le réservoir. Toutefois, nous sommes en présence de pseudo bond graph, la variable d'effort, la température T_2 , est liée à celle de flux par la relation physique suivante :

$$\dot{Q}_{C2} = m_2 c_2 \dot{T}_2 = C_2 \dot{T}_2 \quad [6.4]$$

où m_2 et c_2 désignent respectivement la masse et la capacité thermique spécifique du fluide dans le réservoir (considérée constante). C_2 est la capacité thermique globale qui apparaît sur le bond graph comme paramètre pour l'élément C.

Etant donné que la quantité d'énergie thermique est directement associée à la température et que dans les systèmes de commande industrielle on utilise plutôt un capteur de température (type thermocouple), il est plus intéressant de prendre en qualité de variable d'état la température T_2 .

Nous avons deux entrées u : la température du fluide T_f et la température ambiante T_3 . On fait remarquer ici que le sens physique de la variable d'état est directement mis en évidence par le bond graph.

A partir de l'équation constitutive de l'élément C , on déduit l'équation d'état (à une seule variable d'état) linéaire de forme $\dot{x} = Ax + Bu$:

$$\dot{T}_2 = -\left(\frac{1}{R_{12}C_2} + \frac{1}{R_3C_2}\right)T_2 + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{12}C_2} & \frac{1}{R_3C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_f \\ T_3 \end{bmatrix} \quad [6.5]$$

Il est à noter que les résistances thermiques R sont égales à l'inverse du coefficient d'échange de chaleur K_c appelé conductance ($R=1/K_c$). La résistance thermique R_{12} est la somme de la résistance R_1 (transfert de chaleur fluide-paroi) et R_2 (paroi-bain).

6.3.2.6. Affinement du modèle par ajout d'éléments bond graph

Supposons que l'erreur maximale relative de modélisation ε qui est égale à la différence entre la sortie du modèle et celle du processus réel est plus grande que celle admissible ε_{ad} fixée en pratique à 5%. Nous devons alors affiner le modèle par ajout d'autres éléments. On décide donc de tenir compte de la capacité thermique de la paroi du réservoir du bain 1. Dans ce cas, la description énergétique est comme suit : Il y a un transfert thermique par conduction (modélisé par R_1) du fluide chaud T_f vers la paroi de l'enceinte du bain à chauffer, une partie est accumulée par la capacité thermique de cette paroi (modélisée par C_1) et l'autre partie est dissipée (modélisée par R_2) vers le bain. On ajoute ces deux phénomènes sur le bond graph de la figure 6.5 pour obtenir celui donné par la figure 6.6 (voir encadré).

Le système possède alors deux variables d'état qui sont associées au stockage d'énergie thermique respectivement par la paroi du réservoir et par le bain d'eau. Leur dynamique peut être aisément déduite en écrivant tout simplement les relations constitutives des deux éléments C et des trois éléments R :

$$T_1 = \frac{1}{C_1} \int (\dot{Q}_f - \dot{Q}_2) dt \quad \text{et} \quad T_2 = \frac{1}{C_2} \int (\dot{Q}_2 - \dot{Q}_3) dt \quad [6.6]$$

$$\dot{Q}_f = \frac{T_f - T_1}{R_1}, \quad \dot{Q}_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_2}, \quad \dot{Q}_3 = \frac{T_2 - T_3}{R_3}$$

d'où l'équation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1}\right) & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\left(\frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_3 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_f \\ T_3 \end{bmatrix} \quad [6.7]$$

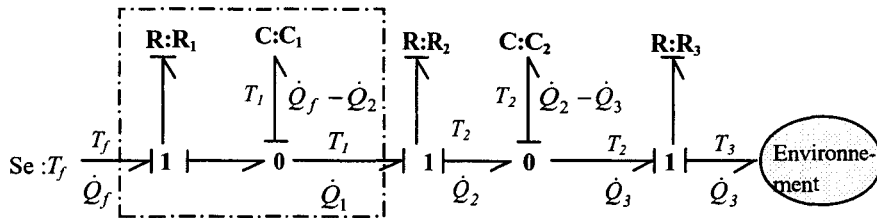


Figure 6.6. Modèle bond graph du processus affiné par simple ajout d'éléments

6.4. Bond graph des systèmes thermo fluides

6.4.1. Présentation des classes de problèmes et choix des variables de puissance

Les systèmes thermo fluides (un fluide en écoulement par exemple) sont caractérisés par un ensemble de variables, qui est pour les efforts : la pression P et la température T , et pour les flux le débit volumique \dot{V} (ou massique pour le fluide compressible) et le flux d'entropie \dot{S} . D'autres variables peuvent aussi intervenir telles que le flux d'énergie interne \dot{U} , le flux d'enthalpie \dot{H} ou la qualité X d'un mélange eau-vapeur. Le choix des variables de puissance n'est pas unique et dépend de la nature du système à modéliser.

Définissons le choix des variables de puissance pour quelques procédés types rencontrés en génie des procédés.

6.4.1.1. Phénomènes de convection

Dans un processus de convection, nous avons deux énergies couplées : hydraulique et thermique. Pour l'énergie hydraulique, on utilise en qualité de variables de puissance la paire (P, \dot{m}) car le fluide est incompressible, ce qui évite alors de tenir compte de sa densité. Concernant la variable du flux thermique, le flux d'enthalpie \dot{H}

est utilisé, puisqu'il représente la quantité d'énergie véhiculée par le fluide par unité de temps, donc de puissance. En qualité de variable d'effort thermique, on utilise soit la température T , soit l'enthalpie spécifique h en fonction du type de processus à modéliser (comme nous allons le voir plus loin).

En tenant compte que $h = c_p T$, le flux d'enthalpie totale est calculé alors par les expressions :

$$\dot{H} = \dot{m} c_p T, \quad \dot{H} = \dot{m} h \quad [6.8]$$

Il faut noter que la notion d'enthalpie spécifique est, certes d'approche intuitive plus difficile que la température, mais peut être déterminée facilement à partir des variables d'état hydraulique, (la masse) m , et d'énergie (enthalpie totale) H :

$$h = \frac{H}{m} \quad [6.9]$$

La détermination de la température nécessite par contre la connaissance de la chaleur spécifique c_p :

$$T = \frac{H}{m c_p} \quad [6.10]$$

Toutefois, cette variable est mesurable par les capteurs, donc commode pour les boucles de commande.

Comme souligné plus haut, le choix de la variable d'effort thermique dépend de l'état du fluide modélisé. Examinons pour les principaux phénomènes rencontrés en génie des procédés, le choix de la variable d'effort thermique (h ou T). Pour les variables de puissance hydraulique, on utilise toujours la paire (P, \dot{m}) car en thermofluide, les énergies étant couplées, le flux d'enthalpie est déterminé à partir du flux massique par l'expression [6.8].

En génie des procédés on rencontre principalement les états présentés dans les paragraphes suivants.

6.4.1.2. Mélange eau-vapeur

On distingue en fonction de l'état thermodynamique du mélange différents cas.

6.4.1.2.1. Fluide à température normale

Dans ce cas, nous avons intérêt à utiliser la température, en qualité de variable d'effort, car la chaleur spécifique c_p à température sous saturée est pratiquement constante et dépend faiblement de la température : celle de l'eau par exemple varie uniquement de 4,185 kJ/(kg °C) à 4,217 kJ/(kg °C) entre 15 et 100 °C à pression atmosphérique [POS 82]. La manipulation de la variable T est par rapport à l'enthalpie, plus commode pour la commande car mesurable et plus « naturelle » pour l'opérateur.

6.4.1.2.2. Mélange à température saturée

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 le titre de la vapeur dans un mélange diphasique [OUL 96] et d'utiliser ainsi en simulation les fonctions thermodynamiques.

6.4.1.2.3. Variable de flux d'un accumulateur de vapeur

Analysons le choix de la variable de flux thermique lors de la modélisation d'un accumulateur d'un mélange eau-vapeur modélisé dont le schéma de principe est donné figure 6.7.a.

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

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad [6.11]$$

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 [6.11] devient alors :

$$\dot{U} = -P\dot{V} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad [6.12]$$

Considérons deux modèles bond graph avec en qualité de variable de flux thermique respectivement le flux d'enthalpie \dot{H} et le flux d'énergie interne \dot{U} .

1. Flux d'enthalpie \dot{H} en qualité de variable de flux

Si on introduit comme variable de flux \dot{H} , le modèle bond graph multidomaine est donné par figure 6.7b. Il vient de l'équation [6.12] en remplaçant U par $H-PV$:

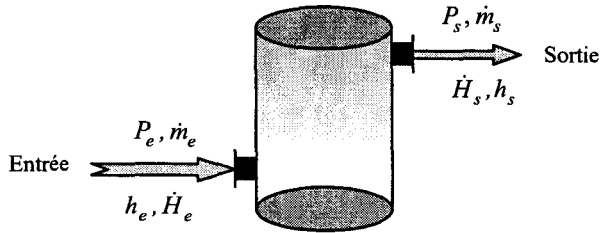
$$\dot{H} = V\dot{P} + \dot{H}_e - \dot{H}_s \quad [6.13]$$

Il apparaît sur l'équation [6.13] 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.

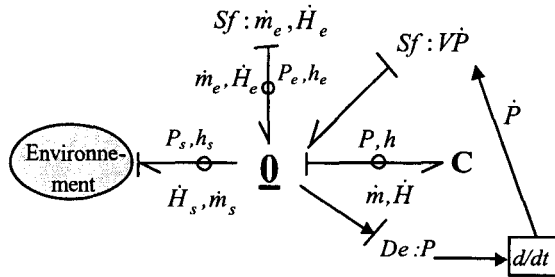
Sur le figure 6.7.b les liens entourés par un anneau représentent le couplage d'énergie thermique et hydraulique. Le modèle bond graph multidomaine (dans notre cas thermique et hydraulique) peut être éclaté en deux domaines comme indiqué sur la figure 6.7.c. La jonction « Q » du modèle couplé 6.7.b. est alors décomposé en deux jonctions « 0_1 » et « 0_2 » modélisant respectivement la conservation d'énergie hydraulique ($C:C_1$) et thermique hydraulique ($C:C_2$). Le couplage de ces deux énergies par la relation [6.8] est modélisé par un multiport R fictif. D'autres auteurs utilisent un élément R 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, dans la suite de ce chapitre, nous représenterons le modèle multidomaine avec des liens couplés.

2. Flux d'énergie interne \dot{U} comme variable de flux

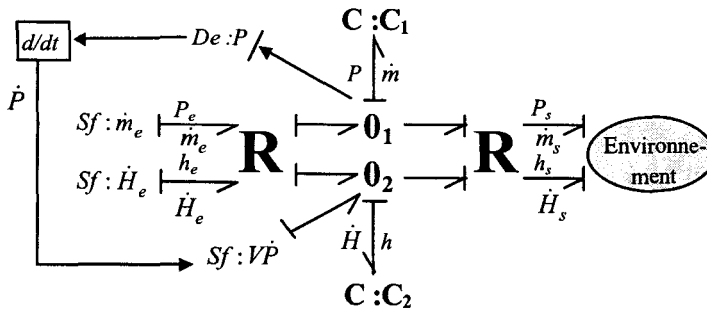
Le choix de \dot{U} comme variable de puissance fait apparaître sur le bond graph (fig. 6.8) une variable d'état qui est le volume de vapeur V , d'où la nécessité d'un lien supplémentaire (P, \dot{V}) dont la puissance hydraulique $P\dot{V}$ vient moduler cette source de flux. Ce signal est le prix à payer pour lier un pseudo à un vrai bond graph [KAR 79].



(a) Schéma de principe d'un accumulateur de vapeur



(b) Modèle bond graph avec \dot{H} comme variable de flux



(c) Transformation bond graph multidomaine en bond graph monodomaine

Figure. 6.7. Modèle bond graph d'un accumulateur avec \dot{H} comme variable de flux

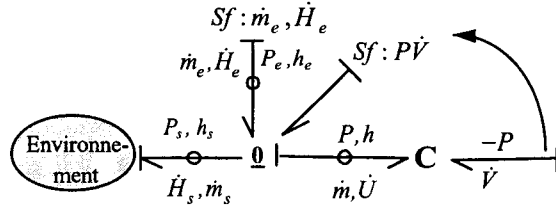


Figure. 6.8. Modèle bond graph d'un accumulateur avec \dot{U} comme variable de flux

6.4.1.2.4. Détente de la vapeur d'eau

En génie des procédés, on retrouve souvent la détente de la vapeur d'eau à travers des restrictions hydrauliques modélisées en bond graph par un multiport R (fig. 6.9a). Cette détente peut être isenthalpique (enthalpie constante), désignée par la flèche horizontale sur la figure 6.9b ou réelle (enthalpie variable) désignée par la flèche oblique sur la même figure.

– Détente isenthalpique

Dans ce cas l'enthalpie reste constante mais la pression, donc la température ainsi que le titre X varient :

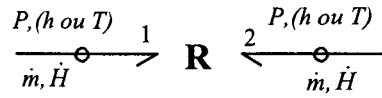
$$h_1 = h_2, \quad T_1 \neq T_2 \quad \text{et} \quad P_1 \neq P_2$$

et les flux enthalpiques et massiques restent constants :

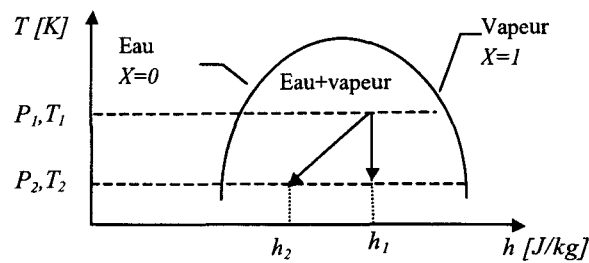
$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 = \dot{m} \\ \dot{H}_1 &= \dot{H}_2 = \dot{H} \end{aligned} \quad [6.14]$$

où l'indice 1 et 2 correspondent respectivement à amont et aval de la résistance.

Le modèle bond graph de la détente isenthalpique avec les variables de puissance est donné par la figure 6.10.



(a) Modèle bond graph



(b) Diagramme de Mollier simplifié

Figure 6.9. Détente de la vapeur à travers une restriction

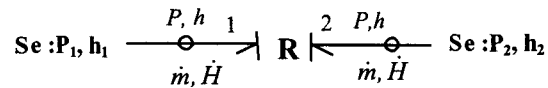


Figure 6.10. Variables de puissance dans le cas d'une détente isenthalpique

– Détente réelle

Lors de la chute enthalpique réelle (due à des pertes thermiques), nous avons pour les efforts :

$$h_1 \neq h_2, T_1 \neq T_2 \text{ et } P_1 \neq P_2$$

et pour les flux :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2, \dot{H}_1 \neq \dot{H}_2.$$

Ces phénomènes physiques sont modélisés par le bond graph de la figure 6.11. Le multiport R représente la dissipation des énergies hydrauliques et thermiques par convection dues à la restriction. Les pertes thermiques par conduction vers l'extérieur \dot{Q}_{ex} sont modélisées par un lien simple car seule l'énergie thermique est concernée.

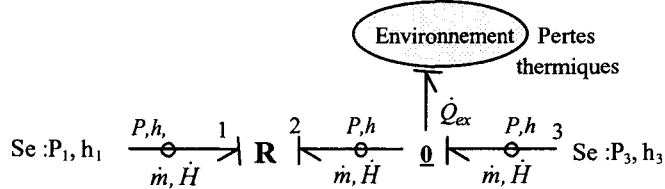


Figure 6.11. Variables de puissance pour la détente réelle

Le flux thermique en aval de la détente est calculé par l'expression :

$$\dot{H}_3 = \dot{H}_2 - \dot{Q}_{ex} = \dot{m}h_1 - \dot{Q}_{ex} \quad [6.15]$$

Pour la modélisation par bond graph d'une détente isenthalpique ou réelle, on utilise en qualité d'effort et de flux, le couple (h, \dot{H}) pour l'énergie thermique et le couple (P, \dot{m}) pour la puissance hydraulique. Les températures peuvent être calculées à tout moment en fonction des pressions puisque la vapeur est à saturation. De plus, la chaleur spécifique du fluide étant variable, l'utilisation de la température en qualité de variable d'effort ne permet pas de calculer les flux thermiques.

Ces variables de puissance permettent de calculer non seulement les flux massique et thermique mais aussi le titre par les équations du mélange diphasique.

6.4.1.2.5. Changement de phase de la vapeur

On distingue dans ce processus, l'évaporation et la condensation de la vapeur.

- Evaporation

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.

– Condensation

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 condensat. 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 [OUL 97].

6.4.1.3. *Systèmes chimiques*

Dans les systèmes chimiques on peut distinguer les variables de puissance affectées au produit chimique participant à la réaction et celles modélisant les phénomènes cinétiques de la réaction .

Concernant les produits de réaction, la variable d'effort est le potentiel chimique μ (J/mole) qui forme avec le flux molaire \dot{n} (mole/s) un vrai bond graph. En pseudo bond graph, on utilise la concentration C (mole/s) au lieu du potentiel chimique en qualité de variable d'effort et le flux molaire pour la variable de flux. Notons que dans les mêmes conditions, le potentiel chimique de l'espèce i est lié approximativement à sa concentration C_i par l'expression :

$$\mu_i = \mu_{i0} + RT \ln C_i, \text{ d'où } C_i = \frac{1}{a_i} e^{\frac{\mu_i - \mu_{i0}}{RT}} \quad [6.16]$$

où C_i est la concentration molaire et μ_{i0} , la tension chimique indépendante de la référence prise à $T = \text{constante}$.

Dans d'autres travaux, en qualité d'effort on utilise les concentrations des substances au lieu des tensions chimiques et en qualité de flux les dérivées des concentrations. Cette approche est largement utilisée [LEF 85] car elle permet de manipuler des variables plus intuitives et facilement mesurables (concentration) donc faciles à simuler.

Concernant les variables de puissance des phénomènes chimiques proprement dits, modélisés généralement par des pseudo bond graph, les variables de puissance sont : pour l'effort, l'affinité chimique partielle A_i (en J/mole) et pour le flux la vitesse de réaction $\dot{\xi}_i$ (en mole/s).

6.4.2. Eléments multiports de base en génie des procédés

6.4.2.1. Multiport R thermodynamique

Les phénomènes dissipatifs d'énergie sans génération d'entropie rencontrés usuellement dans les procédés énergétiques sont principalement provoqués par les procédés technologiques suivants : les restrictions hydrauliques (conduite, vanne, filtre, ...), changement de phase de la vapeur (évaporation, condensation), transfert thermique.etc..

Le multiport R met en œuvre des lois matricielles. Dans notre cas, nous avons quatre entrées et quatre sorties choisies en fonction des causalités affectées à cet élément. Dans le cas général, les efforts amont et aval sont imposés, et on détermine les flux thermiques \dot{H} et hydraulique \dot{m} . Cette causalité est naturelle Dans un élément résistif de type convection dans une conduite ou conduction thermique dans un échangeur, c'est le flux thermique ou massique transféré qui est la conséquence d'une variation des efforts imposés (gradient de température ou de pression). Ainsi, si on impose dans notre cas les efforts, on obtient un modèle bond graph et un schéma bloc de simulation comme représentés sur la figure 6.12.

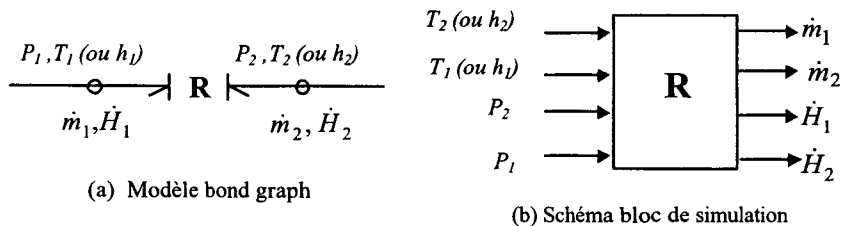


Figure 6.12. Multiport R

Si les efforts hydrauliques (les pressions) et thermiques (les températures) sont désignés respectivement par le couple (P_1, P_2) et (T_1, T_2) , la relation matricielle constitutive sera alors :

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{H}_1 \\ \dot{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{R1}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{R2}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{R3}(P_1, P_2, T_1, T_2) \\ \Phi_{R4}(P_1, P_2, T_1, T_2) \end{bmatrix} \quad [6.17]$$

Les relations Φ_{Ri} ($i=1, 4$) sont non linéaires et dépendent évidemment de la nature physique du phénomène à modéliser. A titre d'exemple étudions l'écoulement d'un fluide saturée dans une conduite.

- Ecoulement d'un fluide dans une conduite

La figure 6.13. représente l'écoulement d'un fluide compressible à travers une conduite hydraulique. Le fluide étant compressible, le débit volumique et d'entropie changent au passage de la restriction.

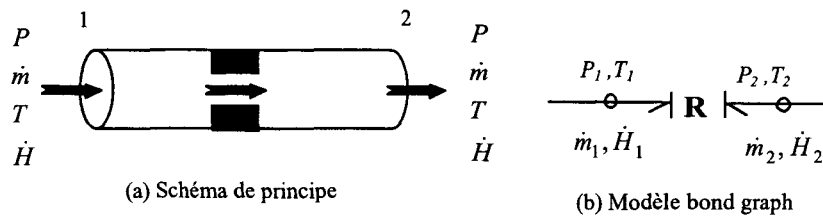


Figure 6.13. Couplage de l'énergie interne et hydrostatique d'un fluide incompressible

En fonction de la variable d'effort thermique choisie (cf.§6.4.1), le flux d'enthalpie est exprimé par l'une des relations suivantes :

$$\dot{H} = \dot{m}h_1, \quad \dot{H} = \dot{m}c_p T_1 \tag{6.18}$$

avec T_1 et h_1 la température et l'enthalpie spécifique en amont de la restriction, c_p la chaleur spécifique à pression constante. Les équations constitutives dépendent du type de phénomènes physiques mis en œuvre. Elles permettent cependant toutes de calculer les flux à partir des deux efforts, pression et température. Une forme d'équation [PRA 52] et [BOR 84] permet de calculer le débit massique par l'une des expressions suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{K_d A}{2} \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} & \text{si } P_2 < 0.5P_1 \\ \dot{m} &= K_d A \sqrt{(P_1 - P_2) \frac{P_2}{T_1}} & \text{si } P_1 \geq P_2 > 0.5P_1 \end{aligned} \tag{6.19}$$

où K_d est le coefficient de débit et A la section au point le plus étroit.

Notons que la formule de Bernoulli n'est valable que pour les fluides incompressibles. Ce cas est présent dans les écoulements de l'eau à température ambiante par exemple.

Il suit de l'équation [6.19] que le flux s'annule à l'égalité des pressions ($P_1=P_2$). Les deux formules donnent des flux identiques pour $P_2=0.5P_1$. En ce point, la dérivée du débit par rapport à la pression P_2 est nulle.

Si le sens d'écoulement est inversé ($P_2 > P_1$), le débit massique est calculé par les équations suivantes :

$$\dot{m} = \frac{K_{d1} A}{2} \frac{P_2}{\sqrt{T_2}} \quad \text{si } P_1 < 0.5P_2$$

$$\dot{m} = K_{d1} A \sqrt{(P_2 - P_1) \frac{P_1}{T_2}} \quad \text{si } P_2 \geq P_1 > 0.5P_2$$

Ici, K_{d1} est un autre coefficient de débit, différent de K_d si la conduite n'est pas symétrique. On conclut alors d'après ces expressions que le débit massique dépend des pressions amont et aval, mais aussi de la température amont. La température aval n'influe pas par contre sur le débit.

6.4.2.2. Multiport C thermodynamique : accumulateur d'énergie

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. Mis en causalité intégrale, le multiport C en thermodynamique comporte deux variables d'état : la quantité d'énergie thermique (associée à la température) et hydraulique (la masse). En thermodynamique, il y a toujours un couplage entre les effets thermiques et hydrauliques (ou mécaniques). Le phénomène type est l'augmentation du volume avec la température, effet auquel sont soumis pratiquement tous les corps gazeux, liquides ou solides. 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.

Considérons un accumulateur d'énergie (fig. 6.14a) soumis aux flux thermiques par convection \dot{H}_i ($i=1, n$) et par conduction \dot{Q}_j ($j=1, r$) et aux flux hydrauliques \dot{m}_k ($k=1, n$). n et r représentent le nombre de ports.

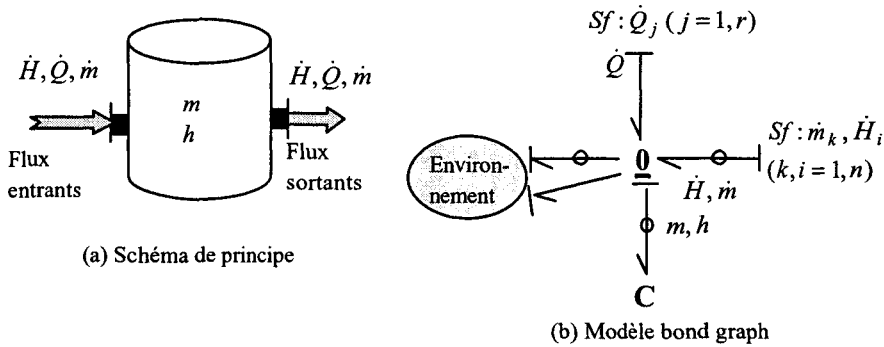


Figure 6.14. Accumulateur d'énergie comme multiport thermodynamique

Le multiport C étant mis en causalité intégrale, les variables d'effort hydraulique (la masse stockée) et thermique (température T ou enthalpie spécifique h) sont déterminées par l'expression :

$$\begin{bmatrix} m \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{C1} \left(\int (\sum \dot{m}_k) dt, \int (\sum \dot{H}_i + \sum \dot{Q}_j) dt \right) \\ \Phi_{C2} \left(\int (\sum \dot{m}_k) dt, \int (\sum \dot{H}_i + \sum \dot{Q}_j) dt \right) \end{bmatrix} \quad [6.20]$$

Les relations sont fortement non linéaires dans le cas des systèmes thermodynamiques. Elles dépendent de la classe du système à modéliser. Examinons à titre d'exemples quelques processus les plus usités dans l'industrie.

6.4.3. Accumulateur de vapeur

Les accumulateurs de vapeur sont largement utilisés dans l'industrie. Ils sont communément appelés chaudière ou générateur de vapeur. Les modèles mathématiques d'un 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 cet ouvrage 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 [RIM 96], a permis de visualiser par simulation ces phénomènes.

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.

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

On considère dans ce cas précis que les phases eau et vapeur sont nettement séparées. Ce cas peut se produire dans l'industrie en présence d'un séparateur de vapeur. On adopte les hypothèses de modélisation suivantes : le liquide du circuit d'alimentation est incompressible (eau à température ambiante, la phase liquide vapeur se comporte comme un gaz réel, le liquide et la vapeur dans chaque phase sont en équilibre thermodynamique et enfin les variables sont à paramètres localisés). Le schéma de principe est donné par la figure 6.15.a et le modèle bond graph correspondant par la figure 6.15.b.

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. L'accumulation d'énergie dans les phases vapeur et eau sont modélisées respectivement par les multiports C_V et C_L qui associent le stockage d'énergie thermique et hydraulique dans leurs phases correspondantes.

– Equations constitutives des multiports C_V et C_L

Les quantités de masse et d'enthalpie m_2 , H_2 , m_5 et H_5 stockées respectivement dans la phase vapeur et dans la phase liquide sont déterminées par les équations constitutives des multiports C_V et C_L mis en causalité intégrale :

$$\begin{aligned} m_2 &= \int (\dot{m}_1 - \dot{m}_8) dt \\ H_2 &= \int (V_L \dot{P}_2 + \dot{Q}_{ex} + \dot{H}_1 - \dot{H}_8) dt \end{aligned} \quad [6.21]$$

$$\begin{aligned} m_5 &= \int (\dot{m}_3 - \dot{m}_4) dt \\ H_5 &= \int (V_V \dot{P}_5 + \dot{H}_3 - \dot{H}_4) dt \end{aligned} \quad [6.22]$$

Les efforts thermiques (enthalpies spécifiques) sont calculés en divisant l'enthalpie totale H par la masse stockée correspondante dans chaque phase.

$$h_2 = \frac{H_2}{m_2}, \quad h_5 = \frac{H_5}{m_5}$$

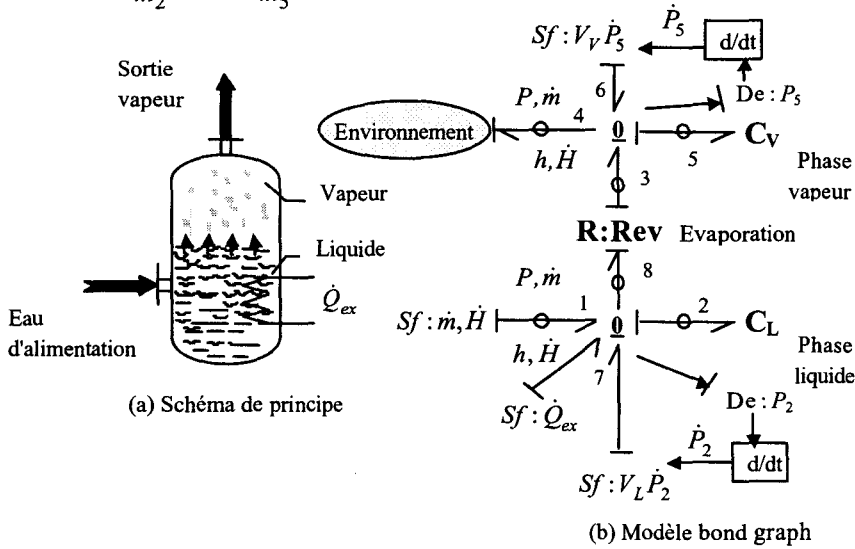


Figure 6.15. Accumulateur de vapeur à deux phases séparées

La vapeur d'eau sort à la même enthalpie que celle de la vapeur stockée h_5 , on peut alors écrire que :

$$\dot{H}_4 = \dot{m}_4 h_5$$

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 : $De : P_2$ et $De : P_5$ (détecteur d'effort) désignent le capteur respectivement de la pression dans la phase 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 ρ_V et celui du liquide sera déduit du volume géométrique de la chaudière V_C :

$$V_V = \frac{m_2}{\rho_V} \quad [6.23]$$

$$V_L = V_C - V_V$$

La masse volumique de la vapeur est déterminée aisément à partir de la table thermodynamique en fonction de l'enthalpie vapeur h_5 : $\rho_V = F_P(h_5)$.

– Equations constitutives du multiport $R : R_{ev}$

On considère qu'à l'interface phase liquide-phase vapeur se produit un échange par évaporation. Ces phénomènes sont modélisés par l'élément résistif $R : R_{ev}$. 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 empiriques [ORD 94]. Elles calculent le débit massique et d'enthalpie d'évaporation :

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_8 = K_{ev} (P_2 - P_5)$$

$$\dot{H}_3 = \dot{H}_8 = \dot{m}_3 (h_2 - h_5) = \dot{m}_3 L \quad [6.24]$$

avec L chaleur latente d'évaporation.

On considère en effet que le débit d'évaporation \dot{m}_3 est proportionnel à la différence des pressions (ou des températures) des phases liquide P_2 et vapeur P_5 . Le coefficient de proportionnalité K_{ev} est déterminé par expérience. L'eau et la vapeur sont à saturation, les pressions P_2 et P_5 sont alors calculées en fonction des enthalpies correspondantes sur la base des tables ou des fonctions thermodynamiques $f_P(h_5)$ et $f_P(h_2)$. Le flux d'enthalpie totale \dot{H}_3 véhiculé est égal au produit du débit massique évaporé \dot{m}_3 par la chaleur latente d'évaporation $L (L = h_2 - h_5)$. Le schéma bloc de simulation du modèle est présenté figure 6.16. Sur ce schéma, H et h désignent respectivement l'enthalpie totale (J) et l'enthalpie spécifique (J/kg) et les grandeurs $H_{2,0}$, $m_{2,0}$, $H_{5,0}$ et $m_{5,0}$ sont les conditions initiales.

6.4.3.2. Modèle bond graph d'un mélange diphasique homogène

Dans ce cas, on considère qu'il se produit un mélange diphasique entre l'eau et la vapeur. Il n'existe pas en conséquence une séparation nette entre les deux phases. 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_2 , *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. Notons que ce cas est plus fréquent dans les chaudières

industrielles. L'accumulateur est modélisé par un élément C à deux ports. Cet élément est associé à un stockage d'énergie (hydraulique et thermique) du mélange dans le réservoir. Le modèle bond graph est présenté sur la figure 6.17.

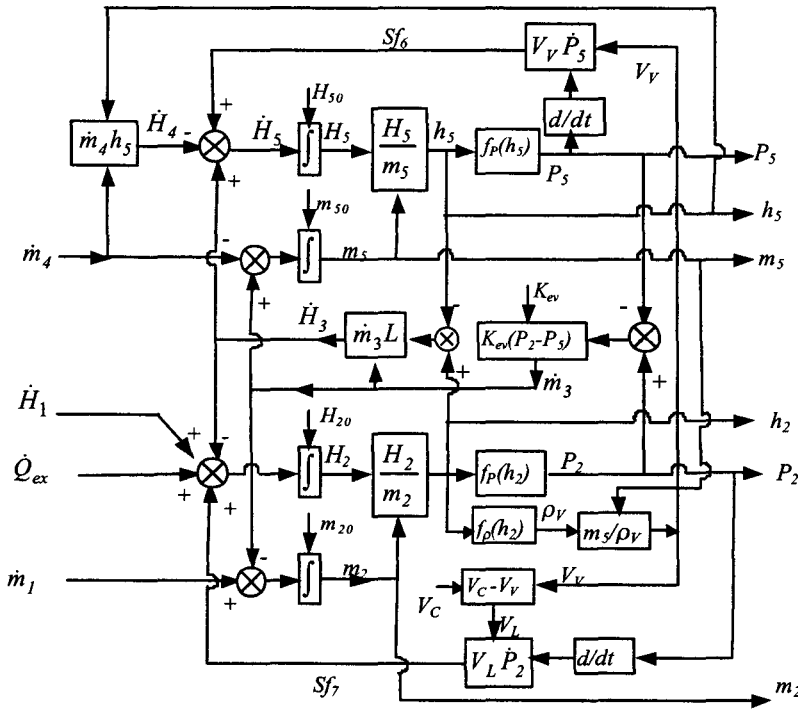


Figure 6.16. Schéma de simulation de l'accumulateur de vapeur à deux phases séparées

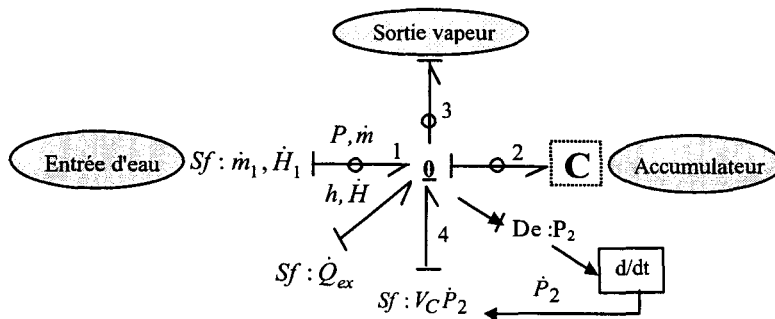


Figure 6.17. Modèle bond graph d'un mélange eau-vapeur diphasique homogène

Les relations constitutives du multiport C sont formées par les équations classiques liant l'effort et l'intégrale du flux :

$$\begin{aligned} m_2 &= \int (\dot{m}_1 - \dot{m}_3) dt \\ H_2 &= \int (V_C \dot{P}_2 + \dot{Q}_{ex} - \dot{H}_3 + \dot{H}_1) dt \end{aligned} \quad [6.25]$$

et d'un système d'équations complémentaires du mélange diphasique homogène suivant :

$$\begin{cases} h_2 = \frac{H_2}{m_2} = h_v(P_2)X + h_L(P_2)(1-X) \\ v_2 = \frac{V_C}{m_2} = v_v(P_2)X + v_L(P_2)(1-X) \end{cases} \quad [6.26]$$

$h_L(P_2)$, $h_v(P_2)$, $v_L(P_2)$ et $v_v(P_2)$ représentent respectivement les fonctions thermodynamiques de l'enthalpie et du volume massique (du liquide et de la vapeur) dans la phase 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 égal (on le suppose) à celui du mélange. X est la qualité (titre) du mélange (taux de la vapeur dans le mélange).

La résolution de [6.26] 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 N_e dans l'accumulateur :

$$N_e = m_2(1 - X) \quad [6.27]$$

ou éventuellement d'apprécier le niveau du liquide connaissant les dimensions géométriques de la chaudière.

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 $(1-X) \text{ kg}$ de liquide occupant un volume de XV_L et $X \text{ kg}$ de vapeur occupant un volume de XV_v . Si $X=0$, on est à l'état liquide et si $X=1$ on n'a que de la vapeur saturée sèche.

6.4.4. Multiport RS

En bond graph, le symbole R représente tout phénomène dissipatif d'énergie sous forme de chaleur. Pour inclure les effets thermiques, on ajoute à celle-ci le symbole S comme source : chaque élément RS est en même temps une source d'entropie et une source de chaleur qui sont évidemment liées par l'équation de Carnot. Ainsi, on arrive à un élément RS comme une structure qui conserve la puissance et est irréversible.

Les multiports RS (élément dissipatif avec génération d'entropie) se manifestent surtout par échauffement dans les phénomènes de frottement. Par frottement, nous entendons non seulement le frottement mécanique, mais aussi le frottement électrique dans une résistance. On retrouve aussi les frottements thermiques introduits par les phénomènes de conduction de la chaleur.

6.4.4.1. Echauffement par frottement

La figure 6.18 montre les différents frottements, d'abord une simple résistance électrique, qui génère de la puissance thermique, égale à la puissance électrique absorbée selon l'équation :

$$\dot{E} = ui = T\dot{S} = \dot{Q} \quad [6.28]$$

puis une résistance hydraulique où nous avons d'une façon analogue

$$\dot{E} = P\dot{V} = T\dot{S} = \dot{Q} \quad [6.29]$$

La figure 6.18c. représente les frottements mécaniques produits par un arbre tournant avec un frein à disque. La chaleur de frottement apparaît ici sur le disque et les sabots, d'où la difficulté en pratique à l'évacuer.

Ces éléments se comportent comme une source d'entropie d'où la représentation type source comme indiqué sur la figure 6.8 d.

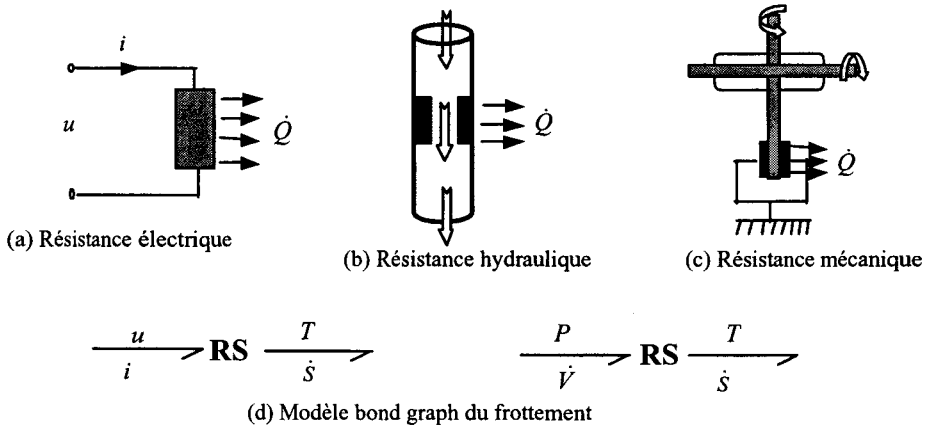


Figure 6.18. Différents types d'échauffements par frottement et modèle bond graph

6.4.4.2. Dissipation de l'énergie thermique dans une restriction hydraulique

Nous prenons comme exemple l'écoulement de l'huile de viscosité dynamique μ entre les fentes d'un piston et d'un cylindre. La figure 6.19a. montre une telle fente typique d'une hauteur $e = 10 \text{ microns}$, d'une largeur l et d'une longueur L de quelques centimètres.

L'huile étant un fluide incompressible, on utilise alors en qualité de variable de flux, le débit volumique qui est lié au débit massique \dot{m} par la densité ρ . On supposera d'abord que l'effet thermique est négligeable, le modèle bond graph est alors représenté par la figure 6.19b. Le débit de fuite hydraulique est donné par :

$$\dot{V} = \frac{1}{12} \frac{(P_1 - P_2)}{\mu} e^3 \frac{l}{L}; \quad \dot{m} = \rho \dot{V} \quad [6.30]$$

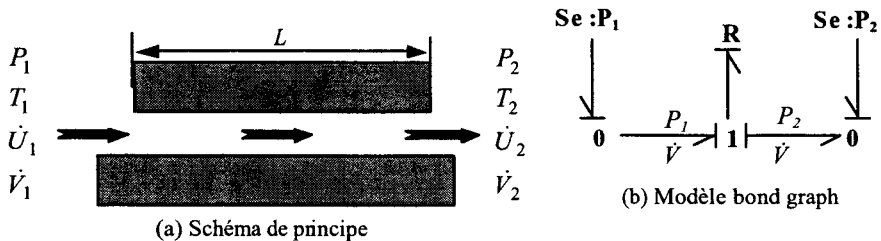


Figure 6.19. Modèle bond graph d'une restriction hydraulique sans perte thermique

Si on considère que la résistance hydraulique dissipe de l'énergie par échauffement, le modèle bond graph de la figure 6.20 modélise alors un tel phénomène.

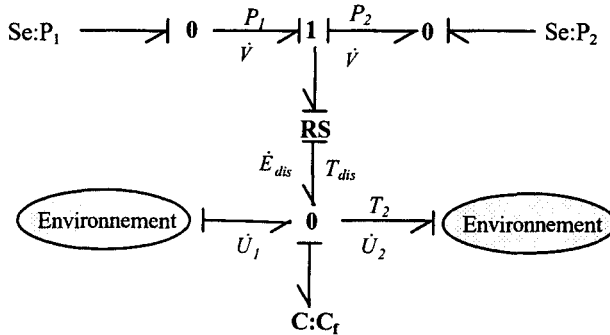


Figure 6.20. Bond graph de la dissipation de l'énergie thermique par une restriction hydraulique

L'énergie dissipée $(P_1 - P_2) \dot{V}$ provoque un échauffement du fluide de densité ρ . Sur le bond graph, l'élément R devient alors un multiport RS , et l'énergie dissipée \dot{E}_{dis} s'ajoute donc directement à l'énergie interne du fluide \dot{U}_1 . La température moyenne T_2 du fluide est alors calculée par l'élément C de capacité thermique C_f .

Les équations constitutives déduites du modèle bond graph donnent alors :

$$\begin{aligned} \dot{E}_{dis} &= (P_1 - P_2) \dot{V} \\ T_2 &= \frac{1}{C_f} \int (\dot{E}_{dis} + \dot{U}_1 - \dot{U}_2) dt \end{aligned} \quad [6.31]$$

avec, \dot{U}_2 - l'énergie interne à la sortie de la résistance hydraulique.

Si on néglige la partie thermique, le champ RS devient un élément R et on retrouve alors un modèle bond graph du système hydraulique classique. Néanmoins, le lien thermique ne peut pas être négligé, car l'augmentation de la température est souvent importante suite à une variation de la pression. En effet, elle est de 5,5 K par 10 MPa (100 bars) et de 16.5 K par 30 MPa (300 bars) pour de l'huile.

6.5. Bond graph des systèmes chimiques

6.5.1. Potentiel ou tension chimique

Nous avons considéré jusque là la modélisation des systèmes thermodynamiques à masse totale constante. Dans cette partie, nous allons développer la modélisation par bond graph des systèmes chimiques et thermodynamiques à masse variable.

Considérons d'abord un système chimique constitué d'un seul composant. Les variables décrivant cette phase sont T, S, P, V, μ et n . Par rapport à un système sans transformation de matière, nous avons dans ce cas deux variables supplémentaires : le potentiel chimique μ et le nombre de moles n .

L'énergie interne accumulée par le système est décrite ici par l'équation de Gibbs

$$dU = TdS - PdV + \mu dn \quad [6.32]$$

La relation [6.32] est représentée en bond graph par le multiport C à trois ports comme indiqué sur la figure 6.21 : deux ports associant les puissances thermodynamique et hydraulique et un lien supplémentaire de puissance chimique avec la tension chimique μ comme effort et le flux molaire \dot{n} . Ce dernier est analogue au flux de masse, à la différence que le flux molaire est divisé par z , la valeur de la masse moléculaire.

La relation [6.33] définit *la tension* ou le *potentiel chimique*, mais pour se familiariser, disons pour l'instant qu'elle montre la tendance d'un constituant chimique à s'étendre et s'élargir. Suivant une suggestion faite par [Job, 1981], nous utiliserons dans la suite de ce chapitre le mot tension chimique au lieu de potentiel chimique : nous considérons ainsi que l'analogie avec la tension électrique (voltage) est soulignée, bien que la nature physique soit entièrement différente.

En thermodynamique, la pression a pour conséquence une variation de volume et la température une variation d'entropie. La tension chimique est associée en chimie au transfert de matière.

Il existe une similarité entre pression et tension chimique. En particulier, si la pression augmente, la tension chimique augmente aussi. Par contre, contrairement à la pression, la tension chimique diminue avec l'augmentation de la température. Elle dépend de la masse molaire n , du volume V et de l'entropie S . Ainsi, la tension chimique à entropie constante et volume constant est égale à :

$$\mu = \left(\frac{\partial U(S, V, n)}{\partial n} \right)_{S, V} \quad [6.33]$$

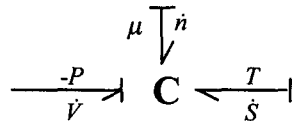


Figure 6.21. Bond graph d'un système chimique avec une phase à masse variable.

Le modèle bond graph d'une phase constituée de deux espèces chimiques à composition variable est donné par la figure 6.22.

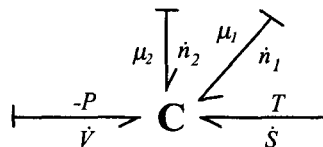


Figure 6.22. Bond graph d'un système chimique avec deux phases à masse variable

Le multiport C est associé à l'accumulation de l'énergie chimique hydraulique et thermique :

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^2 \mu_i \dot{n}_i \quad [6.34]$$

On considère par définition, que pour un mélange homogène, la tension chimique d'un constituant est le quotient de l'enthalpie libre par la quantité de matière. Dans le système S.I, elle s'exprime en joule par mole, son unité est le Gibbs (G) ou le kilogibbs (kG) dû à [WB 72]. On a donc :

$$1G = \frac{1\text{Joule}}{1\text{mole}}, 1kG = \frac{1kJ}{1\text{mole}}$$

6.5.2. *Equilibre chimique, thermique et hydraulique*

Afin d'établir une analogie avec d'autres domaines d'énergie, examinons l'échange d'énergie entre deux substances différentes, contenues dans deux cylindres comme indiqué sur la figure 6.23. R_{hy} , R_{th} et R_{ch} désignent respectivement les résistances hydraulique, thermique et chimique.

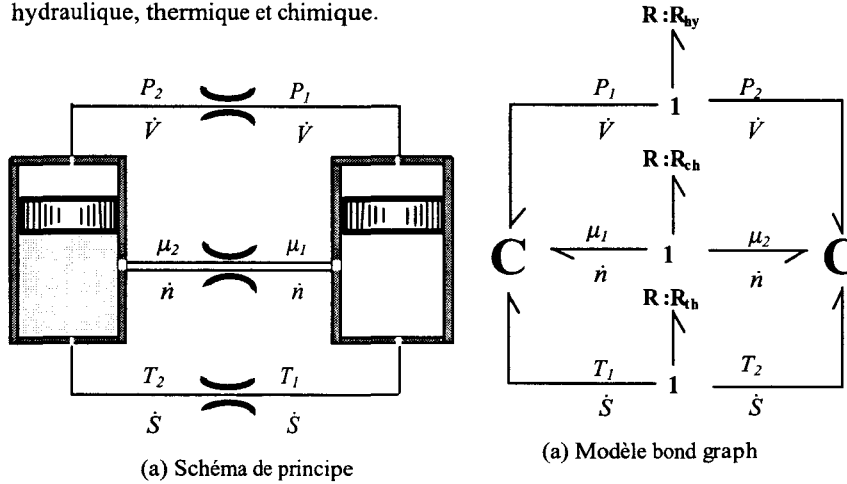


Figure 6.23. *Equilibre thermique, hydraulique et chimique entre deux cylindres contenant des substances différentes*

Sous l'action des deux pistons agissant sur un fluide incompressible, il se produit alors entre les deux cylindres un échange de volume, c'est à dire l'écoulement d'un flux de masse jusqu'à obtention d'une égalité des pressions. Cet état correspond alors à un *équilibre hydraulique*. Nous avons représenté aussi une liaison thermique dans laquelle s'écoule un flux d'entropie jusqu'à ce que les températures des fluides contenus dans chacun des cylindres soient égales. Nous désignons cette égalité des températures comme la condition d'un *équilibre thermique*. En plus de ces deux liaisons nous avons une liaison permettant un échange de masse (transfert de matière ou de substance). Quand les deux tensions chimiques sont égales, il ne se produit plus d'échange de masse dans la liaison et l'on parle d'*équilibre chimique*. Le transfert de masse est produit par la force motrice qui est la différence des tensions chimiques. Dans le domaine électrique, le transfert d'électrons est provoqué par une différence de tension électrique.

La différence de tension chimique est aussi à l'origine de la dynamique des réactions chimiques. Bien entendu, la tension chimique de chaque phase dans un système chimique dépend de la pression et de la température ; c'est pourquoi toutes les réactions chimiques peuvent se produire dans l'une ou l'autre direction, selon la

température et la pression auxquelles elles sont soumises. On peut décrire les réactions chimiques et leur dépendance de la température comme des interactions entre des potentiels chimiques, et cela sans se préoccuper de la nature profonde des phénomènes de cette réaction

6.5.3. Echange de masse entre deux substances

Afin d'analyser les phénomènes de transfert de masse provoqués par la tension chimique, examinons la communication entre deux substances contenues dans deux cylindres à travers une membrane sous l'action de deux pistons (fig.6.24).

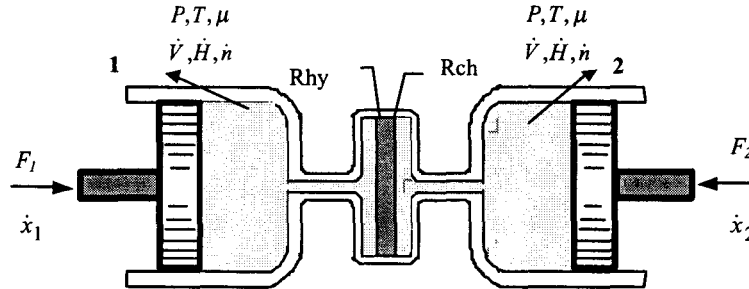


Figure 6.24. Communication de deux substances sous l'action de deux pistons à travers une membrane

Le modèle bond graph simplifié du système de la figure 6.24 est représenté par la figure 6.25. Les liens de puissance couplés portent ici les paires des variables (P, \dot{V}) , (T, \dot{H}) et (μ, \dot{n}) associant respectivement les puissances hydraulique, thermique et chimique.

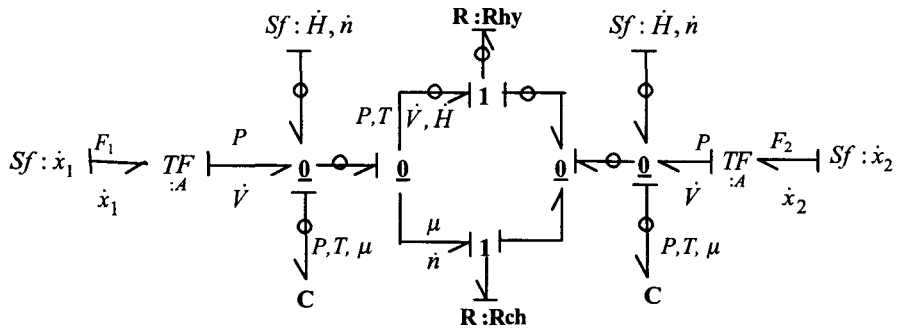


Figure 6.25. Modèle bond graph d'un procédé de transfert de masse à travers une membrane

Notons que du coté piston, on introduit aussi la tension chimique mais elle est sans effet puisque les pistons sont sans pores

Etudions maintenant plus en détail les phénomènes de changement d'entropie et de volume qui se produisent dans le processus de transfert de masse de la phase 1 vers la phase 2 de la figure 6.24. Le modèle bond graph est donné par la figure 6.26.

Le système est soumis à deux sources d'effort (de pression et de température). Les éléments transformateurs TF modulés par les densités d'entropie s et de volume v permettent de connecter deux efforts ou deux flux. Leurs relations constitutives, en fonction des causalités affectées sont dans notre cas :

$$P_4 = v.P_3, T_9 = s.T_8 \text{ et } \dot{V}_3 = v.\dot{V}_4 \quad [6.35]$$

Les paramètres s et v (modules des transformateurs) désignent respectivement l'entropie par masse (ou densité d'entropie) et le volume massique. Ces paramètres permettent aussi de lier le flux d'entropie ou le flux volumique au flux molaire par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{S}_8 &= s\dot{n}_{10} \\ \dot{V}_3 &= v\dot{n}_{10} \end{aligned} \quad [6.36]$$

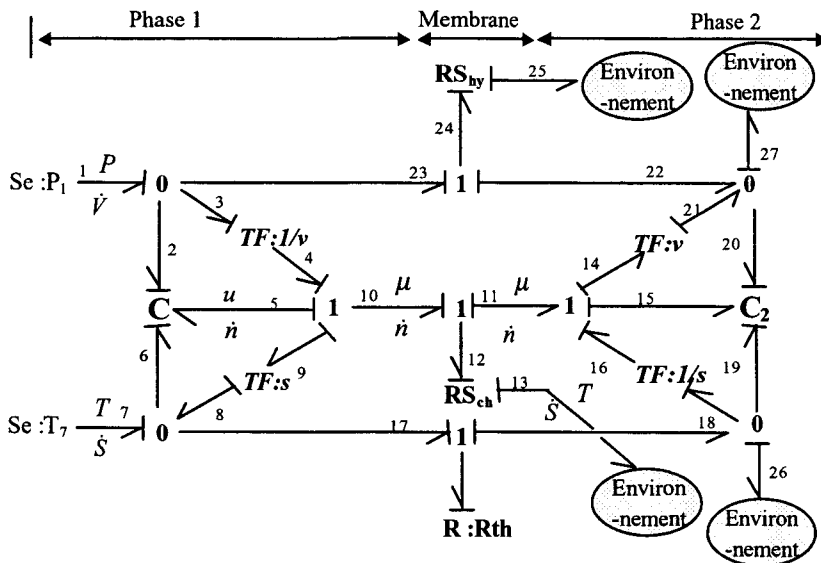


Figure 6.26. Bond graph de l'échange de masse entre deux substances différentes

Toutefois, en général dans les phénomènes physico-chimiques, les grandeurs s et v sont exprimées par les relations des dérivés partielles suivantes :

$$s = \frac{\partial S(P, T, n)}{\partial n}, \quad v = \frac{\partial V(P, T, n)}{\partial n} \quad [6.37]$$

Les transformateurs dans la figure 6.26 remplissent ici deux fonctions :

– L'équation constitutive de la jonction 1 montre que l'entropie et le volume sont entraînés et réinjectés dans leurs liens respectifs, et ne passent pas donc par la résistance chimique. Ils seront toutefois ajoutés de nouveau du côté droit du bond graph. Cet état est assuré par les relations des flux du transformateur (équation [6.34]). Il faut préciser que la nature des flux dans la jonction 1 est identique (flux molaire). En effet, la variable de flux du port 5 est certes le flux d'entropie, mais le passage au flux molaire est assuré par la relation [6.36].

– L'équation des efforts des transformateurs montre la transition entre l'énergie interne par volume ($u=U/n$) et la tension chimique. En tenant compte des relations [6.35], l'équation constitutive de la jonction 1 est :

$$\mu_{10} = -u_5 - sT_8 + vP_3 \quad [6.38]$$

La relation (6.38) qui est une transformation de Legendre est représentée par les transformateurs, qui assurent ainsi l'équation de conservation des puissances. L'entropie expulsée de la phase 1 (initiale des réactants en disparition) s'écoule par les liens 9 et 7 vers la phase 2 (des produits de réaction en apparition) où elle sert d'entropie de structure (lien 17). S'il se produit une variation de température, l'entropie va dans le multiport C (associé au stockage d'énergie) par l'intermédiaire du lien de conduction 6. Par conséquent, à température constante, les liens de conduction ne véhiculent pas de flux.

La relation [6.38] traduit un phénomène naturel intéressant que nous expliquons comme suit : la tension chimique qui provoque le changement de masse dépend de l'énergie moléculaire interne u . A cela on doit ajouter la poussée hydrostatique vP . En outre, et cela est important, il faut retrancher le terme Ts : cela signifie que l'entropie s , accumulée dans une phase, réduit la tension chimique et en conséquence la force qui pousse la substance à changer de phase.

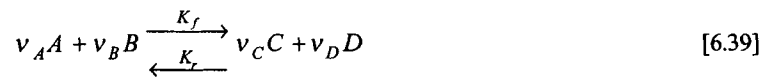
Il faut relever en particulier le terme Ts , qui doit être déduit (stripped en anglais) de l'énergie interne u .

Notons que si les dimensions (diamètre) des pores de la membrane sont petites, l'équilibre est établi à égalité des tensions chimiques et que si par contre elles sont grandes, l'équilibre est établi à égalité des pressions.

6.5.4. Bond graph d'une réaction chimique

Comme nous l'avons déjà souligné, les réactions chimiques peuvent être avantageusement représentées par les bond graphs dans lesquels la tension chimique joue un rôle essentiel. Contrairement aux systèmes mécaniques, électriques et à un degré moindre thermodynamique, la modélisation par bond graph des réactions chimiques est peu développée.

Soit une réaction chimique entre deux substances A et B qui réagissent entre elles pour donner deux produits de réactions C et D selon l'équation :



v_A , v_B , v_C et v_D sont les coefficients stœchiométriques, K_f et K_r sont les constantes de vitesse de réaction direct (Forward) et inverse (Reverse).

A titre d'exemple la combustion de l'hydrogène selon l'équation chimique :



avec $v_A = 1$, $v_B = 0.5$, $v_C = 1$ et $v_D = 1$.

Nous considérons dans toute la suite de notre étude que les composants sont régulièrement répartis et que la concentration ne varie pas dans l'espace du volume du réacteur (système à paramètres localisés). Ces conditions sont en général obtenues dans les réacteurs continus parfaitement mélangés connus sous l'appellation en anglais de CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).

Pour introduire graduellement la représentation des réactions chimiques par les bond graphs, modélisons la réaction ci dessus en tenant compte uniquement des phénomènes de transformation. La réaction donnée peut être représentée par le modèle vrai bond graph de la figure 6.27. Selon ce modèle, on peut définir une réaction chimique, d'un point de vue phénoménologique, comme un multiport RS dissipatif soumis à l'entrée aux réactants et à la sortie aux produits de la réaction dans des proportions stœchiométriques.

Sur la figure 6.27, les éléments C (C_A , C_B , C_C , et C_D) sont des capacités représentant le stockage de la matière. Chaque produit chimique est représenté par le

couple des variables de puissance (μ_i, \dot{n}_i) . Alors que les variables de puissance des phénomènes chimiques proprement dits sont : pour l'effort, l'affinité chimique partielle A_i (en J/mole) et pour le flux la vitesse de réaction $\dot{\xi}$ (en mole/sec.).

Toutefois, en général dans les phénomènes physico-chimiques, les grandeurs s et v sont exprimées par les relations des dérivés partielles suivantes :

$$s = \frac{\partial S(P, T, n)}{\partial n}, \quad v = \frac{\partial V(P, T, n)}{\partial n} \quad [6.37]$$

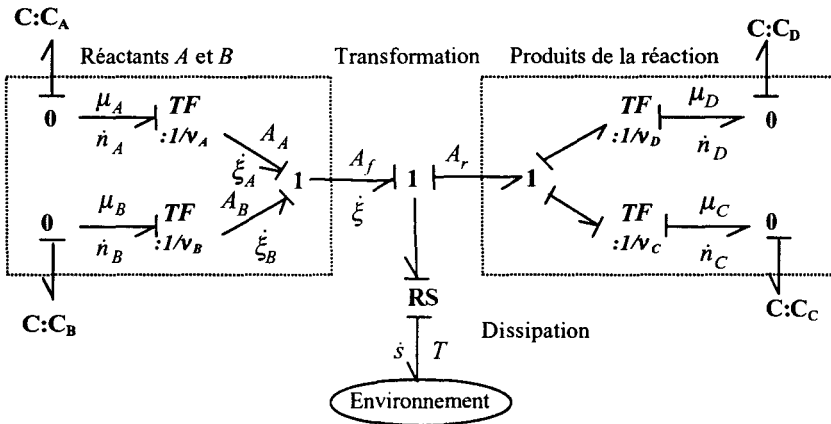


Figure 6.27. Modèle bond graph des phénomènes de transformation d'une réaction

Commentons les relations [6.41]. Concernant la relation liant les efforts : $(A_i = \mu_i \nu_i)$, les éléments TF transforment la tension chimique μ_i de l'espèce i en son affinité chimique partielle A_i . Quelquefois il convient de grouper les affinités, en affinité directe (A_f) et en affinité inverse (A_r) , ce qui permet d'introduire l'affinité de la réaction :

$$A = A_f - A_r = (\nu_A \mu_A + \nu_B \mu_B) - (\nu_C \mu_C + \nu_D \mu_D) \quad [6.42]$$

Rappelons que l'affinité chimique A est une variable d'effort qui représente la force motrice qui pilote la réaction. Elle doit être nulle à l'équilibre $(A = 0)$. Cela veut dire que la réaction se déroule jusqu'à épuisement de A .

Concernant les relations liant les flux, les transformateurs TF divisent le flux molaire \dot{n} par le coefficient stœchiométrique ν pour obtenir la vitesse de réaction :

$$\dot{\xi}_i = \frac{\dot{n}_i}{\nu_i} \quad (i = A, B, C, D) \quad [6.43]$$

Notons que

$$\xi = \int \dot{\xi}_i dt \quad [6.44]$$

est appelé avancement de la réaction.

Dans les conditions proches de l'équilibre, la vitesse de réaction est une fonction de la température et de la différence des affinités directe et inverse :

$$\dot{\xi} = \Phi(A_f - A_r, T) \quad [6.45]$$

Cette relation constitue l'équation constitutive du multiport RS de la figure 6.26. De plus, dans les mêmes conditions, le potentiel chimique de l'espèce i est lié approximativement à sa concentration C_i par la relation [6.16]:

Des équations [6.16] et en tenant compte des conditions d'équilibre ($A=0$), on a :

$$\frac{(C_A)^{\nu_A} \cdot (C_B)^{\nu_B}}{(C_C)^{\nu_C} \cdot (C_D)^{\nu_D}} = K \quad [6.46]$$

L'équation [6.46] provient de la loi bien connue de l'action des masses en chimie déduite dans notre cas directement du bond graph.

La vitesse de la réaction est exprimée par une relation empirique de forme :

$$\dot{\xi} = K_f(T) \left[\left(\frac{n_A}{V} \right)^{\nu_A} \left(\frac{n_B}{V} \right)^{\nu_B} \right] - K_r(T) \left[\left(\frac{n_C}{V} \right)^{\nu_C} \left(\frac{n_D}{V} \right)^{\nu_D} \right] \quad [6.47]$$

A l'équilibre, la constante de vitesse $K(T)$ est :

$$K_f(T) e^{\frac{-A_{f0}}{RT}} = K_r(T) e^{\frac{-A_{r0}}{RT}} = K(T) \quad [6.48]$$

où A_{f0} et A_{r0} sont les affinités directe et inverse calculées à une température constante.

En tenant compte des équations [6.42] [6.16] et [6.47] et en sachant que $A_i = \nu_i \mu_i$, on obtient :

$$\dot{\xi} = K(T) \cdot e^{\frac{A_f - A_r}{RT}} = \Phi(A_f, A_r, T) \tag{6.49}$$

$K(T)$ est la constante de vitesse qui varie avec la température thermodynamique T conformément à la relation d'Arrhénius :

$$K(T) = k_0 e^{\frac{-E}{RT}} \tag{6.50}$$

avec E énergie d'activation, k_0 facteur pré exponentiel (ou facteur de fréquence) et R la constante des gaz.

Les paramètres E et k_0 sont déterminés en pratique expérimentalement par la méthode des moindres carrés en minimisant l'écart quadratique entre la valeur du logarithme du modèle (pour le rendre linéaire) et la valeur expérimentale :

$$J(\theta) = \min \left[\sum_{i=1}^N \left(\ln(K_{ex}(i)) - \ln \left(k_0 e^{\frac{-E}{RT(i)}} \right) \right)^2 \right] \tag{6.51}$$

où i et N sont respectivement le numéro et le nombre d'expériences et $\theta = [\ln k_0 \quad E]^t$ le vecteur paramètre à estimer. $K_{ex}(i)$ ($i=1, N$) sont les données d'expérience des vitesses de réaction.

Si on est loin de l'équilibre, la relation de la vitesse de réaction est plus complexe et dépend des affinités directes et inverses séparément : $\dot{\xi} = f(A_f, A_r)$. La jonction 1 centrale est alors remplacée par un multiport RS comme indiqué sur la figure 6.28.

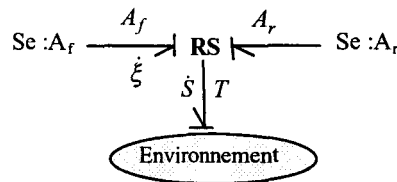


Figure 6.28. Représentation de la résistance chimique loin de l'équilibre

Cette distinction joue un grand rôle en biophysique [OST 73].

La vitesse de la réaction est gouvernée par la résistance pour laquelle différentes théories de la cinétique chimique ont été élaborés [DEN 71] et [THO 77].

6.5.4.1. Résistance chimique

La quantité de matière transportée par diffusion de l'espèce i peut être exprimée par la première loi de Fick :

$$\xi_i^d = -D_i \frac{dC_i}{dx} \quad [6.52]$$

ξ_i^d est le flux de diffusion, D_i le coefficient de diffusion et x la variable espace. Toutefois, du point de vue thermodynamique et du bond graph, la force (effort) d'entraînement pour la diffusion est le gradient du potentiel chimique et non la concentration C_i . En exprimant la concentration à partir de l'équation [6.16], il vient une relation constitutive d'un élément R de type $\Psi_{R(e,f)}=0$:

$$\xi_i^d = -D_i \frac{C_i}{RT} \cdot \frac{d\mu_i}{dx} \equiv \left(\frac{D_i C_{i,l}}{RTW_l} \right) \Delta\mu \quad [6.53]$$

où $\Delta\mu_i$ est la différence de tension chimique de l'espèce i en travers de la section l , de largeur W_l . La résistance de diffusion pour l'espèce i dans cette région est alors comme suit :

$$R_{i,l}^d = \frac{RTW_l}{D_i C_{i,l}} \quad [6.54]$$

La résistance chimique détermine la rapidité de la réaction qui peut s'étendre d'une durée pratiquement nulle (explosion) à une durée pratiquement infinie.

6.5.4.2. Capacité chimique

Sachant que la concentration C est liée à l'intégrale du flux molaire \dot{n} , l'équation [6.16] peut s'écrire :

$$\Psi_C(\mu, \int \dot{n} dt) = 0 \quad [6.55]$$

ce qui est bien une équation constitutive d'une capacité chimique en bond graph.

Toutefois, il faut préciser qu'en général, l'équation est de la forme $n = \Psi_C(\mu_i)$ dont la dérivée donne :

$$\dot{n}_i = \frac{\partial \Psi(\mu_i)}{\partial \mu} \cdot \frac{d\mu_i}{dt} \quad [6.56]$$

En notant par $\frac{\partial \Psi(\mu_i)}{\partial \mu} = C_i$, la capacitance, on déduit de l'équation [6.56] la relation classique d'un élément C liant l'effort et l'intégrale du flux du flux molaire (le déplacement) $\Psi_C(e, \int f dt) = 0$.

$$\mu_i = \frac{1}{C_i} \int \dot{n}_i dt \quad [6.57]$$

où \dot{n}_i est le flux molaire traversant la capacité.

Notons qu'on peut utiliser un pseudo bond graph pour modéliser la réaction. Dans ce cas, en qualité d'effort on utilise les concentrations des substances au lieu des tensions chimiques (liées entre elles par l'équation [6.16], et en qualité de flux les dérivées des concentrations. Cette approche est largement utilisée [LEF 85] car elle permet de manipuler des variables plus intuitives et facilement mesurables (concentration) donc faciles à simuler.

6.6. Notations

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

276 Les bond graphs

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
S	Entropie	J
s	Densité d'entropie	J/kg
T	Température	$^{\circ}C$
\dot{n}	Flux molaire	<i>mole/s</i>
u	Tension	<i>volt</i>
V	Volume massique	m^3/kg
\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
ν	Viscosité dynamique	$Pa.s$
μ	Potentiel chimique	$J/mole$
ρ	Masse volumique (densité)	Kg/m^3
λ	Conductivité thermique	$W/(m.^{\circ}K)$
ξ	Vitesse d'une réaction chimique	l/s
ξ	Avancement d'une réaction chimique	

6.7. Bibliographie

- [BOR 84] BOREL L., *Thermodynamique et Energétique*, Presses Universitaires Romandes, 1984.
- [BOR 92] Borne P. et al. *Modélisation et identification des processus*, Tome 2. Editions Technip, 1992.
- [DEN 71] Denbigh K., *Principles of Chemical Equilibrium*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1971.
- [JOB 81] Job G., *Die Werte des chemischen potentials*. H. Schroedel Verlag, Hannover, Allemagne, 1981.
- [KAR 79] Karnopp D. K., « State Variables and Pseudo-Bond graphs for Compressible Thermofluid Systems », *Trans. ASME J. DSC*, Vol. 101, p. 201-204, 1979.
- [KAR 90] Karnopp, D et Rosenberg R., *Systems dynamics. A unified Approach*, Wiley Intersciences; New York, 1990.
- [LEF 85] Lefèvre J., « A mixed Block Diagram Bond Graph Approach for biochemical models with mass action rate law kinetics », *J. of Franklin Inst.* Vol. 319, 1985, p. 201-215, 1985.
- [OUL 96] Ould Bouamama, B., Dauphin-Tanguy G., « Bond Graph model of a steam generator process and its environment », *The 10th European Simulation Multiconference ESM'96, SCS*, Budapest Hungary June 2-6 1996, p. 238-242.
- [OUL 97] Ould Bouamama, B., Thoma J. U., Cassar J.P., « Bond graph modelisation of steam condensers », *Congrès IEEE, International Conference on Systems, Man, and Cybernetic*, Orlando, USA, , Otober 16-17, 1997, vol.3. p. 2490-2494.
- [OUL 99] Ould Bouamama B., « Apport de l'outil bond graph pour le filtrage d'alarmes », Rapport de contrat EDF-ECL P31L19/6A2224/EP824 17 p. Lille, 1998.
- [ORD 94] Ordys A.W., et al., *Modeling and simulation of power génération plants*, Springer-Verlag, 1994.
- [OST 73] Oster et al., « Network Thermodynamic: Dynamic Modeling of Biophysical Systems », *Quarterly Rev. of Biophysics*, Vol. 6, 1973.
- [POS 82] Positello, R., *La vapeur d'eau industrielle, connaissance - Production Etude des tuyauteries de distribution*, Technique et documentation- Lavoisier, 1983.
- [PRA 52] Prandtl L., *Essentials of Fluid Dynamics*, Blackie, London, 1952.
- [RIM 96] Rimaux, S., B. Ould Bouamama B., G Dauphin-Tanguy, Modélisation simplifiée des centrales, rapport interne scientifique contrat N° P33/2M3502/EP732, ECL-EDF, LAIL, URA CNRS 1440, Juin 1996, Lille, France.
- [THO 77] Thoma J. U., « Network Thermodynamics with Entropy Stripping », *Journal of Franklin Institue*, vol. 303, N° 4, Avril, 1977.
- [WIB 72] Wiberg, E., *Die chemische Affinitaet*, Walter de Gruyter, Berlin, 1972.

Modélisation d'un générateur de vapeur par équations à paramètres distribués

Samir Lamiri* — Belkacem Ould-Bouamama** —
Jean-Pierre Richard*

Laboratoire d'Automatique et d'Informatique industrielle de Lille
CNRS UPRESA 8021

* Ecole Centrale de Lille
BP48, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex
lamiri, jprichard@ec-lille.fr

** Université des Sciences et Technologies de Lille
Bât. EUDIL Cité Scientifique 59651 Villeneuve d'Ascq cedex
belkacem.bouamama@univ-lille1.fr

RÉSUMÉ. Ce travail a pour but d'obtenir un modèle dynamique pour générateur de vapeur, qui puisse fournir à la fois des informations internes et une vision du procédé sous forme entrée-état-sortie. Pour rester proche des phénomènes réels, nous proposons un modèle non linéaire en dimension infinie (de type EDP, équation aux dérivées partielles), qui permet notamment de reconstruire la distribution du titre massique de la vapeur au sein de la chaudière, ce qui constitue un résultat original et d'intérêt pratique certain, puisque cette donnée ne peut être captée. Ce travail distingue deux approches de modélisation : deux phases eau-vapeur séparées puis un mélange diphasique homogène. Enfin, la résolution numérique des équations obtenues est étudiée, conduisant à la simulation des résultats.

ABSTRACT. The present work aims at obtaining a dynamic model for a steam generator plant, which can provide input-state-output relations, as well as internal information. A non-linear model is obtained in infinite dimension, which allows for reconstruction of the mixture quality with respect to the position in the boiler or, as a consequence, estimation of the water-steam interface mean-height. In this work, two modelling points of view are successively studied: in the first one, the fluid phases are assumed to be separated. The second one considers (in an original way) an homogeneous, diphasic mixture. Lastly, the numerical implementation of both approaches is discussed at the end of the paper, and simulations are provided.

MOTS-CLÉS : générateur de vapeur, thermodynamiques, les équations de masse, de moment et d'énergie, mélange diphasique.

KEYWORDS: steam generator, thermodynamics, « mass / momentum / energy » equations, diphasic mixture.

1. Introduction

1.1. *Le problème industriel*

Les processus de génération de vapeur sont largement utilisés dans de nombreuses industries. Ainsi, dans les centrales nucléaires ou thermiques, le générateur de vapeur est un élément central du processus de production d'électricité, dont la connaissance est nécessaire pour le contrôle et la conduite de l'installation globale. Cette maîtrise est d'autant plus cruciale que ce type d'installation se situe en général dans des industries à risque.

La complexité d'un générateur de vapeur est due au fait qu'il met en œuvre un ensemble de phénomènes couplés, de natures diverses (principalement : mécanique, thermodynamique, électrique). Il est de surcroît soumis à de nombreuses sources de perturbations.

Parmi les sources de complexité identifiées par les industriels, on peut citer les phénomènes de gonflement tassement [KOT 00] [PAR 95] [TAH 93], qui s'avèrent très nuisibles pour la stabilité du système : dus à l'effet de variation de la densité de la vapeur, ils introduisent un comportement de déphasage non minimal qui dépend principalement du taux de charge [AMB 96] [RIM 96] [RIM 95] [KWA 93]. D'autres phénomènes influant sur la stabilité du niveau dans les générateurs de vapeur sont traités dans [THO 00].

Le manque de modèles dynamiques capables de représenter cette complexité est probablement l'une des raisons pour lesquelles les méthodes de conduite les plus largement utilisées dans les générateurs industriels sont aussi restées les plus classiques (P, PI, PID), basées sur des modèles assez rudimentaires : l'absence de modèles thermodynamiques réalistes est palliée par des exigences accrues de robustesse. Cependant, ces dernières ne sont bien sûr satisfaites qu'au prix d'une diminution des performances.

Ces dernières années, ce constat a conduit à un certain nombre de travaux de modélisation pour la commande [KLE 86] et la surveillance [LIT 99] [OUL 00], publiés dans la littérature spécialisée.

Toutefois, il faut noter que ces travaux sont appliqués sur des simulations ou, au mieux, dans des conditions de laboratoire. Quelques publications très récentes [KOT 00] ont également proposé une approche de commande prédictive pour la régulation du niveau d'eau dans les générateurs de vapeur. En contre partie, les phénomènes non linéaires ne peuvent être pris en compte dans une telle approche, qui reste (au dire même de ses auteurs) sensible aux conditions de fonctionnement rencontrées.

1.2. *Un bilan des modèles disponibles*

De nombreux modèles statiques sont développés pour l'analyse et le dimensionnement de ce type de processus industriel. Des modèles dynamiques de conduite (boîte

noire) issus d'une identification peuvent être obtenus avec une structure relativement simple. Toutefois, ni les modèles statiques (ne tenant pas compte de la dynamique), ni ces modèles « boîte noire » (valables uniquement dans la plage d'identification utilisée) ne sont adaptés pour une commande qui puisse être validée sur le plan théorique [THO 00].

Concernant les modèles de connaissance, sur la base de la bibliographie consultée, il apparaît qu'en dépit d'énormes progrès enregistrés dans ce domaine, le problème d'obtention d'un modèle de compréhension, exploitable et précis, reste d'actualité.

Les modèles des centrales sont variés et se différencient principalement par : les hypothèses posées, les équations employées, les méthodes de résolution et les moyens de calcul. Nous avons choisi de les classer ici selon leur façon de prendre en compte les changements de points de fonctionnement.

1.2.1. *Modèles linéaires*

Les équations sont dans ce cas linéarisées autour d'un point de fonctionnement (régime supposé « nominal ») [DEC 91]. Le système est alors décrit par l'interconnexion de fonctions de transfert. Deux avantages sont liés à cette approche : les difficultés et le volume de calcul sont réduits et un grand nombre de méthodes d'analyse sont utilisables. L'inconvénient est que nous ne pouvons pas simuler les variations importantes et rapides de la charge et d'autres perturbations. C'est pourquoi ce type de modèle ne peut décrire fidèlement le procédé dans ses différents régimes de fonctionnement, même si l'erreur due à la linéarisation peut être déterminée en comparant les résultats du modèle non linéaire et du modèle linéaire simplifié. Toutefois, dans l'industrie des centrales (EDF), l'opérateur utilise ce type de modèle pour la simulation (sur Matlab-Simulink par exemple) de la *conduite* du processus.

Dans [THO 00], les modèles d'identification sont également de type linéaire, variant lentement dans le temps, arbitrairement choisis d'ordre 4, et le débit d'entrée d'eau est la seule variable de commande (le flux de chauffe étant considéré comme un paramètre faisant varier le modèle linéaire).

1.2.2. *Modèles non linéaires*

Dans cette catégorie, nous distinguerons les modèles décrits par les équations à dérivées partielles (EDP) et les équations à paramètres localisés. *Les modèles non linéaires en dimension infinie* considèrent les EDP de l'hydrodynamique (conservation de la masse, de l'énergie et de quantité de mouvement), transformées par discrétisation dans le temps et dans l'espace, en équations aux différences, puis intégrées numériquement sans être linéarisées [PET 73].

Les modèles résultants permettent en principe de déterminer la réponse à des grandes perturbations. Cependant, ils ne sont considérés qu'en régime statique (par exemple, pour un débit constant d'alimentation en eau). L'inconvénient réside donc principalement dans le fait qu'ils ne permettent pas une synthèse directe des régulateurs. Ils nécessitent par ailleurs un grand volume de calcul : sur ce point, il existe

trois ordres de complexité croissante du modèle, en fonction du nombre de dimensions spatiales utilisées pour décrire les phénomènes d'écoulement (dimension 1, 2 ou 3).

Les modèles non linéaires à paramètres localisés sont très répandus dans la littérature. Parmi les premiers travaux publiés, citons [CHI 58], [PRO 55]. Dans [AST 72], on considère que l'énergie stockée dans la phase vapeur ou liquide est absorbée ou libérée rapidement lorsque la pression change. La libération (absorption) de l'énergie assure alors que la température varie avec la même dynamique dans les différentes parties du générateur de vapeur. C'est pourquoi le modèle est supposé répondre à une dynamique de premier ordre.

Puis, dans [ORD 94], le système est décrit par un ensemble d'équations différentielles et algèbro-différentielles pour chaque sous-système de la centrale sur la base des lois de conservation énergétique et massique. Les phénomènes de gonflement-tassement ne sont pas modélisés. Il faut noter aussi que ce système est caractérisé par la coexistence de plusieurs phénomènes de natures diverses. C'est pourquoi l'application d'une approche unifiée telle que les bond graphs [OUL 96] [OUL 97] [TYL 83] permet de mettre en évidence la localisation des différents phénomènes de stockage, de dissipation et de transformation d'énergie et d'affiner le modèle par simple ajout d'éléments bond graph. Les modèles sont présentés sous forme d'équations d'état non linéaires. Dans [RIM 96], la dynamique de déphasage non minimal du niveau d'un réacteur industriel à eau pressurisée est simulée par un modèle bond graph.

Un récent travail [AST 00] présente un modèle non linéaire d'un générateur de vapeur avec une attention particulière accordée à la dynamique du niveau d'eau dans le dôme de vapeur. Sur la base des équations de conservation énergétique et massique, le modèle est présenté sous forme d'équations d'état non linéaires d'ordre quatre avec un certain nombre d'équations algébriques complémentaires. Les variables d'état représentent la pression dans le dôme, le volume total de l'eau dans la chaudière, le titre de la vapeur dans les faisceaux tubulaires et le volume de la vapeur contenu dans la phase liquide du dôme.

Toutefois, des hypothèses simplificatrices y sont faites : le mélange eau-vapeur et le métal du réacteur sont considérés comme un seul élément, présentant une même dynamique. L'équation différentielle traduisant le stockage de l'énergie thermique par le corps de la chaudière est omise, ainsi que la dynamique de transfert d'énergie. Les variations de la densité vapeur et de l'enthalpie par rapport à la pression sont négligées, ce qui est peu conforme aux expressions classiques (polynômiales) de ces fonctions thermodynamiques [ORD 94]. Le gonflement-tassement est modélisé en tenant compte de la distribution de la phase vapeur et de l'eau dans le générateur de vapeur.

De façon générale, dans les travaux présentés en non linéaire, les modèles destinés à la commande ne tiennent pas compte des phénomènes de distribution. Dans [AST 00], les EDP de la conservation massique et énergétique sont certes utilisées pour évaluer le titre moyen de la vapeur dans le faisceau tubulaire, mais à l'état statique. Pourtant, le processus technologique de génération présente des retards liés entre autres au transfert de la chaleur et au transit de la vapeur dans les tuyauteries.

1.2.3. Modèles non linéaires dynamiques distribués

Sur la base de la bibliographie consultée, il apparaît donc que les modèles dynamiques et non linéaires existants sont tous du type « systèmes à paramètres localisés ». Une telle approche ne donne d'informations que sur les moyennes spatiales des variables évoluant au sein des chaudières, d'où la nécessité de faire une plus ample étude permettant de prévoir l'évolution spatio/temporelle en régime dynamique.

La présente étude vise donc à combler cette lacune en proposant l'utilisation d'EDP pour la modélisation des régimes dynamiques.

L'article est organisé comme suit :

- la première partie porte sur l'étude théorique de la résolution de l'équation de l'énergie et la mise en évidence de l'existence de retards distribués (équations de Volterra) dans la propagation de la chaleur dans un milieu quelconque;

- dans la deuxième partie sont exposés deux modèles mathématiques : un modèle à deux phases séparées, puis un modèle diphasique homogène, conduisant à la résolution de l'équation de la chaleur dans le générateur par une méthode de discrétisation numérique. Les équations aux différences issues de cette discrétisation sont intégrées sans être linéarisées;

- la troisième partie est consacrée aux simulations correspondant à un site pilote réel, qui reproduit à échelle réduite le fonctionnement des sites industriels. Les deux types de modèles obtenus dans la deuxième partie sont simulés, montrant les limitations de l'approche à phases séparées.

2. Mise en évidence théorique des phénomènes de retards dans les équations de transfert de chaleur

2.1. Equation de la chaleur

Dans les applications les plus usuelles, l'équation de bilan d'énergie, utilisée sous forme intégrale et en notation vectorielle, est :

$$\begin{aligned} \int_{V_m(t)} \rho C_p \frac{dT}{dt} dV_m &= \int_{V_m(t)} \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T \right) dV_m \\ &= \int_{V_m(t)} P dV_m - \int_{S_m(t)} (q^{cd} + q^r) dS_m, \end{aligned} \quad [1]$$

Avec :

$V_m(t)$, le volume de contrôle (variable), contenu dans la surface frontière $S_m(t)$,

P , la puissance d'une source de chaleur située dans $V_m(t)$,

ρ , la masse volumique du milieu,

C_p , la capacité calorifique,

v , la vitesse locale du fluide par rapport à l'élément de surface frontière,

q^{cd} , le flux de chaleur par conduction,

q^r , le flux de chaleur par rayonnement.

Dans un milieu quelconque, sans source de chaleur ni rayonnement et sans transfert de matière, le bilan énergétique s'écrit sous forme locale, dans le cas monodimensionnel (direction Oz), avec une conductivité thermique λ constante :

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial T}{\partial t} &= 0 \\ z &\in [a, b] \\ t &\geq 0. \end{aligned} \quad [2]$$

$\mu = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ est la diffusivité thermique exprimée en m^2/s .

2.2. Conditions initiales et aux limites

On considère initialement que la température dans le milieu est fonction de la cote z :

$$T(z, 0) = F(z). \quad [3]$$

On suppose que le milieu est délimité par des frontières a et b et qu'à ces frontières, on a deux températures imposées :

$$\begin{aligned} T(a, t) &= f_1(t) \\ T(b, t) &= f_2(t). \end{aligned} \quad [4]$$

REMARQUE. — Ces conditions aux limites sont du type Dirichlet, l'équation de la chaleur (2) peut être résolue aussi avec des conditions aux limites de type Neumann. Dans une deuxième partie, on simulera l'équation de la chaleur (2) avec ce second type de conditions aux limites.

2.3. Solution générale

La solution générale de l'équation de la chaleur [POG 66], en respectant les conditions (3) et (4), se met sous la forme de somme de trois intégrales :

$$\begin{aligned} T(z, t) &= \int_a^b \frac{\varphi(\xi)}{\sqrt{\mu t}} \exp\left[-\frac{(z-\xi)^2}{4\mu t}\right] d\xi + \\ &\quad \frac{1}{2\sqrt{\mu}} \int_0^t \frac{z-a}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{(z-a)^2}{4\mu(t-\tau)}\right] \psi_1(\tau) d\tau + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2\sqrt{\mu}} \int_0^t \frac{z-b}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{(z-b)^2}{4\mu(t-\tau)}\right] \psi_2(\tau) d\tau. \quad [5]$$

Les fonctions φ , ψ_1 et ψ_2 , qui définissent les variables d'intégration de l'équation (2), doivent être choisies de telle manière que l'équation (5) satisfasse la condition initiale (3) et les conditions aux limites (4).

Puisque les deuxième et les troisième intégrales tendent vers zéro quand t tend vers zéro [POG 66], on a :

$$\lim_{t \rightarrow 0} T(z,t) = 2\sqrt{\pi}\varphi(z) \Rightarrow \varphi(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}F(z). \quad [6]$$

L'équation (5) satisfait les conditions aux limites (4) si et seulement si, les fonctions inconnues ψ_1 et ψ_2 satisfont le système d'équations de Volterra suivant :

$$\begin{aligned} f_1(t) - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_a^b \frac{F(\xi)}{2\sqrt{\mu t}} \exp\left[-\frac{(a-\xi)^2}{4\mu t}\right] d\xi \\ = \sqrt{\pi}\psi_1(t) + \frac{a-b}{2\sqrt{\mu}} \int_0^t \frac{\psi_2(\tau)}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{(a-b)^2}{4\mu(t-\tau)}\right] d\tau, \end{aligned} \quad [7]$$

$$\begin{aligned} f_2(t) - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_a^b \frac{F(\xi)}{2\sqrt{\mu t}} \exp\left[-\frac{(b-\xi)^2}{4\mu t}\right] d\xi \\ = -\sqrt{\pi}\psi_2(t) + \frac{b-a}{2\sqrt{\mu}} \int_0^t \frac{\psi_1(\tau)}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{(a-b)^2}{4\mu(t-\tau)}\right] d\tau. \end{aligned} \quad [8]$$

Les noyaux de ces deux équations sont définis et continus quel que soit $t - \tau > 0$ et ils tendent vers zéro quand $t - \tau \rightarrow 0$.

Conformément aux investigations sur les systèmes d'équations intégrales de Volterra [POG 66], ce système a une solution unique $(\psi_1(t), \psi_2(t))$ définie quel que soit $t > 0$. Les fonctions $\psi_1(t)$ et $\psi_2(t)$ peuvent être exprimées sous la forme de somme de séries absolument et uniformément convergentes.

(7) et (8) sont des équations à retards faisant intervenir les fonctions $\psi_1(t)$ et $\psi_2(t)$ à l'instant t ainsi qu'à des instants antérieurs, soit $[0, t[$. En introduisant ces fonctions dans l'équation (5), on obtient la solution finale $T(z, t)$, satisfaisant toutes les conditions imposées.

REMARQUE. — Le système d'équations intégrales de Volterra (7) et (8) peut s'écrire sous la forme suivante ($i = 1, 2$):

$$\psi_i(t) = F_i(t) + \delta \int_0^t \sum_{j=1}^2 N_{ij}(t, \tau) \psi_j(\tau) d\tau, \quad [9]$$

où :

$$\begin{aligned}
 F_1(t) &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} f_1(t) - \frac{1}{2\pi} \int_a^b \frac{F(\xi)}{2\sqrt{\mu t}} \exp\left[-\frac{(a-\xi)^2}{4\mu t}\right] d\xi, \\
 F_2(t) &= -\frac{1}{\sqrt{\pi}} f_2(t) + \frac{1}{2\pi} \int_a^b \frac{F(\xi)}{2\sqrt{\mu t}} \exp\left[-\frac{(b-\xi)^2}{4\mu t}\right] d\xi, \\
 \delta &= \frac{b-a}{2\sqrt{\pi}\sqrt{\mu}}, \\
 N_{11}(t,\tau) &= N_{22}(t,\tau) = 0, \\
 N_{12}(t,\tau) &= N_{21}(t,\tau) = \frac{1}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \exp\left[-\frac{(a-b)^2}{4\mu(t-\tau)}\right].
 \end{aligned}$$

La solution du système (9) est unique :

$$\psi_i(t) = F_i(t) + \delta \int_0^x \sum_{j=1}^2 \mathcal{L}_{ij}(t,\tau) F_j(\tau) d\tau. \quad [10]$$

Les fonctions \mathcal{L}_{ij} sont les sommes des séries :

$$\mathcal{L}_{ij}(t,\tau) = N_{ij}(t,\tau) + \delta N_{ij}^{(1)}(t,\tau) + \dots + \delta^\nu N_{ij}^{(\nu)}(t,\tau) + \dots \quad [11]$$

et où les $N_{ij}^{(\nu)}$ sont obtenus par résolution itérative de :

$$\begin{aligned}
 N_{ij}^{(1)}(t,\tau) &= \sum_{k=1}^2 \int_{\tau}^t N_{ik}(t,\theta) N_{ij}(\theta,\tau) d\theta, \\
 N_{ij}^{(\nu+1)}(t,\tau) &= \sum_{k=1}^2 \int_{\tau}^t N_{ik}(t,\theta) N_{ij}^{(\nu)}(\theta,\tau) d\theta.
 \end{aligned}$$

2.4. Simulation

A titre d'exemple, nous avons simulé l'équation de la chaleur (2) pour une colonne d'eau chauffée à sa base et mise à l'air libre en sortie ; nous avons donc prévu une perte de chaleur par convection avec l'air libre (conditions aux limites du type Neumann). Les résultats de simulation sont représentés sur la figure 1. La figure 2 représente l'évolution de la température en entrée et en sortie de la colonne d'eau, c'est-à-dire la température de l'eau en contact direct avec le flux de chauffage et la température de l'eau à l'air libre, ainsi qu'un zoom montrant le début de l'évolution des deux températures et met en évidence le retard distribué pris par la température de sortie par rapport à celle de l'entrée.

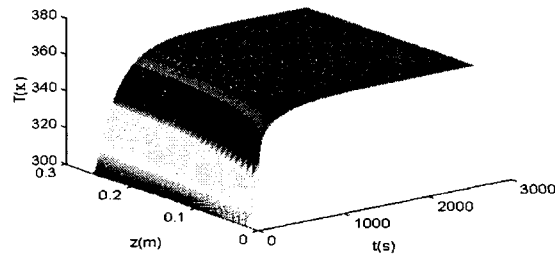


Figure 1. Evolution tridimensionnelle de la température de l'eau

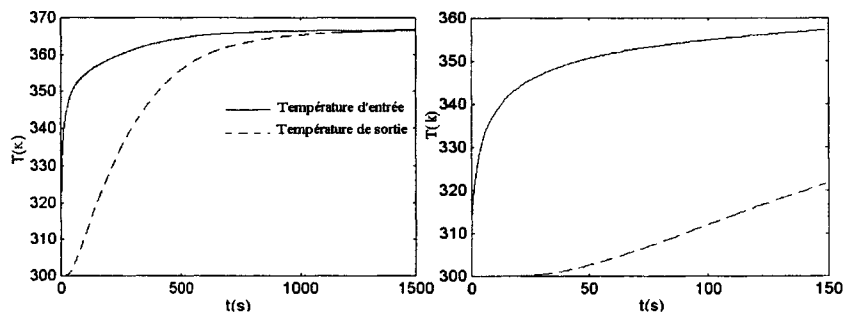


Figure 2. Evolution de la température en entrée et en sortie

3. Modélisation d'un générateur de vapeur par des EDP

3.1. Description du processus pilote

Le LAIL a conçu dans ses locaux une mini centrale thermique, d'une puissance de 60 Kw et qui reproduit, à échelle réduite, les phénomènes thermodynamiques d'une centrale réelle. Un grand nombre de capteurs et d'actionneurs appareille le site pilote (figure 3) pour le commander et le surveiller. Ils sont reliés à un ou plusieurs calculateurs selon le type d'architecture choisi. L'installation comprend une chaudière qui produit de la vapeur d'eau sous pression. La taille de l'installation ne permettant pas le fonctionnement d'une turbine, cette vapeur est donc détendue par deux vannes modulantes la vapeur détendue est refroidie par un condenseur couplé à un échangeur de chaleur. Les condensats sont acheminés vers la bêche alimentaire sur laquelle sont connectées des pompes qui alimentent la chaudière (figure 4).

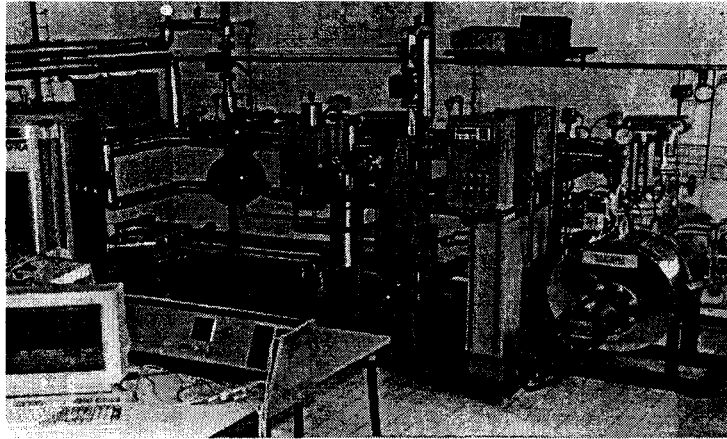


Figure 3. Photo du site pilote

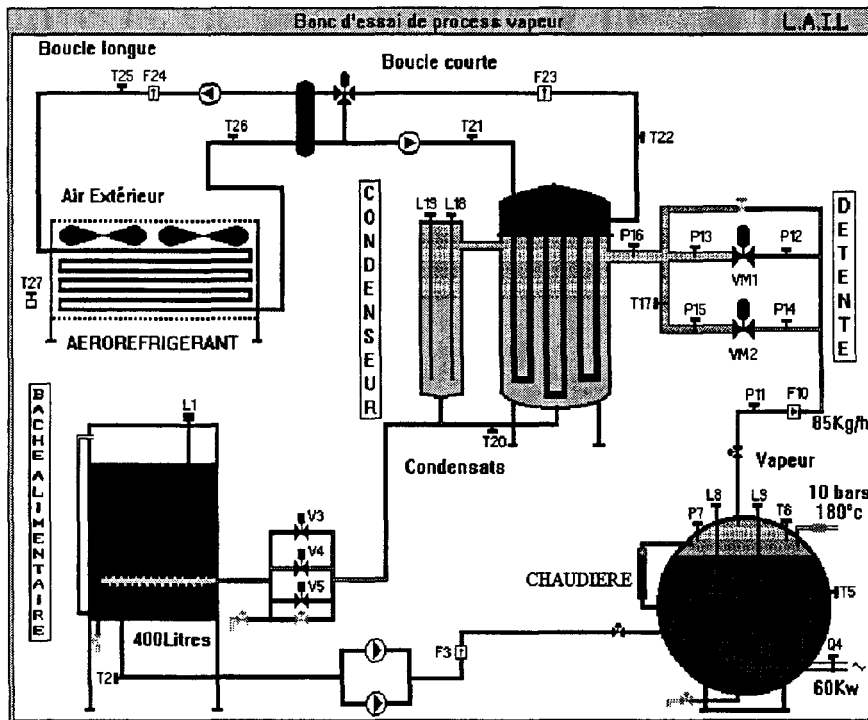


Figure 4. Synoptique général de l'installation

3.2. Premier modèle : mélange diphasique avec séparation de phases

Les hypothèses adoptées pour ce modèle sont :

- 1/ les équations du modèle sont prises dans le cas monodimensionnel;
- 2/ le liquide dans le circuit d'alimentation est incompressible (eau à température ambiante);
- 3/ on considère que les termes faisant intervenir la gravité et les frottements dans le bilan de quantité de mouvement sont négligeables par rapport aux autres termes de l'équation;
- 4/ le modèle est pris dans le cas monodimensionnel et les transformations sont considérées adiabatiques dans le générateur de vapeur (pas de pertes de chaleur par les parois);
- 5/ la modélisation ne concerne que la partie chaudière du banc d'essai (figure 4).

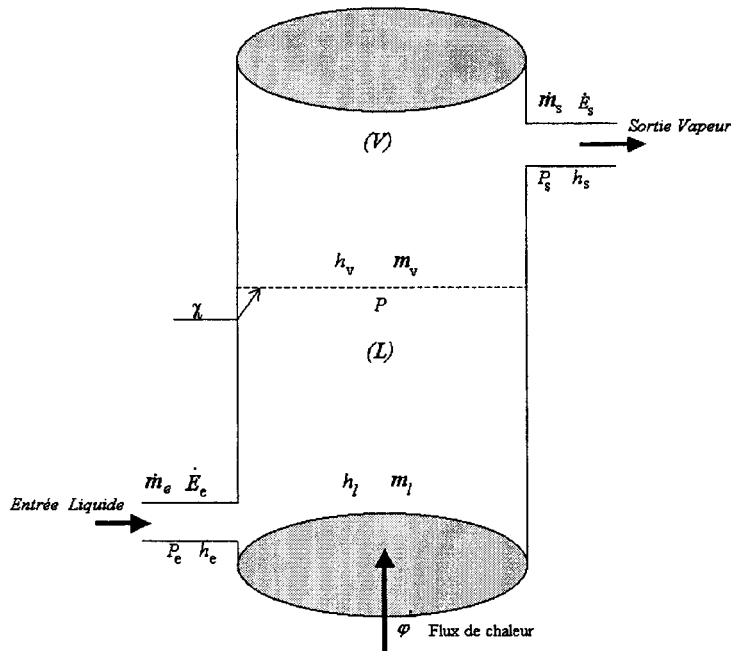


Figure 5. Schématisation des variables dans un générateur de vapeur

Cette première méthode consiste à écrire les équations de conservation (masse, énergie et quantité de mouvement) pour chaque phase prise séparément (figure 5).

On écrit ensuite les équations qui régissent les échanges entre phases, de masse, d'énergie et de quantité de mouvement.

J. M. Delhay [DEL 70], appliquant la méthode de G. Standart [STA 64] aux écoulements diphasiques, a proposé d'utiliser des équations statistiques. Dans ce cas, la production et l'écoulement des bulles vapeur sont considérés comme des phénomènes aléatoires. L'étude publiée [DEL 70] ne considère que les régimes permanents et l'application des mêmes méthodes en régimes transitoires semblerait être impossible, eu égard à la connaissance actuelle des écoulements diphasiques en prenant une approche statistique. De plus, ce genre de modèle n'est pas le mieux adapté à la commande vu qu'il n'est pas du type entrée/sortie et ne tient pas compte de la dynamique du processus physique.

La présente étude se propose de modéliser les phénomènes régissant la dynamique des phases et ceux caractérisant l'interface liquide-vapeur par des EDP. Sur le figure 5 sont représentées les variables thermodynamiques qui vont permettre d'élaborer le modèle relatif à cette première approche. La variable $\chi(t)$ joue un rôle très important dans ce modèle, sachant que c'est elle qui va définir le niveau d'eau dans le générateur de vapeur, faisant ainsi le lien entre les deux phases; elle est issue de l'équation du bilan énergétique à l'interface liquide-vapeur (plus de détails sur cette variable seront présentés dans le prochain paragraphe).

L'équation d'état non linéaire du système est mise sous la forme :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, k, t), \\ y &= g(x, u, k, t).\end{aligned}$$

où x est la variable d'état composée des variables physiques suivantes : ρ_l la masse volumique liquide, ρ_v la masse volumique vapeur, T_l la température liquide, T_v la Température vapeur, v_l la vitesse liquide, v_v la vitesse vapeur et $v_i = \frac{d\chi(t)}{dt}$ la vitesse de l'interface.

$$x = [\rho_l, T_l, v_l, v_i, \rho_v, T_v, v_v]^T.$$

u est le vecteur d'entrée :

\dot{m}_e , le débit d'eau en entrée,

\dot{m}_v , le débit de vapeur en sortie (perturbation),

φ , le flux de chauffage,

$$u = [\dot{m}_e, \dot{m}_v, \varphi]^T.$$

k le vecteur de perturbation se réduisant ici à T_{at} , la température d'eau d'alimentation $k = [T_{at}]$.

Les équations de conservation régissant ce modèle sont :

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_l \frac{\partial v_l}{\partial z} = 0,$$

$$\begin{aligned} \rho_l \frac{\partial v_l}{\partial t} + \rho_l v_l \frac{\partial v_l}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} &= 0, \\ \rho_l \left(\frac{\partial h_l}{\partial t} + v_l \frac{\partial h_l}{\partial z} \right) &= \lambda_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} + \frac{\partial p}{\partial t}. \end{aligned} \quad [12]$$

avec

ρ , la masse volumique de la phase,

v , la vitesse de la phase,

p , la pression totale,

T , la température de la phase,

λ , la conductivité thermique du milieu.

Les mêmes équations se réécrivent pour la phase vapeur sauf qu'il faut changer l'indice l en v . Ces deux systèmes d'équations ne peuvent pas être résolues indépendamment car il existe, en réalité, un phénomène d'interface entre les deux phases qui va être présenté dans la section suivante.

3.2.1. Condition d'interface

3.2.1.1. Loi de conservation généralisée

Soit un volume matériel $V(t)$ limité par une surface fermée $\Sigma(t)$ et Ψ une grandeur quelconque rapportée à l'unité de masse du fluide. La loi traduisant le bilan de la grandeur Ψ , lorsque le volume $V(t)$ comporte une surface de discontinuité $A_i(t)$, s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \Psi d\tau = - \int_{\Sigma(t)} i(\Psi) \vec{n} d\Sigma + \int_{V(t)} \rho S(\Psi) d\tau - \oint_{j(t)} T(\Psi) \vec{N} d1. \quad [13]$$

Dans cette équation, ρ est la masse volumique, $d\tau$ l'élément de volume de $V(t)$, $d\Sigma$ l'aire de la surface $\Sigma(t)$, $d1$ l'élément d'arc de $j(t)$, intersection de $\Sigma(t)$ et de $A_i(t)$, t le temps, \vec{n} le vecteur normal unitaire en un point de $\Sigma(t)$ dirigé vers l'extérieur de $V(t)$, $i(\Psi)$ le flux de la grandeur Ψ entrant à l'intérieur du volume $V(t)$ à travers $\Sigma(t)$, $S(\Psi)$ la source de Ψ à l'intérieur du volume $V(t)$, $T(\Psi)$ le flux de la grandeur Ψ entrant à l'intérieur du volume $V(t)$ à travers $j(t)$ et \vec{N} le vecteur normal unitaire à $j(t)$ situé dans le plan tangent à $A_i(t)$ ¹.

1. On retrouve la forme usuelle de l'équation du bilan de la grandeur Ψ sans surface de discontinuité en enlevant de l'équation (13) la dernière intégrale.

3.2.1.2. Interface

La condition d'interface s'obtient à partir de l'équation globale (13) dans laquelle on remplace l'intégrale curviligne par une intégrale de surface en utilisant la formule de transformation suivante :

$$\oint_{j(t)} T(\Psi)\vec{N}d1 = \int_{A_i} div[T(\Psi)\vec{U}]d\Sigma + \int_{A_i} 2T(\Psi)H\vec{n}d\Sigma.$$

où H est la courbure moyenne et \vec{U} le tenseur unité. On fait tendre la surface Σ vers la surface A_i ; on obtient ainsi une intégrale de surface étendue à A_i qui doit être identiquement nulle quel que soit A_i . La condition d'interface est alors donnée par l'équivalence à 0 de l'intégrant. Le transfert à l'interface est défini par la relation [TAI 95] :

$$\Phi_k = [\rho_k\Psi_k(\vec{v}_k - \vec{v}_i) + i(\Psi_k)]\vec{n}_k. \tag{14}$$

où \vec{n}_k est le vecteur unitaire normal à l'interface, dirigé vers l'extérieur de la phase k et \vec{v}_i, \vec{v}_k la vitesse de déplacement de l'interface. L'introduction de l'équation de transfert à l'interface (14) permet d'écrire la condition d'interface sous la forme :

$$\sum_{k=l,v} \Phi_k + div[T(\Psi_k)\vec{U}] + 2T(\Psi_k)H\vec{n}_k = 0. \tag{15}$$

Les expressions des grandeurs $\Psi_k, i(\Psi_k), S(\Psi_k)$ et $T(\Psi_k)$ pour le bilan énergétique à l'interface sont données par :

$$\begin{aligned} \Psi_k &= \frac{1}{2}\vec{v}_k^2 + E_k \\ i(\Psi_k) &= -\vec{\mu}_k \cdot \vec{v}_k + J_k \\ S(\Psi_k) &= \vec{F} \cdot \vec{v}_k \\ T(\Psi_k) &= -\sigma \cdot \vec{v}_k \end{aligned}$$

où $\vec{\mu}_k$ est le tenseur des contraintes, \vec{F} la force extérieur massique, E_k l'énergie interne massique, \vec{J}_k le flux de chaleur et σ la tension superficielle.

On considère, pour simplifier, que l'eau et la vapeur sont transparentes au rayonnement, que les puissances échangées par l'eau sous forme de travail sont négligées, que l'on n'a pas de source à l'intérieur du volume $V(t)$ et que la tension superficielle σ est très faible, de manière que les quantités en σ deviennent négligeables par rapport aux autres quantités de l'équation. Ce qui nous permet d'écrire, définitivement, pour le cas monodimensionnel et après projection :

$$\rho_l h_l(v_l - v_i) - \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial z}|_{x(t)} - \rho_v h_v(v_v - v_i) + \lambda_v \frac{\partial T_v}{\partial z}|_{x(t)} = 0, \tag{16}$$

Sachant que la vitesse à l'interface, en tenant compte de la conservation du débit massique entre les deux phases, est donnée par :

$$v_i = \left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v}\right)v_l, \tag{17}$$

Enfin, le transfert à l'interface sera comme suit :

$$-\lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial z}|_{x(t)} = -\lambda_v \frac{\partial T_v}{\partial z}|_{x(t)} + \rho_l v_l \mathcal{L}_v + v_i(\rho_l h_l - \rho_v h_v). \tag{18}$$

La différence d'enthalpie massique entre h_v et h_l est évidemment égale à la chaleur latente massique de vaporisation \mathcal{L}_v .

3.2.2. Conditions initiales et aux limites

En plus de la condition d'interface, il faut ajouter les conditions initiales et aux limites du système d'équations (12).

Pour l'équation de conservation de la quantité de mouvement, les conditions initiales des phases liquide et vapeur sont :

$$v_l(0,z) = 0 \quad \forall z \in [0,\chi(0)] \quad [19]$$

$$v_v(0,z) = 0 \quad \forall z \in [\chi(0),H] \quad [20]$$

Les conditions aux limites des phases liquide et vapeur sont :

$$v_l(t,0) = \begin{cases} 0 & \text{si } \chi(t) > \chi_{ref} \\ \frac{\dot{m}_e}{\rho_l S} & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall t > 0 \quad [21]$$

χ_{ref} étant le niveau d'eau de référence dans la chaudière.

$$v_v(t,\chi(t)) = v_l(t,\chi(t)) \frac{\rho_l(t,\chi(t))}{\rho_v(t,\chi(t))} \quad \forall t > 0 \quad [22]$$

Pour l'équation de conservation de l'énergie, les conditions initiales des phases liquide et vapeur sont :

$$T_l(0,z) = T_i \quad \forall z \in [0,\chi(0)] \quad [23]$$

$$T_v(0,z) = T_i \quad \forall z \in [\chi(0),0] \quad [24]$$

les conditions aux limites des phases liquide et vapeur sont :

$$-\lambda S \frac{\partial T_l}{\partial z} = \varphi \quad [25]$$

où S désigne la section du générateur de vapeur et φ la puissance de chauffe.

La variation de pression provoquée par la section de sortie vapeur se calcul par :

$$\Delta p_v = \zeta_0 \rho_v \frac{v_v^2}{2} = C_0 \frac{\dot{m}_v^2}{2\rho_v} \quad [26]$$

ζ_0 et C_0 étant des termes dépendants du coefficient de contraction C_c et du rapport de la section du générateur S et de la section de la conduite de sortie de la vapeur A_0 [LAM 00].

Dans cette dernière équation, la pression de vapeur p_v s'exprime en fonction de la température T_v .

Pour les conditions initiales et aux limites des masses volumiques liquide et vapeur, nous avons :

$$\begin{aligned}
 \rho_l(0,z) &= \rho_{li} \\
 \rho_v(\chi_0,z) &= \rho_{vi} \\
 \rho_l(t,0) &= \rho_l(T_l(t,0)) \\
 \rho_v(t,\chi(t)) &= \rho_v(T_v(t,\chi(t)))
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

3.2.3. *Mise sous forme d'équations d'état*

Sachant que les enthalpies spécifiques h_l et h_v peuvent s'écrire sous forme polynômiale en fonctions des températures T_l et T_v [ORD 94] :

$$\begin{aligned}
 h_l &= a_l T_l + b_l \\
 h_v &= a_v T_v + b_v
 \end{aligned}$$

le système d'équations (12) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho_l \\ v_l \\ T_l \\ \rho_v \\ v_v \\ T_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho_l \frac{\partial v_l}{\partial z} \\ -v_l \frac{\partial v_l}{\partial z} - \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial \rho_l} \frac{\partial \rho_l}{\partial z} \\ -\frac{v_l}{a_l \rho_l} \frac{\partial T_l}{\partial z} + \frac{\lambda_l}{a_l \rho_l} \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} \\ -\rho_v \frac{\partial v_v}{\partial z} \\ -v_v \frac{\partial v_v}{\partial z} - \frac{1}{\rho_v} \frac{\partial p}{\partial \rho_v} \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \\ -\frac{v_v}{a_v \rho_v} \frac{\partial T_v}{\partial z} + \frac{\lambda_v}{a_v \rho_v} \frac{\partial^2 T_v}{\partial z^2} \end{bmatrix}
 \tag{28}$$

3.3. *Deuxième modèle : mélange diphasique homogène*

Cette méthode considère des équations globales appliquées simultanément aux deux phases. Ces équations doivent être complétées par une corrélation du taux de vide. En écoulement diphasique homogène, nous supposons que l'eau et la vapeur sont en équilibre thermodynamique.

Cette hypothèse, toujours admise dans les modèles de générateurs de vapeur, est généralement justifiée par le fait suivant : l'écoulement dans les générateurs de vapeur industriels étant toujours turbulent, il se produit une bonne homogénéisation de l'émulsion.

La modélisation ne concerne que la partie chaudière du banc d'essai (figure 4).

L'équation d'état non linéaire du système est mise sous la forme

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= f_1(x,u,k,t) \\
 y &= g_1(x,u,k,t)
 \end{aligned}$$

où x est la variable d'état composée des variables physiques suivantes : p la pression de l'émulsion, v_l la vitesse liquide, v_v la vitesse vapeur.

$$x = [p, v_l, v_v]^T$$

u est le vecteur d'entrées comportant

\dot{m}_e , le débit d'eau en entrée,

\dot{m}_v , le débit de vapeur en sortie (perturbation),

φ , le flux de chauffage,

$$u = [\dot{m}_e, \dot{m}_v, \varphi]^T$$

et $k = T_{al}$, la température d'eau d'alimentation.

3.3.1. Conservation de la masse

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial z} = 0 \quad [29]$$

$\bar{\rho}$, la masse volumique moyenne du mélange,

\bar{G} , la densité du débit moyen,

$$\bar{\rho} = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l,$$

$$\bar{G} = \alpha \rho_v v_v + (1 - \alpha) \rho_l v_l,$$

ρ_v, ρ_l , les masses volumiques respectivement de la vapeur et du liquide, v_v et v_l , les vitesses des deux phases.

3.3.2. Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \bar{G}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial z} + \bar{\rho}g + F = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad [30]$$

où :

$$\bar{\varphi} = \alpha \rho_v v_v^2 + (1 - \alpha) \rho_l v_l^2,$$

α représente le taux de vide,

$$F = f \frac{\bar{G}^2}{4\bar{\rho}r},$$

f le coefficient de perte de charge par frottement et F la variation de pression par frottement, calculée par l'équation de Fanning [DAN 78], r étant le rayon de l'évaporateur.

3.3.3. Conservation de l'énergie

$$\bar{\rho} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \bar{G} \frac{\partial \bar{h}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial t} = E + \frac{\partial p}{\partial t} \quad [31]$$

\bar{h} est l'enthalpie moyenne du mélange E désigne le terme de diffusion donné par $\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$

avec :

$$\bar{h} = X h_v + (1 - X) h_l,$$

$$\bar{\psi} = (h_v - h_l) [\alpha (1 - X) \rho_v - (1 - \alpha) X \rho_l],$$

X la qualité de la vapeur donnée par :

$$X = \frac{\alpha \rho_v v_v}{\alpha \rho_v v_v + (1 - \alpha) \rho_l u_l} \quad [32]$$

3.3.4. Corrélation du taux de vide

En équilibre local, nous considérons que le taux de vide est nul, puisque nous supposons l'équilibre thermodynamique entre phases. En réalité, des bulles de vapeur se forment dans la couche liquide surchauffée au voisinage de la paroi et se condensent dans le reste du liquide sous-saturé [MAC 61].

En ébullition en masse, on emploie la corrélation d'Armand modifiée par Massena [AXE 72], qui est fondée sur des bases théoriques et expérimentales :

$$\alpha = \frac{(0.833 + 0.167X) X}{X + (1 - X) \frac{\rho_v}{\rho_l}} \quad [33]$$

3.3.5. Coefficient de perte de charge par frottement

En simple phase, il est calculé par la corrélation de E.C.Koo [MAC 61] valable pour un nombre de Reynolds compris entre $3 \cdot 10^3$ et $3 \cdot 10^6$:

$$f = 0.0056 + \frac{0.5}{R_e^{0.32}} \quad [34]$$

En écoulement diphasique homogène, on emploie la corrélation d'Armand [ARM 59], pour une pression $p > 8$ bars et une qualité $X < 0.9$.

$$\begin{aligned} f &= \left(0.0056 + \frac{0.5}{R_e^{0.32}} \right) \frac{1}{(1 - \alpha)^{1.42}} \quad \text{si } 0.39 < 1 - \alpha < 1 \\ f &= \left(0.0056 + \frac{0.5}{R_e^{0.32}} \right) \frac{0.478}{(1 - \alpha)^{2.2}} \quad \text{si } 0.1 < 1 - \alpha \leq 0.39 \\ f &= \left(0.0056 + \frac{0.5}{R_e^{0.32}} \right) \frac{1.73}{(1 - \alpha)^{1.64}} \quad \text{si } 0 < 1 - \alpha \leq 0.1 \end{aligned} \quad [35]$$

3.4. Mise sous forme d'équation d'état

La résolution du système (32)-(33) en X et α met ces dernières variables en fonction de v_l , v_v et p , en examinant les tables de saturation eau/vapeur [ORD 94], on écrit les masses volumiques ρ_l et ρ_v et les enthalpies spécifiques h_l et h_v , en fonction de la pression p .

Cette remarque nous permet d'écrire, finalement, notre système d'équations (29), (30) et (31) en fonction des trois variables v_l , v_v et p , qui seront, dans notre cas, les variables d'état du système. Ce résultat nous permettra, après résolution du système considéré, d'obtenir toutes les variables thermodynamiques dans le générateur de vapeur. Après avoir effectué tous les changements, le système d'équation issu de (29), (30) et (31) devient :

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial t} \\ \frac{\partial v_l}{\partial t} \\ \frac{\partial v_v}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}, \quad [36]$$

A_i , B_i et C_i sont fonction de p , v_l et v_v ,

$$f_i = f_i(p, v_l, v_v, \frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial v_l}{\partial z}, \frac{\partial v_v}{\partial z}, \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}).$$

Après une inversion formelle de la matrice dans (36), on obtient le système final à discrétiser :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} p \\ v_l \\ v_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial z} \\ \frac{\partial v_l}{\partial z} \\ \frac{\partial v_v}{\partial z} \\ \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \end{bmatrix} \quad [37]$$

a_i , b_i , c_i et d_i sont fonction de p , v_l et v_v ,

4. Simulation

La méthode de résolution des équations aux dérivées partielles non linéaires la plus utilisée est la méthode aux différences finies et c'est celle que nous emploierons.

Afin de simuler le modèle à EDP donné par le système d'équations (37), on utilise une méthode aux différences finies explicite [RAP 98] ; il faut noter que dans le cas général, le choix dépend en fait du type d'équations à résoudre.

Les méthodes explicites nécessitent en général un pas de calcul inférieur à une valeur limite, pour que la résolution soit stable, ce qui impose un temps de calcul très long, mais permet d'avoir une bonne précision de la solution.

Les méthodes implicites permettent l'utilisation de pas de calcul supérieurs à ceux employés par les méthodes explicites avec un temps de calcul moindre, même si dans ce cas, la précision est moins bonne. Ce dernier schéma est inconditionnellement stable [RAP 98]. Par contre, il nécessite, à chaque pas de temps, la résolution d'un système matriciel linéaire.

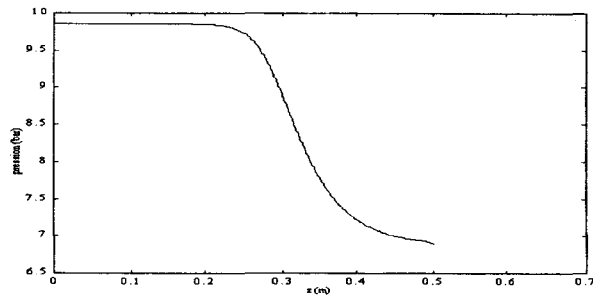


Figure 6. Evolution de la pression dans le GV

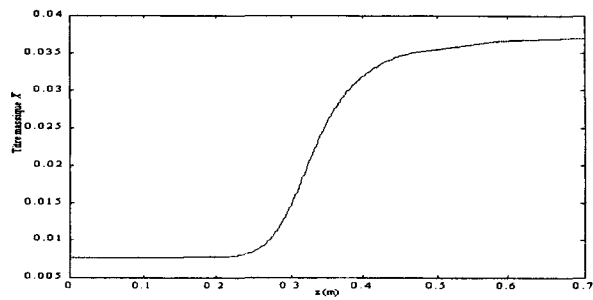


Figure 7. Evolution du titre massique dans le GV

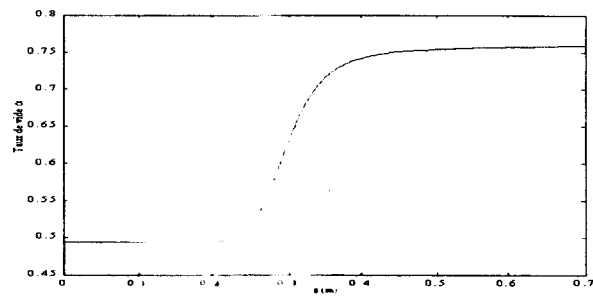


Figure 8. Evolution du taux de vide dans le GV

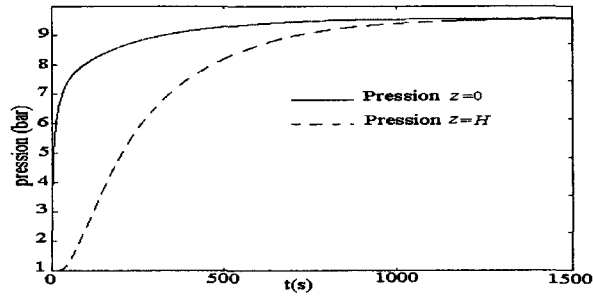


Figure 9. Evolution de la pression dans le GV en fonction du temps

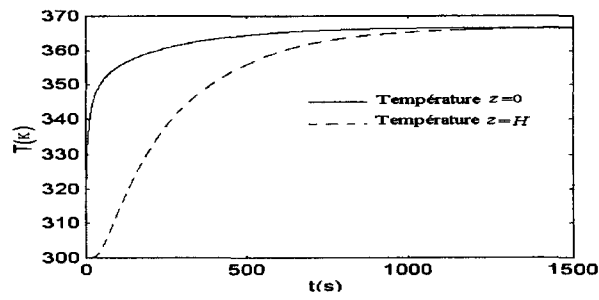


Figure 10. Evolution de la température dans le GV en fonction du temps

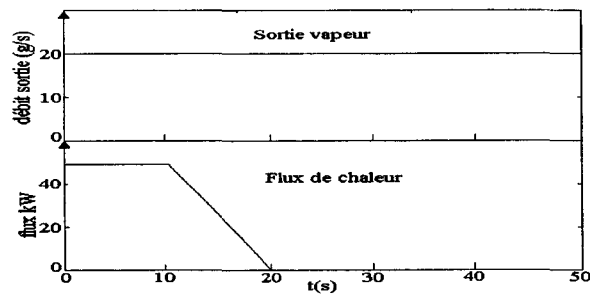


Figure 11. Puissance de chauffe et débit de sortie vapeur dans le GV

Dans la simulation présentée aux figures 6 à 10, le modèle utilisé est de type diphasique homogène (37). Les conditions d'expérimentation sont les suivantes (conditions aux limites) :

- l'entrée de commande (flux de chaleur) est décrite par la figure 11;
- l'entrée de perturbation (débit de sortie) est constante figure 11.

Les variables de sortie représentées en fonction de la hauteur z et/ou du temps t , sont la pression figure 6, le titre massique figure 7, le taux de vide figure 8, la pression et la température en bas et en haut de la chaudière figures 9 et 10.

On constate bien que :

1/ le titre massique et le taux de vide augmentent avec la chauffe et avec le hauteur (conformes avec la réalité physique);

2/ la pression en $z = 0$ et $z = H$ fait apparaître un phénomène de retard (de diffusion); elle nous permet de quantifier ce retard en vue d'obtenir un modèle entrée-sortie simplifié (localisé) pour la commande;

3/ la température en $z = 0$ et $z = H$ évolue de la même manière que la pression dans le mélange (équilibre thermodynamique respecté);

4/ les phénomènes de gonflement et de tassement ne sont pas visibles vu les faibles dimensions de la chaudière étudiée.

Ces observations sont conformes à la réalité physique des phénomènes thermodynamiques régissant la chaudière.

5. Conclusion

La résolution théorique de l'équation de la chaleur dans un milieu quelconque prouve l'existence de phénomènes de retards distribués dans la propagation de la chaleur, qui apparaissent clairement sur la simulation (figure 2). Ce résultat générique a été appliqué à la propagation de la chaleur dans une chaudière de générateur de vapeur, suivant deux approches à base d'EDP non linéaires :

-/ dans l'une, l'hypothèse faite est celle de deux phases, liquide et vapeur, indépendantes. Cette approche pourrait sembler intéressante pour des générateurs de grande hauteur : elle pose cependant d'importants problèmes de simulation, dus à la discontinuité au passage de la frontière liquide-vapeur. Elle nécessite par ailleurs des hypothèses trop restrictives pour sembler suffisamment réalistes. Ce premier modèle est donc moins apte à satisfaire notre besoin de connaissance des phénomènes existants dans un générateur de vapeur;

-/ dans l'autre approche, le mélange est considéré comme diphasique homogène ; ce point de vue permet de traiter de façon plus réaliste le cas d'un générateur quelconque, même de petite taille. Dans son principe, ce modèle exige moins d'hypothèses (incompressibilité du fluide d'alimentation et équilibre thermodynamique du mélange)

et nous donne une meilleure appréciation concernant l'évolution des variables thermodynamiques au sein de la chaudière et une meilleure compréhension des phénomènes existants dans celle-ci : entre autres, les phénomènes de gonflement-tassement pourraient apparaître pour des dimensions de chaudières suffisamment importantes. De plus, la simulation numérique de ce type de modèle pose finalement moins de problèmes de réglage.

Qu'un modèle plus fin soit plus facile à mettre en œuvre peut sembler paradoxal; cependant, ceci peut s'interpréter comme un meilleur respect de la réalité physique, continue, de l'évolution des variables au sein de la chaudière.

Nous pouvons donc conclure que ce travail fournit un modèle dynamique, non linéaire, et donnant accès à des informations internes importantes bien que non mesurables sur le processus réel : hauteur d'eau, répartitions du titre massique de la vapeur et des températures dans la chaudière.

Sur ces bases, une troisième approche serait intéressante à envisager : celle de deux phases distinctes séparées par une zone diphasique.

6. Bibliographie

- [AMB 96] AMBOS P., DUC G., FALINOWER C. M., « Loop shaping H_{∞} design applied to the steam generator level control in EDF nuclear power plants », *fifth IEEE Conference on Control Applications*, Dearbon, Michigan, 1996, p. 751-756.
- [ARM 59] ARMAND A. A., TRESHCEV G. G., « Investigation of resistance during the movement of steam-water mixtures in a head boiler pipe and high pressure », *Association of Environmental and Resource Economists*, vol. 4, n° 6, 1959, p. 765-795.
- [AST 72] ASTRÖM K. J., EKLUND K., « A simplified non linear model of drum boiler-turbine unit », *Int. Journal of Control*, vol. 16, 1972, p. 145-169.
- [AST 00] ASTRÖM K. J., BELL R. D., « Drum-boiler dynamics », *Automatica*, vol. 36, 2000, p. 363-378.
- [AXE 72] AXELSON, ROUHANI, « Correlation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 13, n° 2, 1972, p. 383-393.
- [CHI 58] CHIEN K. L., ERGIN E. I., LING C., LEE A., « Dynamic analysis of a boiler », *Transaction of ASME*, vol. 80, 1958, p. 1809-1819.
- [DAN 78] DANSAC B., « Modèle mathématique d'un générateur de vapeur pour centrale nucléaire », Thèse de doctorat, Université de Paris XI, 1978.
- [DEC 91] DECLERCK P., « Analyse structurale et fonctionnelle des grands systèmes. Application à une centrale PWR 900MW », Thèse de doctorat, Université de Lille I, 1991.
- [DEL 70] DELHAY J. M., « Contribution à l'étude des écoulements diphasiques eau-air et eau-vapeur », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 1970.
- [KLE 86] KLEFENZ G., *Automatic control of steam power plants*, Bibliographisches institut, 3rd ed. édition, 1986.
- [KOT 00] KOTHAR M. V., METTLER B., MORARI M., BENDOTTI P., FALINOWER C., « Level control in the steam generator of a nuclear power plant », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, n° 1, 2000, p. 55-69.

- [KWA 93] KWATNI H. G., BERG J., « Drum level regulation at all loads », *In Preprints IFAC 12th world congress*, vol. 3, Sydney Australie, 1993, p. 405-408.
- [LAM 00] LAMIRI S., « Modélisation de procédés de génération de vapeur en dimensions finie et infinie », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologie de Lille I, 2000.
- [LIT 99] LITWAK R., OULD-BOUAMAMA B., STAROSWIECKI M., « Modélisation et surveillance d'un générateur de vapeur », *Journal Européen des Systèmes Automatisés JESA*, vol. 33, n° 5-6, 1999, p. 611-650.
- [MAC 61] MAC-ADAMS W. H., *Transmission de chaleur*, Dunod, 1961.
- [ORD 94] ORDYS A. W., PIKE A. W., JOHNSON M. A., KATEBI R. M., GRIMBLE M. J., *Modelling and Simulation of Power Generation Plants*, Springer Verlag, 1994.
- [OUL 96] OULD-BOUAMAMA B., DAUPHIN-TANGUY G., « Bond graph model of a steam generator process and its environment », *ESM'96, SCS*, Budapest, 2-6 Juin 1996, p. 238-242.
- [OUL 97] OULD-BOUAMAMA B., THOMA J. U., CASSAR J. P., « Bond graph modelisation of steam condensers », *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetic*, Orlando USA, 12-15 Octobre 1997, p. 490-494.
- [OUL 00] OULD-BOUAMAMA B., STAROSWIECKI M., RIERA B., CHERIFI E., « Multi-Modelling of industrial steam generator », *Revue Control Engeneering Practice*, , 2000.
- [PAR 95] PARRY A., PETETROT J. F., VIVIER M. J., « Recent progress in sg level control in french power plants », *International Conference on boiler dynamics and control in nuclear power stations*, British Nuclear Energie Society, 1995, p. 81-88.
- [PET 73] PETETROT J. F., « Modélisation d'un générateur de vapeur d'une centrale nucléaire », Thèse de doctorat, Université de Paris XI, Orsay, 1973.
- [POG 66] POGORZELSKI W., *Integral equations and their application*, Oxford New York Pergamon, 1966.
- [PRO 55] PROFOS P., « Dynamics of pressure and combustion control in steam generators », *Sulzer Technical Review*, vol. 37, n° 4, 1955, p. 1-15.
- [RAP 98] RAPPAZ J., PICASSO M., *Introduction à l'analyse numérique*, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [RIM 95] RIMAUX S., OULD-BOUAMAMA B., DAUPHIN-TANGUY G., « Modélisation des centrales nucléaires par bond graph. Partie I : Analyse du modèle existant Lyliam », rapport scientifique n° 1-2-3-4, Decembre 1995, ECL-EDF.
- [RIM 96] RIMAUX S., OULD-BOUAMAMA B., DAUPHIN-TANGUY G., « Bond Graph Model of the Shrink and Swell phenomenon in a PWR Nuclear Power Plan », *IEEE-SMC, IMACS Multiconference CESA'96*, Lille, 9-12 Juillet 1996, p. 288-292.
- [STA 64] STANDART G., « The mass, momentum and energy equations for heterogeneous flow systems », *Chemical Ingeneering Science*, vol. 19, n° 3, 1964, p. 227-236.
- [TAH 93] TAHA O., « Commande automatique robustesse du générateur de vapeur REP », Thèse de doctorat, INP Lorraine, 1993.
- [TAI 95] TAINÉ J., PETIT J. P., *Transferts thermiques*, Dunod édition, 1995.
- [THO 00] THOMA J. U., OULD-BOUAMAMA B., *Modeling and simulation in thermal and chemical engineering. Bond-Graph approach*, Springer Verlag, 2000.
- [TYL 83] TYLEE L., « Pseudo bond-graph representation of PWR pressurised dynamic », *Trans ASME J. Dynamic System Mesure Control*, vol. 105, 1983, p. 255-261.

BOND GRAPH ANALYSIS OF STRUCTURAL FDI PROPERTIES IN MECHATRONICS SYSTEM

B. Ould Bouamama * G. Dauphin-Tanguy **
M. Staroswiecki * D. Del Amo Bravo **

* LAIL, UPRESA CNRS 8021, USTL, Bât. EUDIL
59655 Villeneuve d'Ascq, France
belkacem.bouamama@univ-lille1.fr, Tel: (+33) 3 20 33 71 39,
Fax: (+33) 3 20 33 71 89

** Ecole Centrale de Lille, BP 48
59651 Villeneuve d'Ascq, France
gdt@ec-lille.fr

Abstract: This paper deals with structural fault detection and isolation (FDI) properties using bond graph approach and residual tree. Two graphical methods to generate analytical redundancy relations (RRA), used for FDI are presented. The first one is based on the bond graph using. The second one is interested in the exploitation of residual trees. Based on the limits of exposed methods, is proposed an oriented residual tree to generate directly the relations which lead to the RRAs. *Copyright ©2000 IFAC*

Keywords: Fault detection and isolation, bond graph, structural, mechatronics, residual tree, bipartite graph.

1. INTRODUCTION

A mechatronics system is composed of multi domain components energy (mechanical, electrical, pneumatic....) which exchange multi domain powers. Such systems appear in many processes with risk such as nuclear, and chemical ones. The improvement of their safety essentially rests on fault detection and isolation (FDI) procedures, which mainly consist in the comparison of the actual behavior of the system with reference behaviors describing the normal operation (for fault detection) or different kinds of faulty ones (for fault isolation). The system FDI scheme is composed of a characterization and a decision step. Using a model based method, the first step generates a set of residuals called Analytical redundancy rela-

tions (RRA) which express the difference between information provided by the actual system and that delivered by its normal operation model. The residuals characterize the system operating mode: close to zero in normal operation, different from zero in faulty situations. Different approaches for the design of FDI procedures have been developed, depending on the kind of knowledge used to describe the plant operation.

The structural analysis, which only keeps information about constraints acting on variables allows to take into account system non linearities, and non additive faults. This method is interesting for large scale systems described by a great variety of types of relationships: qualitative or quantitative, linear or non linear, static or dynamic. Then the system modeling is an important step of the fault indicators generation procedure.

⁰ 1st IFAC Conference on Mechatronic Systems, Vol. 3, pp.1057-1062, 18-20 september 2000, Darmstadt (Germany).

The bond graph is a modeling and simulation tool, providing many possibilities. It allows both a structural and a behavioral system analysis. Thanks to its causal properties, it is of great interest to see the bond graph contribution to the system monitoring.

The present paper deals with structural FDI properties using bond graph approach and residual tree. Two graphical methods to generate analytical redundancy relations (RRA) are presented. The first one concerns the bond graph use. The second one is interested in the exploitation of residual trees. Based on the limits of the exposed methods, an oriented residual tree is proposed to generate directly the relations which leads to the RRAs.

The first part of the paper presents briefly the bond graph modelling and its model structure knowledge using a simple example for illustration. In the second section is presented the bond graph use for monitoring. The limits of different methods are exposed. The third part deals with RRAs generation from residual tree. A new method based on an oriented residual tree is presented. Finally a conclusion is given.

2. BOND GRAPH MODELLING

2.1 Introduction

The mechatronic systems are governed by many effects of different engineering disciplines and various technological components. This is why the bond graph modelling as unified approach is well suited for this kind of process. The bond graphs used for modelling this kind of energy occurred in mechatronics system (electrical, mechanical) are the so called true bond graphs because the product of effort (tension, torque) and flow variables (current, velocity) gives the instantaneous power transferred along a bond. This type of bond graph, well developed in the literature (Borne *et al.*, 1992) (Paynter, 1961) (Rosenberg and Karnopp, 1972) (Thoma, 1975). The model can be introduced in a graphical form and simulated using special software (Twentesim, 1996). However, bond graph modelling in process engineering systems such as thermo-fluid, biological and chemical engineering can be represented usefully as pseudo bond graphs where the product of effort and flow variable is not a power. Some research work have been published in this area (Karnopp and Azerbaijani, 1981) (Karnopp *et al.*, 1990) (Thoma and Ould-Bouamama, 2000).

In order to illustrate the bond graph analysis of structural FDI properties, let us consider a simple electrical example given by the its schema and causal bond graph models (fig. 1). The integral

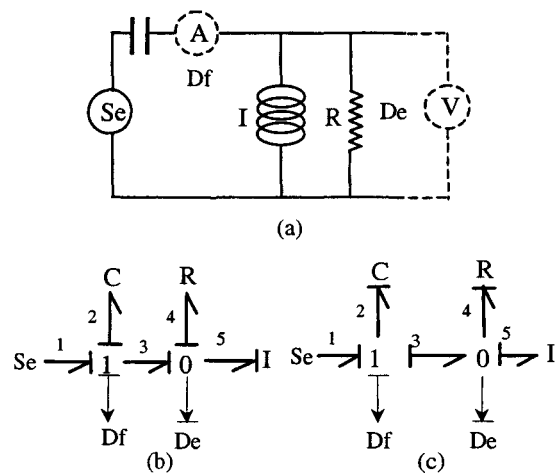


Fig. 1. Bond graph model of electrical system in integral (a) and derivative (b) causality

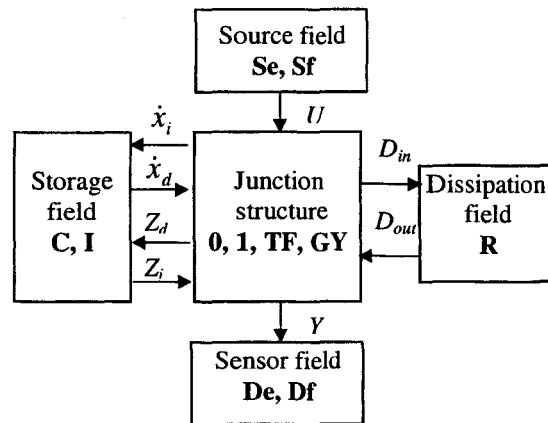


Fig. 2. Vectorial representation of a bond graph model

causality (fig. 1b) is recommended for engineering simulation in order to avoid the numerical problem relation with differentiation. The derivative causality (fig. 1c) is more used in RRA expression to avoid initial conditions influence. The current and the tension are measured respectively by the flow sensor (Df) and effort sensor (De). The sensors assumed to be ideal, are connected to the junction structure by means of signal arrows indicating that there is no power transfer between the system and sensors. The bond graph model is given here in integral causality.

2.2 Model Structure Knowledge

The bond graph is an advantageous modelling tool because it exhibits both the structure and the behavior of the studied system. The bond graph model can be represented in a vectorial way (fig.2) showing the junction structure and the different fields it is composed of.

The keys vectors associated with the representation are: X : the state vector (generalized momentum "p" on "I-element" and generalized displacement "q" on "C-element") divided into x_i and x_d , the subvectors respectively associated with the components in integral and derivative causality. \dot{X} : the time derivative of the state vector divided into \dot{x}_i and \dot{x}_d . Z : The complementary state vector ("f" on "I" and "e" on "C") divided into Z_i and Z_d . U : Source input vector. Y : Sensor output vector. D_{in} : input vector to "R" field. D_{out} : output vector from "R" field.

This representation leads to the junction structure matrix S such that:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ Z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_i \\ \dot{x}_d \\ D_{out} \\ U \end{bmatrix} \quad (1)$$

The matrix S has $(n_C + n_S)$ rows, where n_C and n_S are respectively the numbers of components (I, R or C) and sensors in the systems (De and Df). This matrix is composed of 0, -1, +1, m , r or $1/m$ and $1/r$. m and r are the moduli of transformer TF and gyrator GY elements.

In our case, the vectors associated with the bond graph model in derivative causality given by the figure 1c are:

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= [f_2 \ e_5]^t, \quad \dot{x}_i = []^t, \quad Z_d = [e_2 \ f_5]^t, \\ Z_i &= []^t, \quad D_{out} = [f_4]^t, \quad D_{in} = [e_4]^t \\ U &= [Se]^t, \quad Y_{out} = [De \ Df]^t \end{aligned} \quad (2)$$

$$V = [Se \ e_2 \ e_5 \ e_4 \ f_5 \ f_4 \ f_2 \ De \ Df]^t$$

We obtain:

$$\begin{bmatrix} Z_d \\ D_{in} \\ Y \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} e_2 \\ f_5 \\ e_4 \\ Df \\ De \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ e_5 \\ f_4 \\ Se \end{bmatrix} \quad (3)$$

If the system is linear, some relation can be stated as $Z_d(s) = H'(s) \cdot \dot{x}_d$ and $D_{out} = LD_{in}$:

$$\begin{bmatrix} f_2 \\ e_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cs & 0 \\ 0 & Is \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ f_5 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$f_4 = \frac{1}{R} e_4$

In the general case, we have also the following relation:

$$Z_i(s) = H(1/s) \dot{x}_i \quad (5)$$

L , $H'(s)$ and $H(1/s)$ are square matrices, s and $1/s$ are the Laplace operators for time derivation and time integration .

3. BOND GRAPH USE FOR MONITORING

3.1 Introduction

From the control point of view, some structural properties (controllability, observability) deduced graphically directly from a bond graph model have been exposed in (Sueur and Dauphin-Tanguy, 1991). Moreover, this method allows to determine the sensor location in order to make the system structurally observable or and controllable.

From the FDI and supervision point of view, the causal properties of the bond graph model were initially used for the determination of the origin of the faults. In (Kohda and H. Fujihara, 1993), the bond graph modelling is used not only in order to determine the faults causes of faults, but also in order to quantify the effects of component fault using the qualitative description of the system.

The bond graph model can also be used to obtain mathematical and graphical representation which will be the background for ARR design (Tagina *et al.*, 1995) (Mosiek and Dauphin-Tanguy, 1996) (Tagina, 1995). The bond graph model is directly used in order to detect a monitoring ability problem of before calculating the RRAs

3.2 Matricial representation

The structural matrix S and the input-output laws of all the components yield to the new matrix M which contains all the relations linking the system variables and constitutes a polynomial model of the system. It is defined by $M = \begin{bmatrix} S & -I \\ I & M' \end{bmatrix}$:

$$M = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & -I_1 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & -I_2 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 & -I_3 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & 0 & 0 & 0 & -I_4 \\ I_1 & 0 & 0 & 0 & -H(1/s) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & -H'(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

M' regroups the input-output relations of all the components of the system, such that $M'V = 0$ is satisfied.

The structure expresses the presence or the absence of relations between variables. The existence of relations is characterized by a non null term of the M -matrix. Then this matrix represents a set of $(2n_c + n_s)$ equations to determine the $2n_c$ unknowns. There is an over determination if the number of sensors $n_s \neq 0$. The independence of the different rows of the M -matrix is insured by the presence of the unit matrices I_1 , I_2 , I_3 and I_4 .

The M matrix may be associated with a bipartite graph composed of the variables set V and the relation set F_i . The polynomial model obtained for the bond graph (fig. 1c), by replacing all non null matrix terms by 1 is given by:

$$M^* = \begin{matrix} & f_2 & e_5 & f_4 & s_c & e_2 & f_5 & e_4 & Df & De \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_5 \\ F_2 \\ F_7 \\ F_8 \\ F_6 \\ F_3 \\ F_4 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right. & (7) \end{matrix}$$

This representation allows the construction alternated chains as presented by the following figure 3.

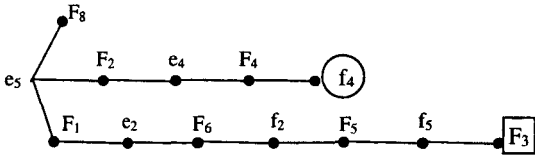


Fig. 3. Alternated chain deduced from the polynomial matrix

where : F_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) is the used relationship. The system is described by a set of F variables which can be split into known variables (measurements C) and unknowns ones X :

$$C = [Se \ De \ Df]^t, \quad X = [e_2 \ e_5 \ e_4 \ f_5 \ f_4 \ f_2]^t$$

in figure 3 $F_j - v$ means that the variable "v" is expressed in terms of known variables thanks to the relationship F_j . F_k in the square (see figure 3) means that all variables in F_k are expressed in terms of known variables leading to an ARR.

Let consider an example of ARRs obtained with this method. If we start with the relationship F_8 , the ARR obtained from figure 3 is (read from the left to the right in the figure 3):

$$\begin{aligned} F_8 : e_5 &= De \\ F_2 : e_4 &= De \\ F_4 : f_4 &= (1/R)De \\ F_1 : e_2 &= Se - De \\ F_6 : f_2 &= Cs(Se - De) \\ F_5 : f_5 &= Cs(Se - De) - (1/R)De \\ F_3 : e_5 &= Is(Cs(Se - De) - (1/R)De) \end{aligned} \quad (8)$$

The unknown variable x_i is evaluated solving the constraint relation F_i only under the hypothesis that all the variables associated with this constraint relation are known. In this way, according to figure 3, when the variable f_4 is reached, the relationship F_5 can not be solved because there is more than one unknown variable. The branch

covering is then stopped and one wait for the second branch in order to solve F_5 , once f_2 and f_4 are known. Finally, F_3 is reached where all variables are known allowing to obtain the RRA.

This method does not take into account the bond graph causality, because the alternated chain does not follow the causal path. The starting relation is not unique and leads to a particular alternated chain.

3.3 Covering of causal paths

In (Tagina, 1995) is proposed a method to generate ARRs from a bond graph model using covering causal path. The "0" and "1" junctions are connecting elements submitted respectively to common effort and common flow and an algebraic sum of the efforts (respectively flow) vanishes. The goal is to study all the causal paths relating the considered junction to the sources and the sensors. This method is interesting because it generates as much relations as the number of "0" and "1" junctions. It does not need the calculus of the bond graph determinant and the different causal loop gains (as opposed to transfer function approach).

Let apply this method to our example figure (1c).

1. Starting from the "1" junction and according to assigned causality, the relation is expressed by: $e_2 = e_1 - e_3$

The covering of causal path allows to express e_2 , e_1 and e_3 : $e_3 = De$, $e_1 = Se$, $Df = Cse_2$.

Based on those expressions, the following RRA is obtained: $Df = Cs(Se - De)$

2. Starting from the "0" junction, the relation is: $f_5 = f_3 - f_4$

The covering causal path gives: $f_3 = Df$, $f_4 = De/R_2$, $De = (Is)f_5$

The RRA is: $De = Is(Df - De/R)$

In the presented method, the bond graph model is in derivative causality. Implicit functions can appear while covering a path. The residual trees allow to fill this gap.

3.4 RRAs Generation from Residual Trees

3.4.1. *Residual Trees* Let call R the set of all residuals that can be generated from the system structure. The R exhaustive generation is deduced from the construction of an AND/OR solutions tree for each known variable. Each tree allows us to get the residuals using the known variable which is its root. These trees are built by covering the system bipartite graph from the known variable corresponding to its root and by

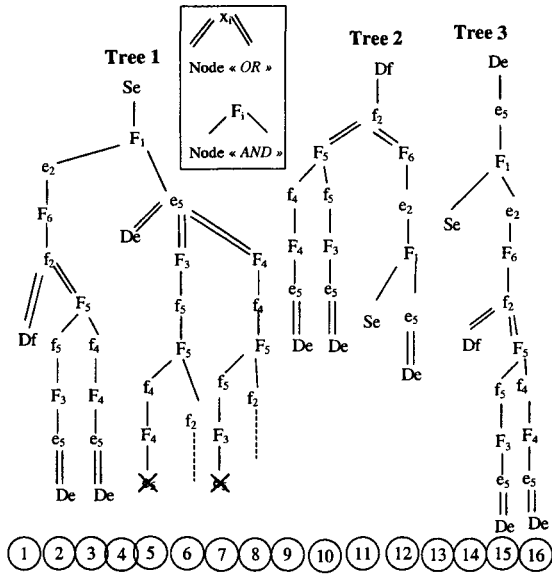


Fig. 4. Residual trees

respecting the tree following rules: (Carpentier and Litwak, 1996)

- (1) When a relation node is reached, we verify that all this node neighboring unknown variables can be evaluated (the unknown variables on which depends this relation). In that case, the relation and the neighboring unknown variables are placed in the tree and bonds between them are materialized by *AND* branches.
- (2) When an unknown variable node is reached, we research this node different neighboring relations allowing to evaluate this variable. The unknown variable and relations fitting with this condition are then placed in the tree and bonds between them are materialized by *OR* branches.
- (3) An unknown variable estimation must be made avoiding an implicit function resolution (it means to stop a branch covering when a loop is encountered) and taking into account relations reversing abilities or arcs directions.

By this way, each solution of a tree gives an analytical redundancy relation and consequently a residual. Then the R set is obtained by the union of all the solutions union.

Let us consider our example and its bipartite representation. From the three known system variables (De , Df and Se) the following trees given by the figure 4 can be obtained.

The third rule is well illustrated from the presented residual trees given by figure 4. The branches number 5, 6, 7 and 8 are not validated. Indeed, since e_5 is an unknown variable, then in order to avoid an implicit function resolution, the branch covering is stopped.

To obtain the RRAs, each tree is covered.

Tree 1 :

$$\begin{aligned}
 (1)(4) : Se - F_1^{-1} [F_6^{-1}(Df), De] &= 0 \\
 Se - (De + (1/Cs)Df) &= 0 \\
 (2)(3)(4) : Se - F_1^{-1} De, F_6^{-1} [& \\
 (F_5^{-1} [F_3^{-1}(De), F_4(De)]) &= 0 \\
 Se - De - (1/Cs) (1/Is + 1/R) Df &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

Tree 2 :

$$\begin{aligned}
 (9)(10) : & \\
 Df - F_5^{-1} [F_3^{-1}(De), F_4(De)] &= 0 \\
 Df - (1/Cs + 1/R) De &= 0 \\
 (11)(12) : Df - F_6 [F_1^{-1}(De, Se)] &= 0 \\
 Df - Cs(Se - De) &= 0
 \end{aligned} \tag{10}$$

Tree 3 :

$$\begin{aligned}
 (13)(14) : De - F_1^{-1} (Se, F_6^{-1}(Df)) &= 0 \\
 De - Se + (1/Cs)Df &= 0 \\
 (13)(15)(16) : De - F_1^{-1} [Se, F_6^{-1}(F_5^{-1} [& \\
 F_3^{-1}(De), F_4(De)])] &= 0 \\
 De - Se + (1/Cs)(1/Is + 1/R)Df &= 0
 \end{aligned} \tag{11}$$

This method is proposed for non causal model. Therefore, according to the covered branch, are obtained the equation in integral or derivative coupling. Furthermore, the formulation of residuals obtained from the trees are simply descriptive. The approach is qualitative and allows only to deduce the signature vectors for each relation. On the other hand the obtention of ARRr is difficult. For example, it is not easy to identify with what square the relation F_1^{-1} or F_5^{-1} . In order to obtain directly the relation which leads to the ARRr, some information concerning the orientation of the calculation (equivalent to the causality) and the constraint relation in the node *AND* (bond direction) are needed. This is solved using oriented residual trees.

3.4.2. Oriented Residual Trees The residual tree of the figure 4 is modified to add some knowledge allowing to evaluate the ARRr directly from the tree. The obtained residual tree is called oriented. It is given by the figure 5.

The covering of the obtained oriented residual trees leads to:

Tree 1 :

$$\begin{aligned}
 (1)(4) : Se - F_6^{-1}(Df) - De &= 0 \\
 Se - (De + (1/Cs)Df) &= 0 \\
 (2)(3)(4) : & \\
 Se - De - F_6^{-1} [F_3^{-1}(De) + F_4(De)] &= 0 \\
 Se - De - (1/Cs) (1/Is + 1/R) Df &= 0
 \end{aligned} \tag{12}$$

Tree 2 :

$$\begin{aligned}
 (9)(10) : Df - F_3^{-1}(De) - F_4(De) &= 0 \\
 Df - (1/Cs + 1/R) De &= 0 \\
 (11)(12) : Df - F_6 [Se - De] &= 0 \\
 Df - Cs(Se - De) &= 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

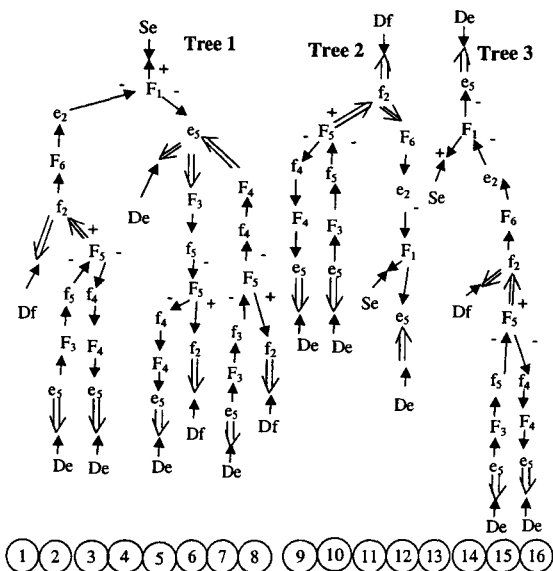


Fig. 5. Oriented residual trees

Tree 3 :

$$\begin{aligned}
 (13)(14) : De - Se + F_6^{-1}(Df) &= 0 \\
 De - Se + (1/Cs)Df &= 0 \\
 (13)(15)(16) : \\
 De - Se + F_6^{-1}(F_3^{-1}(De) + F_4(De)) &= 0 \\
 De - Se + (1/Cs)(1/Is + 1/R)Df &= 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

The RRA (12) (tree 1) produce the same signature fault than (15) (tree 2) and (16) (tree 3). The difference is only the covering causality: in (12) and (16) the relation F_6 is in integral causality whereas in RRA (16), this relation is in derivative causality. This is why a derivative form should be applied to the RRA (12) and (16) in order to avoid a initial condition influence.

4. CONCLUSION

In addition to structural controllability and observability problem analysis using bond graph approach (Sueur and Dauphin-Tanguy, 1991), the bond graph modelling also constitutes an efficient tool for the system monitoring study. The bond graph offers to the monitoring a rich modelling since it brings both structural and behavioral information.

Two methods, using structural knowledge of bond graph to get ARRs are recalled. Those methods allow to deduce directly from the bond graph the ARRs. In order to obtain directly the relation which leads to the ARRs and to avoid implicit function the oriented residuals tree are presented in complementary of bond graph approach.

5. REFERENCES

- Borne, P., G. Dauphin-Tanguy, J. P. Richard and F. Rotella (1992). *Modélisation et Identification Des Processus*. Edition Technip. Paris.
- Carpentier, T. and R. Litwak (1996). Algorithms and criteria for sensors location in view of supervision. In: *CESA'96 IMACS Multiconference*. Lille, France. pp. 684-689.
- Karnopp, D. C., D. Margolis and R. Rosenberg (1990). *Systems Dynamics: A Unified approach*. second ed.. John Wiley. New York.
- Karnopp, D.C. and S. Azerbaijan (1981). Pseudo bond graphs for generalised compartmental models in engineering and physiology. *Journal of The Franklin Institute* **312**(2), 95-108.
- Kohda, T., H. Katsube and K. Inoue H. Fujihara (1993). Identification of system failure causes using bond graph models. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceedings* **5**, 269-274.
- Mosiek, D., M. Tagina J.P. Cassar and G. Dauphin-Tanguy (1996). 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* pp. 818-824.
- Paynter, H.M. (1961). *Analysis and design of Engineering Systems*. M.I.T. Press.
- Rosenberg, R.C and D.C. Karnopp (1972). A definition of the bond graph language. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Trans. ASME* **3**, 179-182.
- Sueur, C. and G. Dauphin-Tanguy (1991). Bond graph approach for structural analysis of MIMO linear systems. *Journal of the Franklin Institute* **328**(1), 55-70.
- Tagina, M. (1995). *Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes*. PhD thesis. University of Lille, France.
- Tagina, M., J.P. Cassar, G. Dauphin-Tanguy and M. Staroswiecki (1995). Monitoring of systems modelled by bond graph. In: *ICBGM'95. International Conference on Bond Graph Modeling*. Las Vegas. pp. 275-280.
- Thoma, J. U. and B. Ould-Bouamama (2000). *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach*. Springer Verlag.
- Thoma, J.U. (1975). *Introduction to Bond Graphs and their Applications*. Pergamon Press.
- Twentesim (1996). *Users Manual of Twentesim (20sim)*. Comtollab Products Inc, Box 217 NL-7500AE Enschede. Nederland.

ANALYSIS OF STRUCTURAL PROPERTIES OF THERMODYNAMIC BOND GRAPH MODELS

B. Ould Bouamama * F. Busson * G. Dauphin-Tanguy **
M. Staroswiecki *

* LAIL, UPRESA CNRS 8021, USTL, Bât. EUDIL
59655 Villeneuve d'Ascq, France
belkacem.bouamama@univ-lille1.fr
** Ecole Centrale de Lille, BP 48
59651 Villeneuve d'Ascq, France
gdt@ec-lille.fr

Abstract: The present paper deals with the structural properties of thermodynamic systems using the bond graph approach. The monitoring ability and observability are directly determined from the linearized multiport bond graph with any need to generate the analytical redundancy relations or the signature faults. This approach is illustrated by an application to a three-tank system. *Copyright ©2000 IFAC.*

Keywords: Fault detection, Bond graphs, Monitoring, Structural analysis, thermodynamic, Controllability, Observability, Monitoring ability.

1. INTRODUCTION

Thermodynamic phenomena occur mainly in dangerous technological processes which are encountered e.g. in nuclear, chemical, petrochemical industries. However, the improvement of their safety rests essentially on fault detection and isolation (FDI) procedures. Those procedures consist in the comparison between the actual behaviour of the system and reference behaviour. Different approaches for the FDI procedures have been developed, depending on the kind of knowledge used to describe the process.

Because of the multi-domain energies involved in such processes the use of bond graph modelling is well-adapted (Karnopp *et al.*, 1990). The thermodynamic processes are modelled by multiport and non linear bond graphs. In this area some research works are published (Ould-Bouamama *et al.*, 1997) (Thoma and Ould-Bouamama, 2000).

The monitoring of physical processes using bond graph methodology is developed in (Tagina, 1995b), but in the case of 1-port bond graph.

Up to now monitoring of thermodynamic systems (modelled by multiport bond graph) using a bond graph approach is not yet developed.

This paper deals with observability and monitoring ability of thermodynamic processes using multiport bond graph. The used method consists in the introduction of modulated sources after the decoupling of multiport bond graph in order to cancel the non-linearities. This approach is illustrated by an application to a three-tank system.

After a brief description of monitoring of physical systems using bond graph approach in the second section, the third section presents the thermodynamic bond graph. Based on research work developed by (Rimaux, 1995) concerning the controllability of bond graph models with 1-port passive elements, the fourth section deals with local observability and monitoring ability of mul-

⁰ Ref. of this paper: 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes, Budapest, 14-16 juin 00, vol.2, pp. 1068-1073.

tiport thermodynamic bond graph. Finally, the presented approach is illustrated by an example.

2. MONITORING OF PHYSICAL SYSTEMS USING BOND GRAPH APPROACH

The bond graph methodology is widely presented for modelling purpose (Paynter, 1961) (Thoma, 1990), (Thoma and Ould-Bouamama, 2000) but only few papers deal with monitoring of systems using the bond graph tool.

In (Tagina, 1995b) a method that permits to generate analytical redundancy relations (ARRs) directly from the bond graph modelling is exposed. An analytical redundancy relationship is a relationship between a set of known variables (measured or deduced variables). This ARR's determination is based on the causal paths analysis. The innovative interest is the use of only one representation (the bond graph) for modelling and for monitoring the system.

This method was developed in linear and non linear cases for models with 1-port (single energy) passive elements. The non linearities concern only the elements but not the structure. The application to non linear multi energy domain system is not yet proposed in the literature.

The main goal of the present work is to extend the monitoring ability analysis procedures proposed for 1-port bond graph to multiport bond graph.

3. THERMODYNAMIC BOND GRAPH MODELLING

Process engineering is characterized by the coupling of several phenomena such as chemical, thermal and hydraulic ones. Thus the coupling multidomain power is represented in the thermodynamic bond graph by small rings around the bonds as shown on figure 1:

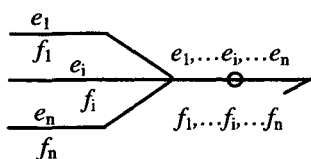


Fig. 1. Process engineering bond graph

e, f represent respectively the effort and flow variable. $i = 1, n$ is the number of energy. In our case $n = 2$ (hydraulic and thermal energy).

3.1 Choice of Power Variables in Thermodynamic Process

The complexity of the thermodynamic phenomena requires a careful choice of the power vari-

ables. As power variables, the temperature T or specific enthalpy h and pressure P are used as effort variables, and the mass flow \dot{m} and the thermal flow \dot{Q} or enthalpy flow \dot{H} are used as flow variables. Really, the choice is not trivial and depends on the kind of considered physical phenomena (Ould-Bouamama *et al.*, 1997) (Thoma and Ould-Bouamama, 2000).

3.2 Constitutive Elements

In thermodynamic processes, the dissipation phenomenon is modelled by the two-ports R as indicated in figure 2a. The main phenomena modelled by the multiport R are evaporation, vapor condensation, convection through a pipe, etc.. The general accumulators such as tank or boiler are represented by two-ports C (figure 2b). In figure 2, Se and Sf represent respectively sources of imposed effort and flow.

The figure 2b represents the bond graph model of an accumulator subject to a thermal flows by convection \dot{H}_i ($i = 1, n$), conduction \dot{Q}_j ($j = 1, r$) and to hydraulic flows \dot{m}_k ($k = 1, n$). The thermal flow by conduction is modelled by simple bond graph while there is only one kind of energy. n and r are the number of flow ports.

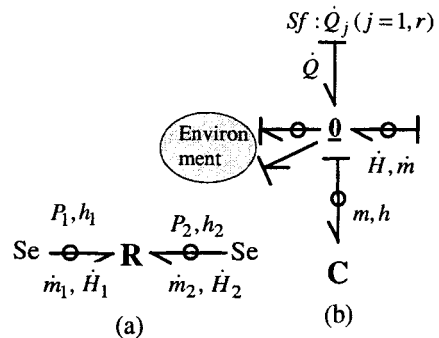


Fig. 2. R (a) and C (b) multiports in thermodynamic bond graph

3.3 Constitutive Equation of Multiport R and C in Process Engineering

From safety and supervision point of view, the masses and temperatures in the accumulators and the flows through the pipes are important to monitor. Furthermore, in the technological process, the accumulator is between the input and output pipe. This is why, in presented bond graph, the efforts are imposed for R and the flows are imposed for the C multiport. The "0" junction modelise the conservation of hydraulic and thermal energy law. The vectorial form of the junctions are then represented in underlined form.

The constitutive relations for R multiport are given in the following matrix form:

$$\begin{bmatrix} \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{H}_1 \\ \dot{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{R1}(P_1, P_2, h_1, h_2) \\ \Phi_{R2}(P_1, P_2, h_1, h_2) \\ \Phi_{R3}(P_1, P_2, h_1, h_2) \\ \Phi_{R4}(P_1, P_2, h_1, h_2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

The relations Φ_{Ri} ($i = 1, 4$) are non-linear and depend on the modelled physical phenomena (saturated, under saturated ...) (Thoma and Ould-Bouamama, 2000). Because of continuity, the restrictor generally provides equal mass flows, $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ and the equal thermal energy, $\dot{H}_1 = \dot{H}_2$.

According to the assigned integral causalities, and zero junction, the outputs of the accumulator (fig. 2b) are the thermal effort (specific enthalpy h) and hydraulic effort (associated with the stored mass m):

$$\begin{bmatrix} m \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{C1}(\int (\sum \dot{m}_k, \sum \dot{H}_i, \sum \dot{Q}_j) dt) \\ \Phi_{C2}(\int (\sum \dot{m}_k, \sum \dot{H}_i, \sum \dot{Q}_j) dt) \end{bmatrix} \quad (2)$$

The functions Φ_{C1} and Φ_{C2} are strongly non-linear. Such a models of an industrial process are well developed in (Ould-Bouamama *et al.*, 1997) and (Thoma and Ould-Bouamama, 2000).

4. STRUCTURAL PROPERTIES OF A LINEARIZED THERMODYNAMIC BOND GRAPH

4.1 Controllability

Definition 1. (causal path) A causal path is a series of links wich assignment have the same causality. Depending on the causality, the followed variable is effort or flow. To change the variable one can pass through a GY passive element, or by an passive element (I, C or R).

After the linearization of a thermodynamic bond graph, 1-port (single bond) and linear bond graph, with assignment sources modulated by internal signals can be obtained. This procedure bond graph linearization was treated in (Rimaux, 1995) for the controllability purpose of multiport elements with single energy (such as modulated transformer MTF). An interesting definition was given in this work:

Definition 2. (generalised causal path) A generalised causal path is a causal path that can follow power links or informational links, or both. The generalised causal path is proper if it contains only power links. It is improper if it contains at least one informational link.

If we consider a thermodynamic bond graph in preferred, derivative causality, all of its dynamical elements are in derivative causality. It is due to the fact that the respective positions of the C elements and the R elements permit always the change of causality for each C element (see §3.3). Based on (Rimaux, 1995) and on the previous observation, the following theorem can be deduced:

Theorem 1. (local controllability in the thermodynamic case) A thermodynamic linearized 1-port bond graph model is locally controllable iff all the I-C elements in integral causality in the bond graph in preferred integral causality are causally connected to all independent sources by a generalised causal path.

4.2 Observability

Let us consider the general theorem on structural observability of a linear bond graph given in (Sueur and Dauphin-Tanguy, 1991):

Theorem 2. (structural observability) A model is structurally observable iff the following properties are verified: (a) all of the dynamical elements in integral causality are causally linked to a sensor, (b) bond graph rank $rk(\frac{A}{C}) = n$ with A the state matrix and C the measurement matrix.

From theorem 2 and the structural matrix of the bond graph model another theorem can be deduced: it is the dual of the theorem 1.

Theorem 3. (local observability in the thermodynamic case) A thermodynamic linearized bond graph model is locally observable iff all the I-C elements in integral causality in the bond graph in preferred integral causality are causally connected to all independent detectors by a generalised causal path. The entire system is locally observable iff all dynamical elements are observable.

4.3 Monitoring Ability

The observability of a state variable is a necessary but not sufficient condition of monitoring ability.

Definition 3. A variable is monitarable iff it is possible to detect and to isolate the faults that may affect it.

Using bond graph approach, it is possible to determine directly from bond graph model if variables to be monitored are monitorable with any need to generate the ARR or the signature faults. Some of

propositions are given for simple bond graph with one port in (Tagina *et al.*, 1995). In this paper, the proposition is extended to thermodynamic multiport linearized bond graph.

4.3.1. Monitoring Ability of Sensors

Proposition 4. If the number of sensors is higher than 1, then all sensors are monitorable. Indeed if n is the sensor number, then it comes that there are n independent ARR (Tagina, 1995a).

4.3.2. Monitoring Ability of Control Sources

Proposition 5. (monitoring ability of thermodynamic case) Two control sources S_j and S_i in thermodynamic linearized bond graph model are not monitorable iff : (a) the covering of the generalised causal path linking the source S_j to any sensor D_l contains the covered causal path from the source S_i to the same sensor D_l , (b) the causal path between elements $S_j - D_l$ that are not listed in $S_i - D_l$ did not appear in any causal path or loop when the causal path is removed from the monitored bond graph.

5. APPLICATION

Let us consider the example illustrated by the three-tanks system disposed as shown in figure 3: The tank C_1 , filled by the mass flow \dot{m}_1 , contains water heated by a warming resistance supplying an electrical power \dot{Q} . The tank C_2 , filled by the mass flow \dot{m}_2 contains water at the ambient temperature. The valves R_1 and R_2 are respectively controlled by the positions of valves x_1 and x_2 in order to keep constant the temperature of water in the tank C_3 . The non linear bond graph model is given by figure 4.

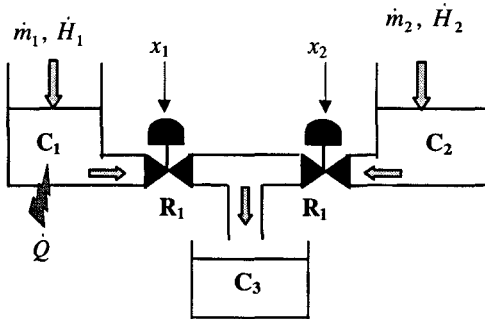


Fig. 3. Scheme of to be monitored system

The flow sensors $Df1$ and $Df2$ allow the measurement of the mass flows through respectively R_1 and R_2 valves. The effort sensors $De1$ and $De2$ allow the measurement of the temperature (associated with specific enthalpy h) and the pressure

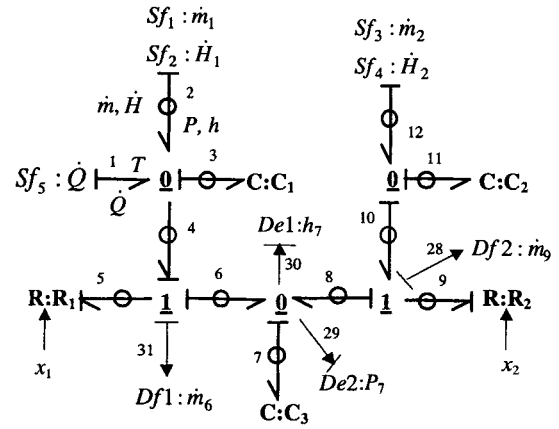


Fig. 4. Bond graph model of the monitored system (associated with the masse) stored in the tank C_3 . They are supposed to be ideal, and are modeled by using signal bonds meaning that no power is transferred. A causality assignment precises the types of the sensors.

The main technical specification consists in monitoring ability analysis of the control sources and sensors. Here, the control sources are the inlet mass flows $Sf1$ and $Sf3$, the thermal heating flow $Sf5$ and the inlet enthalpy flow $Sf2$. The sensors are $De1$, $De2$, $Df1$ and $Df2$.

5.1 Linearization of Thermodynamic Bond Graph

5.1.1. Linearized Thermodynamic Multiport R As illustration of the linearization methodology, let us consider one of the R-elements (R_1 or R_2).

The constitutive equation is in the general case of the 2-ports R is:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{m}(P, h, x_1), \\ \dot{H} &= \dot{H}(P, h, x_1) \end{aligned} \quad (3)$$

The mass flow depends on the thermal and on the hydraulic effort variable h and P in the saturated thermo fluid case. However, in the studied system, the fluid is under saturated. Thus the mass flow depends only on the hydraulic effort variable :

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{m}(P, x_1) \\ \dot{H} &= \dot{H}(P, h, x_1) \end{aligned} \quad (4)$$

So the Taylor linearization around the steady state point $(\bar{P}, \bar{h}, \bar{x}_1)$ gives:

$$\begin{aligned} \dot{m}' &= \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial P} \right)_{(\bar{P}, \bar{h}, \bar{x}_1)} \cdot P' + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial x_1} \right)_{(\bar{P}, \bar{h}, \bar{x}_1)} \cdot x_1' \\ \dot{H}' &= \left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial P} \right)_{(\bar{P}, \bar{h}, \bar{x}_1)} \cdot P' + \left(\frac{\partial \dot{H}}{\partial h} \right)_{(\bar{P}, \bar{h}, \bar{x}_1)} \cdot h' \\ &\quad + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial x_1} \right)_{(\bar{P}, \bar{h}, \bar{x}_1)} \cdot x_1' \end{aligned} \quad (5)$$

The resulting bond graph is shown on figure 5.

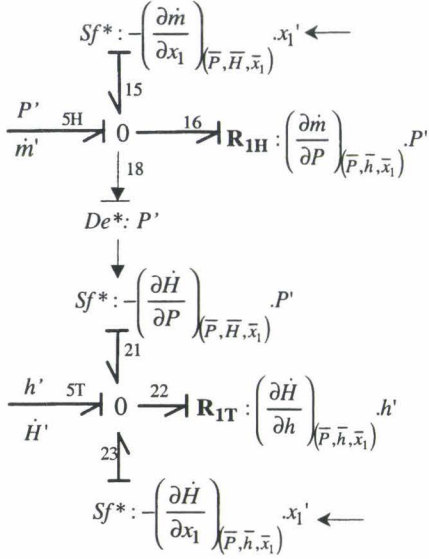


Fig. 5. Linearized multiport R₁ bond graph model

In the figure 5, the fictive detectors used to modulate the obtained modulated source after linearization are represented adding the sign "*" in order to distinguish them from the real sensors.

5.1.2. *Linearized Thermodynamic Multiport C*
Let us consider as example the multiport C₃. In integral causality, the thermal effort variable h is calculated as follows:

$$\begin{aligned} P &= \frac{g}{A} \int \dot{m}_C dt = F_H(\dot{m}_C) \\ h &= \frac{\int \bar{H}_C dt}{\int \dot{m}_C dt} = F_T(\dot{m}_C, \dot{H}_C) \end{aligned} \quad (6)$$

where \dot{m}_C and \dot{H}_C are the algebraic sum respectively of mass and thermal flows in the tank C₃.

So the Taylor linearization around the operating point (\bar{H}_C, \bar{m}_C) , where $\bar{H}_C = \int \dot{H}_C$ and $\bar{m}_C = \int \dot{m}_C$ gives:

$$\begin{aligned} P' &= \frac{g}{A} \int \dot{m}'_C dt \\ h' &= \left(\frac{\partial F_T}{\partial \dot{H}_C} \right) (\bar{H}_C, \bar{m}_C) \cdot \int \dot{H}'_C dt + \\ &\quad \left(\frac{\partial F_T}{\partial \dot{m}_C} \right) (\bar{H}_C, \bar{m}_C) \int \dot{m}'_C dt \\ &= \frac{1}{\bar{m}_C} \int \dot{H}'_C dt - \frac{\bar{H}_C}{(\bar{m}_C)^2} \int \dot{m}'_C dt \end{aligned} \quad (7)$$

The resulting bond graph is shown on figure 6.

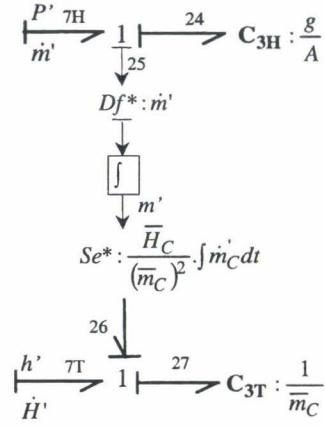


Fig. 6. Linearized multiport C bond graph model

5.2 Monitoring ability analysis of the studied system

According to the theorem 3 applied to bond graph model (fig. 7), it is easy to deduce that the system is observable.

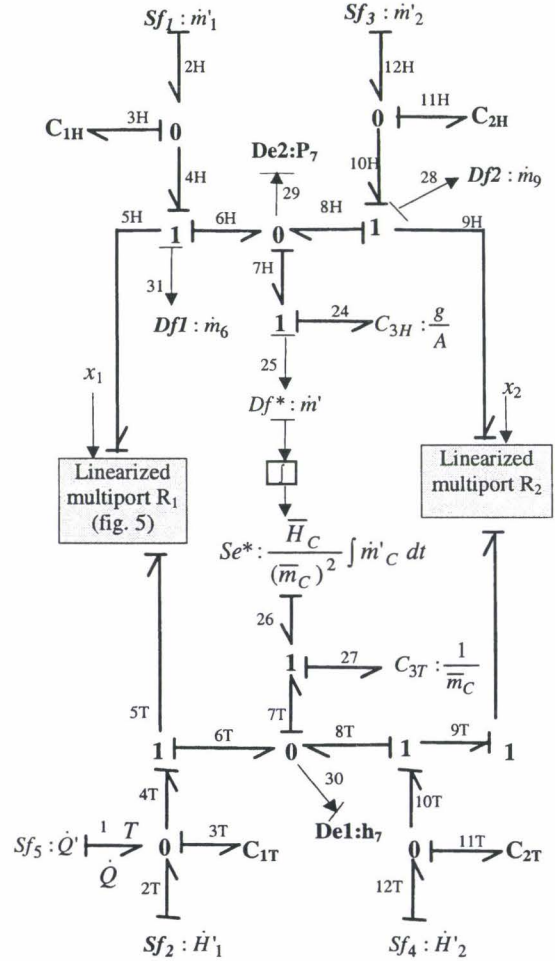


Fig. 7. Monitoring ability of the thermodynamic system using bond graph model

For the monitoring ability analysis, let us consider the covering of the bond graph causal paths from some control sources to each sensor which lead to:

$$\underline{Sf3-De1}=12H-11H-C_2H-11H-10H-9H-R_2H-9H-8H-7H-24-g/A-24-25-26-27-1/\overline{m}_C-27-7T-30$$

$$\underline{Sf3-De2}=12H-11H-C_2H-11H-10H-9H-R_2H-9H-8H-7H-24-g/A-24-7H-29$$

$$\underline{Sf3-Df2}=12H-11H-C_2H-11H-10H-9H-R_2H-9H-28$$

$$\underline{Sf3-Df1}=12H-11H-C_2H-11H-10H-9H-R_2H-9H-8H-7H-24-g/A-24-7H-6H-5H-R_1H-5H-31$$

$$\underline{Sf5-De1}=1-3T-C_1T-3T-4T-5T-22-R_1T-22-5T-6T-7T-27-C_3T-27-7T-30$$

$\underline{Sf5-De2} = \emptyset$: there is not a causal relation (it means that the thermal energy do not affect the hydraulic energy)

$\underline{Sf5-Df1} = \emptyset$: there is not a causal relation

$\underline{Sf5-Df2} = \emptyset$: there is not a causal relation

$$\underline{Sf2-De1}=2T-3T-C_1T-3T-4T-5T-22-R_1T-22-5T-6T-7T-27-C_3T-27-7T-30$$

$\underline{Sf2-De2} = \emptyset$: there is not a causal relation

$\underline{Sf2-Df1} = \emptyset$: there is not a causal relation

$\underline{Sf2-Df2} = \emptyset$: there is not a causal relation

Based on the proposition 4 and the obtained from bond graph model causal path , it is easy to deduce that the sensors Sf3 and Sf2, Sf3 and Sf5 are monitorable. Their signature faults are different. However, the control sources Sf2 and Sf5 are not monitorables: the causal path linking Sf2 to any sensor contains the covered causal path from Sf5 to the same sensor. It means that they have a same signature faults. This result was validated using structural ARR generation method. In order to make them monitorable, an additional sensor may be placed (for example) in the bond number 1. This part of bond graph becomes as given in figure. 8.

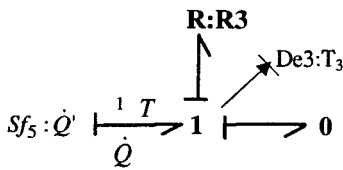


Fig. 8. Adjonction of sensor De3 in order to make Sf5 and Sf2 monitorable

6. CONCLUSION

The thermodynamic systems occur in many dangerous processes. Such processes need consequently a monitoring. The bond graph, thanks its multidisciplinary character, well suited for modelling, is used in this present paper for monitoring of thermodynamic processes. The monitoring

ability of control sources is directly deduced from linearized multiport bond graph model with any need to generate the ARRs or signature faults. The method is applied to a three-tank thermo fluid system. The further problem is to extend the monitoring ability analysis for non linear thermodynamic bond graph.

7. REFERENCES

- Karnopp, D. C., D. Margolis and R. Rosenberg (1990). *Systems Dynamics: A Unified approach*. second ed.. John Wiley. New York.
- Ould-Bouamama, B., J. U. Thoma and Cassar J. P. (1997). Bond graph modelisation of steam condensers. In: *IEEE, International Conference on Systems Man, and Cybernetics: Computational Cybernetics and Simulation*. Vol. 3. Orlando, USA. pp. 2490–2494.
- Paynter, H.M. (1961). *Analysis and design of Engineering Systems*. M.I.T. Press.
- Rimaux, S. (1995). Etude des propriétés structurales de certaines classes de systèmes physiques non linéaires modélisés par bond graph. *Ph.D thesis*.
- Sueur, C. and G. Dauphin-Tanguy (1991). Bond graph approach for structural analysis of MIMO linear systems. *Journal of the Franklin Institute* **328**(1), 55–70.
- Tagina, M. (1995a). Application de la Modélisation Bond Graph À la Surveillance Des Systèmes Complexes. PhD thesis. University of Lille, France.
- Tagina, M. (1995b). Application de la Modélisation Bondgraph À la Surveillance Des Systèmes Complexes. PhD thesis. USTL. Villeneuve d'Ascq, France.
- Tagina, M., J.P. Cassar, G. Dauphin-Tangy and M. Staroswiecki (1995). La surveillabilité à partir d'un modèle bond graph. In: *15ième Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique JTEA'95*. Vol. 1. Tunis.
- Thoma, J. U. and B. Ould-Bouamama (2000). *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach*. Springer Verlag.
- Thoma, J.U. (1990). *Simulation by Bondgraphs. Introduction to a Graphical Method*. Springer-verlag. Berlin Heidelberg.



Multi-modelling of an industrial steam generator[☆]

Belkacem Ould Bouamama^{a,*}, Marcel Staroswiecki^a, Bernard Riera^b, Elyes Cherifi^b

^aLAIAL, UPRESA CNRS 8021, Bât. EUDIL, Cité scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

^bLAMIH, UMR CNRS 8530 UVHC, BP. 311, 59304 Valenciennes Cedex, France

Received 5 November 1998; accepted 17 December 1999

Abstract

The complexity of thermodynamic processes — large-scale systems, numerous operating modes, numerous system interactions, etc. does not allow operators to take into account all system parameters. In order to help the operators in their tasks, integrating the decision-making tools into the supervision system is necessary. This paper deals with a multi-modelling approach for supervision using functional analysis, bond graph modelling and structural analysis. In order to show that they are complementary in the design of supervision systems, the different methods are applied to a steam generator installation. It is shown how each contributes to help the operators in their supervisory task. © 2000 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Keywords: Supervision; Steam generator; Bond graph; Functional; Structural; Fuzzy; Multi-modelling

1. Introduction

This paper deals with industrial thermodynamic systems, whose supervision is essential in order to ensure their smooth running. Supervision consists of real-time monitoring and high abstraction-level coordination of the set of subsystems that constitute the process, in order to optimise the production, to diagnose faults, to perform simulations and especially to ensure safety. During normal operation, the system supervision is performed by digital control systems. However, when the operating mode changes, or in unusual or accidental situations, the presence of human operators becomes essential (Millot, 1988).

Even with well-trained operators (which is not always true), the complexity of the process (large-scale system, numerous operating modes, numerous system interactions, etc.) does not allow them to take into account all the system's parameters. In order to help the operators in

their tasks, decision-making tools need to be integrated into the supervision system.

Despite technical progress in the field of computer science, supervisory tools for human operators have not evolved since the first digital control system were developed. One can essentially find synoptics showing the systems spacial organization, trends and alarms are very often based on the triggering of a sensor or the comparison between measurements and fixed thresholds. This involves well-known problems such as Christmas trees, false alarms, etc. Hence, today's supervisory tools, even though they are simple to implement are not completely satisfactory. Advances in the field of automatic control such as fault detection and isolation (FDI) algorithms can be used to design more efficient supervisory systems. However, these methods do not allow the human operator to be removed from the supervisory loop. Consequently, it is necessary to design new supervisory tools for operators. The lack of process modelling that takes into account different points of view (behavioural, functional, structural, physical, environmental) is one of the major problems during the design of supervisory systems. So, a production system has to be considered and analysed as a complex system.

On the one hand, decision making is based on the operator's knowledge about the system operation. Understandable functional and behavioral models have to be developed for this.

On the other hand, they rely on proper information being provided to them, i.e. information that describes

[☆]An early and shorter version of this paper by the authors, entitled "Supervision of complex systems using functional structural and bond graph models" was presented at the 1998 IFAC Workshop on On-Line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industries in Solaize (Lyon), France, June 1998.

* Corresponding author. Tel.: + 33-3-20-33-71-39; fax: + 33-3-20-33-71-89.

E-mail addresses: belkacem.bouamama@univ-lille1.fr (B. O. Bouamama), marcel.staroswiecki@univ-lille1.fr (M. Staroswiecki), bernard.riera@univ-valenciennes.fr (B. Riera), elyes.cherifi@univ-valenciennes.fr (E. Cherifi).

the state of the process and avoids any redundancy, which could overwhelm their analysis capacity with a large number of correlated variables.

This paper deals with the integration of these three points of view using three analysis techniques (functional, structural and behavioural) in order to show that they are complementary in the design of supervisory systems.

Functional analysis represents what the system does in order to achieve the production goal it has been assigned, and how the different functions can be hierarchically organised.

Behavioural models of thermodynamic systems are characterised by the interactions of a large number of complex phenomenon, which call for various types of energy. This dynamic feature requires a unified modelling approach, using physical phenomenon such as energy storage, energy transformation and energy dissipation as data. Reasoning with energy provides an understandable and unified means of modelling the system behaviour, the bond graph approach is well adapted for these tasks.

The structural analysis shows the system organisation in space. Complementary to this “lay-out” approach, structural analysis enables one to decompose the system into weakly coupled sub-systems. The information provided to operators is essential for process monitoring.

The three different approaches are discussed and applied to the supervision of a steam generator pilot process.

The paper is organised as follows: Section 2 briefly presents three modelling methodologies: functional, behavioural and structural. Section 3 deals with the multi-modelling approach. The limits and how these modelling techniques work together are examined. It is also shown how each of them contributes to help the operators in their supervisory task. Section 4 deals with the application of the multi-modelling method examined to the supervision of a steam generator installation. Finally, a conclusion based on the obtained results from the application will be given.

2. Multi-modelling for supervision

2.1. Structural hierarchy of system organisation

The supervisory design requires the production system to be considered as a complex system. The main idea is to present to the human operator different points of view (i.e. models) of the production system. Some of these models can be used to design FDI algorithms.

The description of a complex system stated so far has been a structural one. The system is seen as an organisation in space. It is the most obvious point of view and one that is always considered in supervisory systems. The structure of a system is then considered at different levels of abstraction from the parts to the whole. A structural hierarchy is in fact a set of static pictures taken at differ-

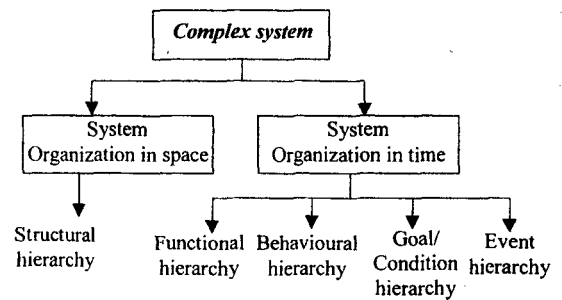


Fig. 1. Hierarchical description of a complex interfacing system.

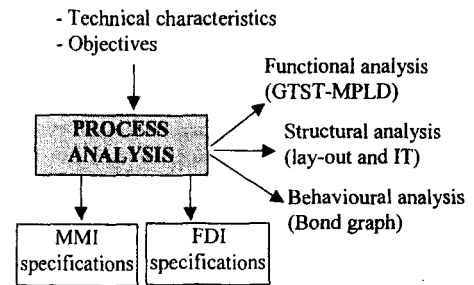


Fig. 2. Multi-modelling approach for supervision.

ent levels and used to analyse a complex system. It is only recently (Modarres & Cheon, 1999) that a complementary perspective of structural hierarchy has been proposed, in which system organisation in time is described by one or more related hierarchies such as functional hierarchy, behavioural hierarchy, goal condition hierarchy and event hierarchy (see Fig. 1).

From the supervision point of view, as noted above, structural, functional and behavioural models seem to be necessary. Indeed, in order to achieve man-machine interface (MMI) and FDI specifications, these three analysis techniques are used according to the following methods: goal tree success tree-master plant logic diagram (GTST-MPLD), information theory and bond graph (see Fig. 2).

2.2. Functional modelling

Functional modelling is a technique for describing and representing complex systems. Among the many functional approaches, that have been proposed during the last 10 years (Feliot, 1997; Chittaro, 1995) the present paper uses the GTST-MPLD method. The main interest of this method is that it gives the operator a clear view of the system's functional organisation and allows him to estimate the system's ability to achieve its goal.

GTST-MPLD presented in Modarres (1993) uses logical connectors to describe the functional hierarchy of the system. This method is composed of two parts GTST and MPLD.

GTST: The GTST is divided into two parts: the goal tree (GT) and the success tree (ST). The GT is concerned with the goals and functions that must be achieved by the system. The GT starts with the system's objective at the top. The objective is then decomposed into a sufficient set of sub-goals, the achievement of which is necessary for the success of the top level goal. All sub-goals are then described in terms of their own sub-goals which must be further decomposed until a desired level of abstraction is reached. Going further down the GT, each low-level goal or function is described in terms of a functional decomposition that explains how the goal is achieved. The first level of functions can be further decomposed into sub-functions, and the process of sub-functions definition continues again until the desired abstraction level. At the end of this process the lowest-level functions address functions performed by components. The set of all these functional decompositions form the ST. The ST is a logical structure that describes how an objective can be fulfilled by a set of components. Traditional logical connectors, such as "and", "or", and "xor", are used to describe the relationship between goals and functions.

MPLD: Because of the interrelationship between system parts, at the lowest level of GTST, the model shows many ways to achieve the high-level functions. Since in complex systems these relationships become complicated, the MPLD is introduced to represent them in a compact and transparent fashion. The MPLD starts at the lowest level of GTST where the physical parts of the system support the lowest level of functional decomposition. The MPLD shows the interrelationships between independent parts of a system in a hierarchical form using a dependency matrix. For each subsystem at the top of the MPLD the available success path is shown in the matrix. On the left side of the matrix the set of supporting elements needed for a successful path are displayed. The application presented in this paper shows clearly how this method is used.

Recent expansions of GTST–MPLD using a function-centered model of a physical system to provide the capability of generating a high-level simulation of the system is proposed by Modarres and Cheon (1999).

2.3. Bond graph modelling in process engineering

2.3.1. Conventional bond graphs

Since simple (or conventional) bond graph theory can be easily found in the literature Thoma (1975), Karnopp, Margolis and Rosenberg (1990) and Borne, Dauphin-Tanguy, Richard and Rotella (1992), this paper essentially deals with those aspects of bond graphs peculiar to process engineering systems, which up to now has not been fully developed.

The key to bond graph modelling is the representation (by a bond) of power as the product of efforts and flows, with elements acting between these variables and junc-

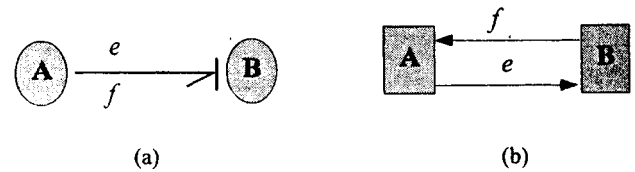


Fig. 3. Bond graph representation (a) and causality (b).

tion structures to put the system together. As shown in Fig. 3(a), the power exchanged between two systems A and B indicated by a bond is the product of two variables — a potential variable (e.g. pressure, electrical potential, temperature, chemical potential, force, etc.) called effort (e) and a current variable (e.g. volume flow, current, entropy flow, velocity, molar flow, etc.) referred to as flow (f).

From a supervision point of view, one important structural property of the bond graph is its causality concept. Indeed, the determination of causes and effects in the system is directly deduced from the graphical representation. In the bond graph, it is denoted by the cross-stroke on the right indicating that the effort acts to the right side of the cross-stroke while the flow is in the reverse direction. As an example in Fig. 3(a), assigned causality means that system A imposes efforts on B. In the corresponding block diagram given by Fig. 3(b), the direction of action is indicated by an arrow on each connection as illustrated. Independent of the causality, the direction of the positive power is indicated by the half-arrow on the bond.

2.3.2. Thermodynamic bond graph

The bond graphs presented above are the so-called conventional bond graphs or true bond graphs because the product of the effort and flow variables gives the instantaneous power, transferred along a bond. This type of bond graph, well developed in the literature, can be used to describe electrical, mechanical and hydraulic processes (with incompressible fluid). In this case, the degree-of-freedom (DOF) is equal to the number of power variables. However, many systems such as thermo-fluid, biological and chemical engineering can be represented usefully as pseudo-bond graphs, where the product of effort and flow variable is not a power. In this case, the number of power variables is larger than the degrees of freedom. Some research work has been published in this area (Karnopp & Azerbaijan, 1981; Karnopp et al., 1990) but up to now the main motivation for the choice of power variables has been for engineering simulation: the supervision point of view has not been taken into account. In the present paper, effort variables are the temperature T and pressure P , and flow variables are the mass flow F and the thermal flow Q . From the supervision point of view these variables are more natural examples for the operators than entropy flow (as a flow variable) or specific enthalpy (as an effort variable).

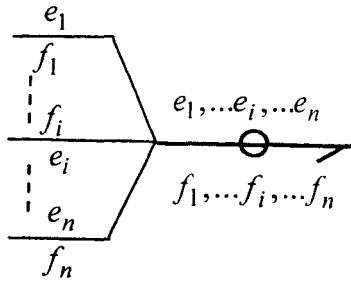


Fig. 4. Representation of thermodynamic bond graph.

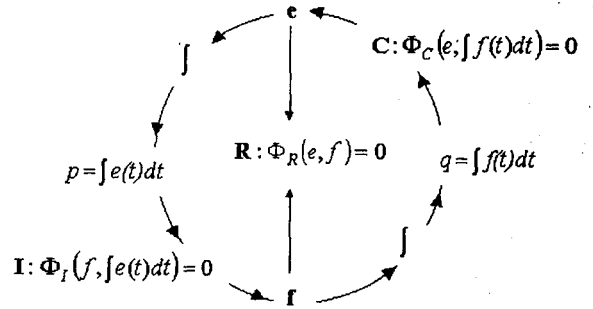


Fig. 6. Carousel of bond graphs variables.

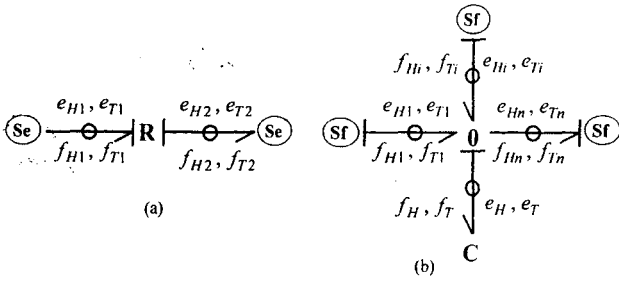


Fig. 5. Bond graph model of dissipation (a) and storage (b) energy in thermodynamic system.

The choice is not trivial and depends on the kind of the physical phenomena considered (Ould Bouamama, Thoma & Cassar, 1997; Thoma & Ould Bouamama, 2000).

Process engineering is characterised by the coupling of several phenomena such as chemical, thermal and hydraulic. Thus, the coupling power is represented in the thermodynamic bond graph by small rings around the bonds as shown in Fig. 4. In thermodynamic process, the dissipation phenomenon is modelled by the two ports **R** as indicated by Fig. 5(a). The main phenomena modelled by the multiport **R** are evaporation, vapour condensation, convection through the pipe, etc. The general accumulator such as reservoir, receiver, etc., are represented by two-ports **C** (Fig. 5(b)). In Fig. 5, the lower case letter *H* and *T* represent the hydraulic and thermal domain respectively. **Se** and **Sf** represent imposed sources of effort (pressure and temperature) and flow (mass and thermal flow), respectively.

From the point of view of safety and thus of supervision, the mass and temperatures stored by the accumulators, and the flows through the pipes are important for the operator. Furthermore, in the technological process the accumulator is between the input and output of the pipe. This is why, in the presented bond graph, in terms of causality, the efforts are imposed for **R** and the flows are imposed for the **C** multiport. This causality is also proved using a functional approach (Feliot, 1997).

According to the integral causalities of the multiport **C**, and the zero junction (common effort), the outputs of the accumulator are the thermal effort e_T (temperature)

and hydraulic effort e_H (pressure). They are calculated by the constitutive equation of the multiport **C** as follows:

$$\begin{bmatrix} e_H \\ e_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{CH}(\int(\sum a_i f_{Hi}, \sum a_i f_{Ti}) dt) \\ \Phi_{CT}(\int(\sum a_i f_{Hi}, \sum a_i f_{Ti}) dt) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where *i* is the port number and *a* is a Boolean variable equal to +1 if the power is positive (inlet) and equal to -1 if it is negative (outlet). f_{Ti} and f_{Hi} are, respectively, the inlet thermal flow and the inlet hydraulic flow (mass flow). The functions Φ_{CH} and Φ_{CT} in Eq. (1) are strongly non-linear: the pressure (in the boiler for example) depends on the stored quantity of thermal and hydraulic energy if the water is saturated but depends only on the stored mass if the water is under saturated. Such a model is well developed in Ould Bouamama and Dauphin-Tanguy (1996); Thoma and Ould Bouamama (2000).

The outputs of the **R**-two ports restrictor are thermal flow f_T and hydraulic flow f_H . They are determined by the constitutive equations of **R** element as follows:

$$\begin{bmatrix} f_H \\ f_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{RH}(e_{T1}, e_{T2}, e_{H1}, e_{H2}) \\ \Phi_{RT}(e_{T1}, e_{T2}, e_{H1}, e_{H2}) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

The restrictor generally provides the two equal mass flows $f_{H1} = f_{H2} = f_H$ and the equal thermal energy $f_{T1} = f_{T2} = f_T$. The functions Φ_{RH} and Φ_{RT} are non-linear and depend on several factors such as the fluid compressibility, the thermodynamic saturation of the water-vapour mixture, evaporation, condensation, etc.

With the exception of the **R** and **C** bond graph elements developed above (because of their common using in process engineering), the main elements exchanging energy with the system through the bonds are: **I**-elements (inertance, e.g. inductance or mass action), **TF** (transformer, e.g. lever, change of physical domain...), **GY** (gyrator, e.g. gyroscope, Hall effect sensor, etc.) and **RS** (activated resistance generating the entropy, e.g. thermal friction).

The constitutive relations for these elements are well illustrated by the Thoma carousel (Thoma, 1990) as presented in Fig. 6. So a resistor or an **R**-element gives an algebraic relation between effort and flow, an **I**-element between flow and the integral of effort (or momentum *p*),

and C-element between effort and the integral of flow (or displacement q). In practice, only two kinds of junctions: series or one junction (the flows are equal) and parallel or zero junction (the efforts are equal) and very few standard elements are needed to accurately model most engineering systems.

2.4. Structural analysis

2.4.1. Information theory

Structural analysis analyses the interaction between the different parts of the process. It can be used for the decomposition of a system into weakly coupled sub-systems, and for the detection of the most important variables of the process. Hence, it is possible to design efficient man-machine interfaces (MMI) with useful information. In other words, the process is identified, not to design a control algorithm, but to design a “human supervision system” which will present the right information to the human operator. This is done by data analysis using information theory, based on the entropy and transinformation concepts (Toro, 1982; Cherifi, 1998). These two concepts are used to calculate the degree of the transferred information between variables and sub-systems. This allows the computation of indexes that represent the degree of coupling between variables. This approach is interesting because it is quite easy to apply it and to get useful results. In order to quantify the degree of coupling in uncertain situation, fuzzy sets theory is used.

Entropy: Consider a qualitative variable X whose n modalities occur with probabilities P_1, P_2, \dots, P_n . Its entropy is defined by

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N P_i \log P_i \quad (3)$$

with $P_i = P_r(X = x_i)$.

Let $U_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ and $n(i)$ the number of the observed events ($X = x_i$). The empirical probability of the event ($X = x_i$) is defined by

$$P(i) = \frac{n(i)}{N}, \quad (4)$$

where N is the total number of the observations. In the same way, the empirical entropy is defined by

$$H(X) = - \sum_{i=1}^P P(i) \log P(i). \quad (5)$$

For two variables X and Y , the entropy is

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \log P_{ij}, \quad (6)$$

where P_{ij} is the joint probability of the event ($X = x_i$) and ($Y = y_j$).

Transinformation: The transmitted information between variables X and Y or transinformation is defined by

$$I(X:Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y). \quad (7)$$

Coupling indexes: They measure the information link between two variables. For two variables, the coupling indexes defined by Richetin (1975) and Toro (1982) can be calculated as follows:

$$m_{XY} = \frac{I(X:Y)}{\sqrt{H(X)H(Y)}} \quad \text{where } 0 \leq m_{XY} \leq 1. \quad (8)$$

If the variables X, Y are statistically independent, then $m_{XY} = 0$. If there is some mathematical relationship then $m_{XY} = 1$. In fact, this degree is just a normalisation of the information index. When the coupling index is computed between every pair of variables, a coupling matrix is obtained, which can be exploited in different ways, for example for the decomposition of the system into weakly coupled sub-systems for the extraction of pertinent information (Pomorsky, 1996). In this paper, fuzzy sets theory is used in order to identify the system pertinent variables.

2.4.2. Fuzzy sets theory

Fuzzy sets theory is commonly used in uncertain situations (Zadeh, 1965). The results given by the coupling matrix using information theory are very difficult to analyse. In fact, for each variable, the coupling matrix shows its different coupling degrees with all the other ones of the system. Variables could be strongly coupled, weakly or moderately coupled. In such situations, it is not obvious to draw conclusions about the importance of variables, and the use of fuzzy sets theory is appealing.

Fuzzy sets: Let E be a given set $A \subset E$. The crisp subset A is defined by the membership function

$$\begin{aligned} \mu_A: E &\rightarrow \{0, 1\}, \\ x &\mapsto \mu_A(x) = 1 \text{ iff } x \in A. \end{aligned} \quad (9)$$

Now allow membership functions to belong to $[0, 1]$. A fuzzy subset \tilde{A} is defined by Kaufman (1975)

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in E\}, \quad (10)$$

where

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}}: E &\rightarrow [0, 1], \\ x &\mapsto \mu_{\tilde{A}}(x). \end{aligned} \quad (11)$$

2.4.3. Structural analysis using information theory and fuzzy sets

The proposed approach method consists of three stages:

- getting a file containing data evolutions;
- calculating a coupling matrix $m_{i,j}$ of the system using the data file of the first stage;

- in the third stage, five fuzzy sets are defined and an index that uses the data given by the second stage to calculate what it is called a “fuzzy classification matrix” which allows the decomposition of the system into weakly coupled sub-systems and the extraction of information that could be helpful to the human supervisor.

1. Getting the data file

This stage is very important, because all the results depend on the data file used. The data file must be significant and should be rich in information. Therefore, all variables of the system must be excited in their different operating modes to reflect the characteristics of the system. This means that all controllable variables must be excited. The coupling analysis is based on the entropy (variation) of the variables and it is absurd to vary all variables simultaneously because this introduces an apparent coupling when $m_{i,j}$ is calculated. To avoid this, wait until all the variables reach their steady state and change only one set point variables each time. Next, this data file is decomposed into classes for two reasons:

- First, due to the large number of variables in complex systems and the large number of observations representing the evolution of each variable, calculation is an intensive task.
- Second, each variable X_i takes its value in a set of modalities given as: $M_i = \{m_{1,i}, m_{2,i}, \dots, m_{l,i}\}$. When the joint entropy between a set variables X_k, X_l, \dots, X_m is estimated, the number of modalities considered is equal to the product $C_k.C_l \dots C_m$, where $C_i = \text{card}(M_i)$. When the number of variables is large, the problem of the number of observations necessary for a good estimation of the probability arises. Atteneave (1959) proposes the following criterion which has to be respected for the computation of the joint probability of p variables:

$$N > \prod_{k=1}^p (C_k - 1) \tag{12}$$

2. Getting a coupling matrix

This is the second stage of the method. Data is divided into classes and used to calculate the coupling matrix given by Eq. (8). This matrix contains a lot of information, and fuzzy sets theory is used for its analysis.

3. Getting a fuzzy matrix

Five fuzzy sets are defined: $\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, \tilde{E}_4$ and \tilde{E}_5 , respectively represent sets that are very weakly coupled, weakly coupled, moderately coupled, strongly coupled and very strongly coupled with the overall system variables. Each fuzzy set is represented by its membership function $\mu_{E_1}(x), \mu_{E_2}(x), \mu_{E_3}(x), \mu_{E_4}(x)$ and $\mu_{E_5}(x)$. Gaussian memberships functions have been chosen in a first

Table 1
Fuzzy classification matrix

$C_{E_s}(x_i)$	\tilde{E}_1	\tilde{E}_2	\tilde{E}_3	\tilde{E}_4	\tilde{E}_5
x_1					
x_2					
...					
...					
x_i					$C_{E_s}(x_i)$
...					
...					
x_{n-1}					
x_n					

step. They are defined by the equation

$$\mu_{E_s}(x) = \exp[-k(x - \alpha_s)^2] \quad \text{with } S = 1, \dots, 5, \tag{13}$$

$$\alpha_s = \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}.$$

Now, from $m_{i,j}$, the membership degree of each pair of variables (x_i, x_j) to the different fuzzy sets $\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, \tilde{E}_4$ and \tilde{E}_5 is calculated by

$$\mu_{E_s}(x_i, x_j) = \exp[-k(m_{i,j} - \alpha_s)^2] \quad \text{with } i, j = 1, \dots, n. \tag{14}$$

From this, a coefficient which indicates the membership degree of each variable to the different fuzzy sets is proposed:

$$C_{E_s}(x_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{E_s}(x_i, x_j)}{\sum_{S=1}^5 \sum_{j=1}^n \mu_{E_s}(x_i, x_j)} \quad \text{with } i = 1, \dots, n. \tag{15}$$

System decomposition: The fuzzy classification matrix (Table 1) allows the system to be decomposed into several weakly coupled sub-systems. Indeed, variables in the same system are very strongly coupled together and then have to present similar signatures.

Variables selection: Since the variables of the same sub-system present similar signatures in the fuzzy matrix, they could be represented by only one variable. Then the human operator only has to supervise one variable for each sub-system. Hypothetically, variables that are strongly coupled with many variables of the system need to be carefully observed by the human operator. Therefore, variables presenting a degree in the fuzzy sets \tilde{E}_4 or \tilde{E}_5 within the fuzzy matrix will be pertinent a priori to the human supervisor. These are the variables that are strongly coupled or very strongly coupled with the system. These variables are certainly important since they are implicated in most parts of the system, and they are characteristic of its evolution.

3. Integration of the three modelling techniques for supervision

The integration of functional analysis, structural analysis and bond graph models seems of interest in order to

solve several problems in the supervision of complex systems. It will be shown below how each of them contributes to helping the operators in their supervisory task.

The functional analysis consists of describing the system's operation in terms of goals and functions without taking into account its physical and dynamic behaviour. From a supervision point of view, it could be helpful to the human operator in his supervision task, especially in diagnosis. Indeed, often in their supervision tasks, human operators consider the running system in terms of its functions. Furthermore, physical components can be directly represented in GTST–MPLD model. All of the low-level functions performed by the components of the system are shown. This characteristic makes GTST–MPLD suitable for system diagnosis. This representation makes it very simple to understand how the system operates.

GTST–MPLD shows the components in each function, but does not show the variables they are linked to. In most cases, the human operator acts on variables to change the system's behaviour, to perform and to achieve production, economic and security goals. Functions are implicitly associated with variables, thus justifying an interest in bond graph modelling and structural analysis.

Furthermore, from the modelling point of view, the functional approach is subjective, thus, the model depends more on the designer's analysis even if functional representation based on conservation laws is introduced (Modarres & Cheon, 1999). The choice of a behaviour is dictated by the functions or the goal that should be attained (Lind, 1994).

These functions are described as *useful behaviour* or as the *intended behaviour* associated with a system. The system is then expressed as an entity which processes commodities (things to which value can be assigned) to achieve specific objectives. The commodities are categorised into mass, energy momentum, force charge, electromagnetic wave, and information. Based on this principle the functional primitives (as an objective consequence of a class on functions) are introduced: generate, destroy, control, transform, transport. Then a physical function in a GTST model is described under the following form:

$\langle \text{functional primitive} \rangle \langle \text{variable} \rangle \langle \text{object or class object} \rangle$

$\langle \text{context} \rangle$.

In order to ensure the safety of the engineering process from fault detection and isolation point of view, the dynamic behavioural model and the *clear visualisation of physical phenomena* to the human operator are needed. Complementary to functional modelling, bond graph methodology as a unified and multi-disciplinary methodology helps to understand the basic physical principles and represent them in a graphical way. Furthermore, the bond graph shows up clearly the physical phenomena

which occur in processes such as the energy storage, inertance, transformation of energy and dissipation effects. It has the advantage of an efficient transition to the computer by causality assignment and power direction. The phenomena can be quantified owing to constitutive equations deduced directly from the bond graph. The dynamics are easily displayed to the operator using software such as Twentesim (Twentesim, 1996), where the model is displayed graphically to the operator.

Regarding the understanding and knowledge of the process, four types of information are provided by the bond graph model to the operator: the *existence of the physical link* between two systems by the bond, the power variables show the *type of power* (electric, mechanical, etc.), the half arrow shows the *power direction* and the stroke shows the *causality*.

Supervision activities also include monitoring and the detecting failures, alarm management, diagnosis and decision-making for fault accommodation or system reconfiguration.

At FDI and fault tolerant control (FTC) levels of the supervision, and in the case of incidental or accidental situations, two kinds of information have to be displayed to operators. The first one concerns the detection and isolation of the fault, and the second deals with how continue controlling the process (reconfigurability).

When supervision is associated with alarm processing and diagnosis, the causal properties of the bond graph allow the operator to solve problems related to those tasks.

Indeed, causes and effects in the system are directly deduced from the graphical representation. Alarm management based on causal properties could be studied in two ways based on causal graphs (Ould Bouamama, Dauphin-Tanguy, Staroswiecki & Busson, 1999):

- Supply information about the consequences of failures: starting from a breakdown or physical defect, all the consequences are recovered by a top-down approach.
- It is possible to recover all the causes using a bottom-up approach starting from the consequence of any alarm.

Furthermore, it is possible to localise faults using a structural analysis based on the bond graph approach (Tagina, Cassar & Staroswiecki, 1997). This is not developed in this paper but has already been applied to a nuclear industrial plant.

However, quantitative evaluation of the interactions between the process subsystems and variables are not explicitly shown either by bond graph modelling or by functional analysis.

Structural analysis using information and fuzzy sets theory allows this gap to be filled. In fact it studies the interactions within the system, the coupling between

variables and the partitioning of the system into weakly coupled subsystems.

As noted above, structural analysis allows one to determine and extract the pertinent variables that must be closely observed by the human operator. Based on a functional analysis, each pertinent functions can be associated with corresponding variables. In a same way, it is possible to deduce the associated pertinent functions from pertinent variables deduced from structural analysis. Thus, the set of pertinent functions and pertinent variables are identified.

4. Application

4.1. Description of the steam generator installation

Consider the supervision of the pilot process whose overall view is shown in Fig. 7. The test plant is designed to be a scale-model of a power station and is a complex non-linear system that reproduces the same thermodynamic phenomena as the real industrial process. As shown in Fig. 8, this installation is mainly constituted of four subsystems: a receiver with the feedwater supply system, a boiler heated by a 60 kW resistor, a steam flow system and a complex condenser coupled with a heat exchanger. The feed water flow F_3 is circulated via two feed pumps in parallel connection. Each pump is controlled by an on-off controller to keep a constant water level L_8 in the steam generator. The heat power Q_4 is determined based on the available accumulator pressure P_7 . When the accumulator pressure drops below a minimum value, the heat resistance delivers maximum power, when the accumulator reaches a maximum pressure the electrical feed of the heat resistance is cut off. The expansion of the generated steam is realised by three valves in parallel connection. V_4 is a manual bypass valve, simulating the steam flow to the condenser. V_5 is a controlled position

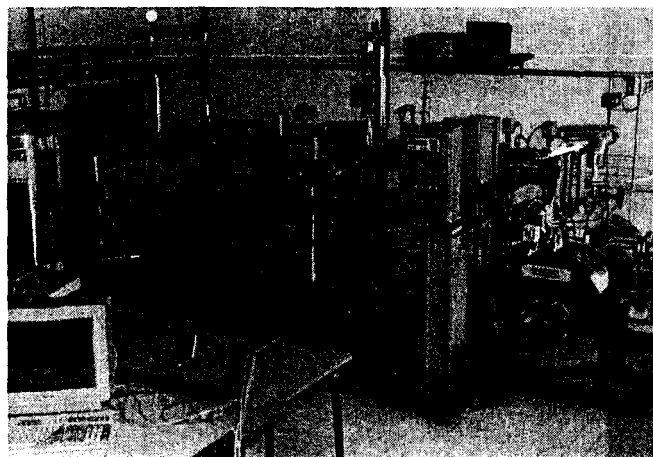


Fig. 7. Overall view of the steam generator pilot process.

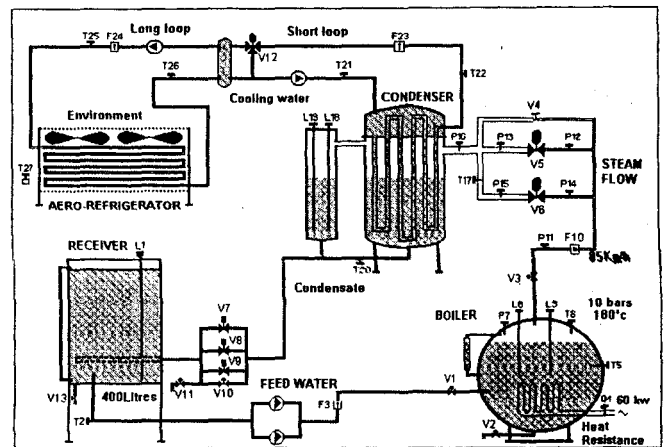


Fig. 8. Technological schema of the steam generator.

valve. V_6 is automatically controlled to maintain proper pressure P_{15} to the condenser. In an industrial plant, the steam flows to the turbine to generate power, but at the test stand, the steam is condensed and stored in a receiver tank and then returns to the steam generator. The steam flow system and the condenser are not taken into account in this paper.

4.2. Functional description of the process

The functional approach based on the GTST-MPLD method consists of modelling the goals and functions of the steam generator in a hierarchical way. First, an identification of the top level objective of the process is attempted. In this system, just the boiler and the receiver are considered and the objective F_0 is to produce a 85 kg/h steam flow. This goal is decomposed into two sub goals. The first F_{11} is that the water supply is realised in the boiler and the second F_{12} is that the energy supply is realised in the boiler (Fig. 9). These two sub-goals must be achieved together in order to achieve the top goal. In fact an “and” connector must be used, but by convention in the goal tree model, “and” connectors are replaced by line connectors. Going further down the GT, each low-level goal is described in terms of a functional decomposition that explains how the goal is achieved. The functions are decomposed into sub-functions until the lowest level where functions address components. This figure clearly shows in hierarchical form how the goal and functions are achieved. It shows too, that there are several ways to achieve a given goal or a function. For example, function F_{22} “control the water level in the boiler” can be achieved in two ways: by manual control F_{33} or automatic control F_{34} as shown in Fig. 9.

The GTST approach allows the representation of the pertinent functions that are necessary to ensure the normal running of the steam generator. A basic function of the GTST-MPLD model is called pertinent if, and

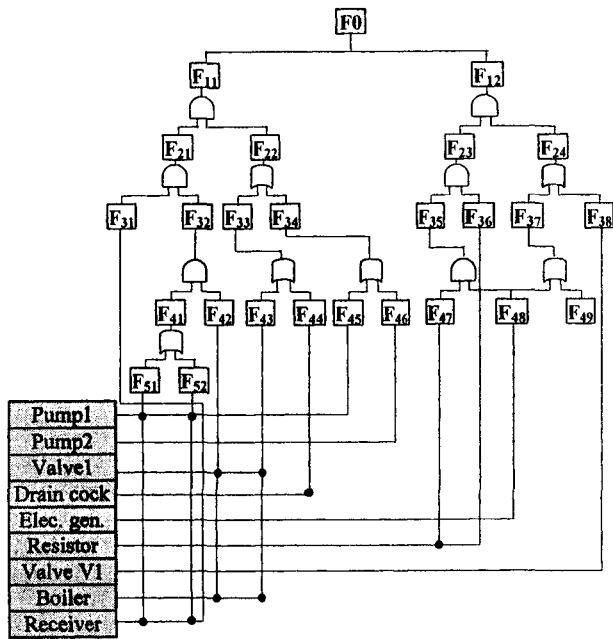


Fig. 9. Functional GTST-MPLD model of the system. F_0 : steam is produced at 85 kg/h, F_{11} : the feed water supply is realised, F_{12} : the energy supply is realised, F_{21} : supply the boiler with water, F_{22} : control the level of water in the boiler, F_{23} : supply the boiler with thermal energy, F_{24} : control the pressure in the boiler, F_{31} : supply the receiver with water, F_{32} : circulate the water from the receiver to the boiler, F_{33} : control manually, F_{34} : control automatically, F_{35} : transform electrical energy into thermal energy, F_{36} : ensure the transfer of thermal energy, F_{37} : control automatically, F_{38} : control manually via V1, F_{41} : provide the pressure difference between the receiver and the boiler, F_{42} : open the supply valve of the boiler, F_{43} : act on the supply valve, F_{44} : act on the drain cock, F_{45} : control via pump1, F_{46} : control via pump2, F_{47} : transport electrical energy, F_{48} : provide electrical energy, F_{49} : act on the valve V2, F_{51} : start up pump1, F_{52} : start up pump2.

only, if it exists on at least one path in the model linked to the main goal by a logical “and” connector only. Based on Fig. 9, functions F_{31} , F_{21} , F_{48} , F_{32} , F_{41} , F_{42} and F_{22} are pertinent. For example, function F_{48} (provide electrical energy) must be realized in order to ensure the steam production (F_0). Consequently, these functions must be more closely observed by the operator, whereas functions F_{52} (start up pump 2) for example, can be replaced by the redundant function F_{51} .

4.3. Bond graph model of the process

As noted above, the bond graph approach is especially appropriate for the multi-energy domain applications since it provides a uniform notation for each domain included in the steam generator.

The fluid in the steam generator is assumed to be a saturated and homogeneous mixture with two phases: vapour and liquid. Furthermore, the heat losses from the boiler to the atmosphere are considered negligible.

Based on these assumptions the bond graph model is given in Fig. 10.

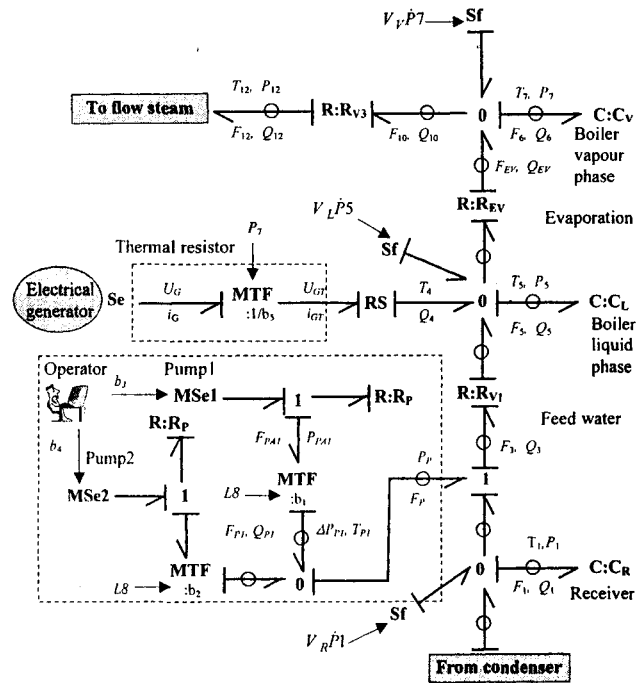


Fig. 10. Bond graph model of the process with liquid and vapour phase.

The energy storage is modelled by the multiport C for coupled energy and the simple C element for single energy. These elements represent the state variables. Storage of coupled energy (thermal and hydraulic) occurs in the receiver (C:Cr), in the liquid phase (C:Cl) and vapour phase (C:Cv) in the boiler. The work done in pressurising the volume of receiver, vapour and liquid phase in the boiler is modelled by the flow source Sf which is proportional to the derivative of effort (pressure). It is equal to $V_R \dot{P}_1$, $V_L \dot{P}_5$ and $V_V \dot{P}_7$, respectively. The effort (pressure) is calculated by the C-two port as indicated above. The number of state variables x is equal to the number of C-elements in the integral causality. From a control and understanding point of view, the physical means of those variables are graphically shown by the bond graph. They are associated with the storage of energy in the receiver (T_1, P_1), in the boiler liquid phase (T_5, P_5) and finally in the boiler vapour phase (T_7, P_7), respectively,

$$x = [T_1 \ P_1 \ T_5 \ P_5 \ T_7 \ P_7],$$

where T_1 and P_1 are the temperature and pressure in the receiver. T_5, P_5, T_7 and P_7 , respectively, represent the temperature and the pressure in the liquid and the vapour phase in the boiler.

The mass exchanged between the liquid and vapour phases (evaporation) is modelled by the multiport R:REv.

The feed water system consists of a pump, a pipe and the tank receiver. The pump is modelled as a modulated effort source (MSe) increasing the output pressure of the receiver P_1 by a amount P_p . The starting of the pumps is

controlled by the Boolean variables b_3 and b_4 transmitted by the operator. In the bond graph approach, the control signal is represented by a simple arrow. If for example b_3 is equal to zero (pump1 not selected), the modulated source effort $Mse1$, and consequently the outlet flow circulated via this pump is equal to zero. A pump characteristic is modelled by the resistive element $R:R_p$. The transformation of mechanical energy into hydraulic energy is modelled by the modulated transformer MTF element whose parameter b_1 (or b_2) depends on the water-level signal L_8 in the generator. The selected pump is cut off (b_1 , or $b_2 = 0$) if L_8 is high.

According to R_p and the MTF elements in indicated causality, the mass flow F_{P1} delivered by the pump 1 can be quantified by the following expressions:

$$F_{PA1} = \Phi_{RP}(\Delta P_{P1}, MSe1),$$

$$F_{P1} = b_1 \cdot F_{PA1}, \tag{16}$$

where Φ_{RP} represents a pump characteristic function given by the constructor. $\Delta P_{P1} = P1 - P_p$, is the difference between the receiver and the outlet pump pressure. The pipe mass flow F_3 is determined as the intersection between the selected pump and the pipe characteristics modelled by the two ports $R:R_{V1}$, which computes the energy associated with the inlet and outlet flows. The transformation of electrical power (from the voltage effort source u_G) into thermal power Q_4 is modelled by the RS -field multiport (which generates an entropy flow) and the modulated transformer MTF element whose parameter b_5 (0 or 1) depends on the generator pressure signal P_7 .

As shown in the bond graph model, this approach not only clearly shows up the energy storage, dissipation effects, and energy transformation but also the direction and the causality effect of the energy flow. This is why bond graph methodology helps the operators to understand the basic physical principles. Furthermore, the dynamics of the process can be quantified. In fact, the sixth-order state equation under non-linear form $\dot{x} = f(x, u)$ can easily be deduced from the bond graph.

The bond graph model can be improved by simply adding new physical elements as R and C . In this case, if the boiler is poorly insulated and the fluid in the steam generator is undersaturated, the thermal losses are modelled as shown in Fig. 11. The thermal losses by conduction from the boiler to metal Q_{GM} and to atmosphere Q_{EX} are modelled, respectively, by resistive elements R_{GM} and R_{EX} . T_{EX} is the ambient temperature represented by the effort source Se . The thermal energy stored by the body T_{MG} of the boiler is modelled by the simple C element $C:C_{MG}$. If the ambient temperature T_{EX} varies thus according to the assigned causality, the consequent effect on stored energy by the metal, the rate change of thermal energy in the boiler (T_7 and T_5) can be evaluated by the operator.

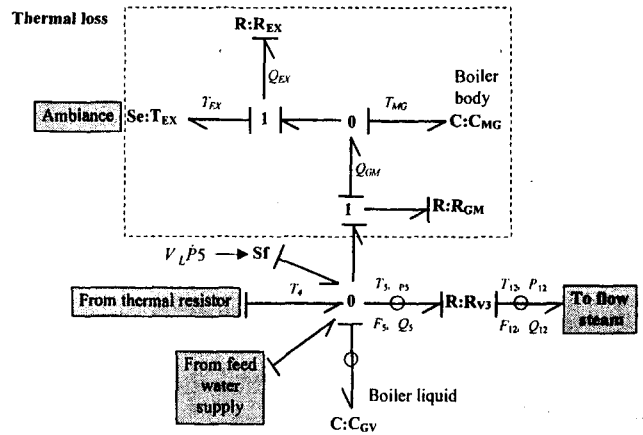


Fig. 11. Bond graph model of undersaturated and non-insulated boiler.

As noted above, the dynamic knowledge, causality and pictorial effects are well presented by the bond graph model. But, the quantitative evaluation of the interactions between the process subsystems and variables are not taken into account. Structural analysis allows this gap to be filled.

4.4. Structural description of the process using information and fuzzy sets theory

4.4.1. Getting a coupling matrix and system decomposition

The analysed process is run, and a rich data file representing the different evolution of variables is observed on the supervision interface. The filtered variables are divided into classes in order to calculate a coupling matrix. In this paper only a part of the system represented by 13 variables is presented. The coupling matrix calculated by Eq. (8) is given by Table 2. It represents the coupling degree between pairs of variables. However, it is difficult to gauge the importance of the variable coupling order or to obtain a decomposition of it. That is why the fuzzy sets approach is used. The obtained fuzzy classification matrix is given by Table 3. This table shows the different system variables and their corresponding degrees in the different fuzzy sets. The variables are classified horizontally (rows) and vertically (columns). Horizontal classification shows which set a variable belongs to. Vertical classification allows the variables of the same set to be classified in the form of their coupling order to the system.

4.4.2. Extraction of pertinent variable

Based on Table 3, it appears that almost all the variables are coupled excepted Q_4 and F_3 , which, respectively, represent the electrical energy and the mass flow of the feed water. Each variable could be associated with the corresponding function(s) given by the GTST model. As an example, consider P_7 , which represents the pressure in

Table 2
Coupling matrix of the system

m_{ij}	P_{14}	T_5	T_6	P_7	L_8	L_9	Q_4	F_{10}	P_{12}	T_2	L_1	P_{11}	F_3
P_{14}	1	0.37	0.62	0.79	0.32	0.31	0.05	0.4	0.81	0.31	0.23	0.36	0.11
T_5	0.37	1	0.41	0.39	0.41	0.35	0.09	0.35	0.38	0.38	0.2	0.41	0.07
T_6	0.62	0.41	1	0.62	0.36	0.33	0.05	0.37	0.61	0.33	0.23	0.36	0.11
P_7	0.79	0.39	0.62	1	0.33	0.32	0.06	0.4	0.84	0.3	0.22	0.37	0.11
L_8	0.32	0.41	0.36	0.33	1	0.49	0.17	0.39	0.32	0.52	0.28	0.46	0.11
L_9	0.31	0.35	0.33	0.32	0.49	1	0.09	0.33	0.31	0.48	0.24	0.4	0.11
Q_4	0.05	0.09	0.05	0.06	0.17	0.09	1	0.11	0.05	0.16	0.02	0.09	0.03
F_{10}	0.4	0.35	0.37	0.4	0.39	0.33	0.11	1	0.4	0.35	0.21	0.45	0.11
P_{12}	0.81	0.38	0.61	0.84	0.32	0.31	0.05	0.4	1	0.31	0.22	0.37	0.1
T_2	0.31	0.38	0.33	0.3	0.52	0.48	0.16	0.35	0.31	1	0.25	0.46	0.15
L_1	0.23	0.2	0.23	0.22	0.28	0.24	0.02	0.21	0.22	0.25	1	0.23	0.06
P_{11}	0.36	0.41	0.36	0.37	0.46	0.4	0.09	0.45	0.37	0.48	0.23	1	0.1
F_3	0.11	0.07	0.11	0.11	0.11	0.11	0.03	0.11	0.1	0.15	0.06	0.1	1

Table 3
Fuzzy classification matrix of the system

$C \setminus \tilde{E}_s$	\tilde{E}_1	\tilde{E}_2	\tilde{E}_3	\tilde{E}_4	\tilde{E}_5
P_{14}	0.13	0.44	0.22	0.18	0.03
T_5	0.14	0.46	0.40	0.00	0.00
T_6	0.13	0.41	0.34	0.12	0.00
P_7	0.13	0.43	0.23	0.17	0.04
L_8	0.07	0.48	0.43	0.02	0.00
L_9	0.11	0.55	0.33	0.01	0.00
Q_4	0.70	0.30	0.00	0.00	0.00
F_{10}	0.11	0.49	0.40	0.00	0.00
P_{12}	0.14	0.43	0.23	0.16	0.04
T_2	0.06	0.55	0.37	0.02	0.00
L_1	0.22	0.75	0.03	0.00	0.00
P_{11}	0.12	0.40	0.48	0.01	0.00
F_3	0.63	0.36	0.01	0.00	0.00

the boiler. P_7 is associated with the function F_{24} “control the pressure in the boiler” in the GTST–MPLD model.

In order to perform this function, the human operator must act on variable P_7 , which affects the lowest level of the three GTST sub-functions. As displayed by the coupling matrix, four variables are strongly coupled: P_{14} , T_6 , P_7 and P_{12} . In fact, they essentially represent the boiler: P_{14} and P_{12} (in a parallel connection) are equal to the boiler pressure P_7 because of low hydraulic loss in the valve V_3 .

From this analysis, when the operator acts on P_7 , he knows which functions of the system are influenced, and via the MPLD matrix, he can determine which components are implicated. This could help him to know which part of the system is affected by acting on such variables. Furthermore, these variables (P_7 , P_{14} , T_6 and P_{12}) are represented by the same sub-system: the boiler. An advantage of this matrix is that it allows the system to be partitioned. From the operator’s point of view, a piece of information is considered pertinent if it plays an important role in the system. In other words, if it affects

different system parts. When the considering is a variable, it is important if it is coupled with several others. Table 2 shows that almost all variables are moderately coupled with each other except Q_4 and F_3 . In this case, there are no strongly coupled variables (in the sense of information theory) with the whole system. However, variable Q_4 representing the electrical energy function, is weakly coupled with the rest of variables. Indeed, from the point of view of behavioural model given by the bond graph representation, Q_4 is the source effort (inlet variable). From the functional point of view given by the GTST–MPLD model (Fig. 9), Q_4 is linked to the providing energy function situated at the bottom of the tree. This function is related to the main goal by “and” connectors only. If this function is not achieved, the main goal, which is “to produce steam”, could never be achieved. This case clearly shows benefits of using the complementary functional and structural approach in order to get a good understanding of the process.

5. Conclusion

The integration of functional analysis, structural analysis and bond graph models seems of interest in order to solve several problems in the supervision of complex systems. The three descriptions have been applied to the steam generator pilot process, and it has been shown how each contributes to help the operators in their supervision task. The functional analysis allows the system operation to be described in terms of goals and functions, without taking into account its physical and dynamic behaviour.

At the FDI level of the supervision system, some knowledge about the dynamic behaviour of the system is required. Furthermore, to deal with and understand the different energy domains included in the steam generator installation a method or language is needed. The bond

graph language is well suited for this purpose. Furthermore, when supervision is associated with alarm processing and diagnosis, the causal properties of the bond graph allow the operator to resolve problems related to those tasks. Indeed, determining causes and effects in the system are directly deduced from the graphical representation. Thus, the alarm management based on causal properties could be studied in this way.

However, quantitative evaluation of the interactions between the process subsystems and variables are not explicitly shown by the bond graph approach. Structural analysis using information and fuzzy sets theory allows this gap to be filled. This approach studies the interactions within the system, the coupling between variables and the partition of the system into weakly coupled subsystems.

Additional work is still required for the validation of multi-modelling approaches, and for the design of human-machine interfaces and functionalities for complex systems supervision.

References

- Atteneave, F. (1959). *Application of information theory to psychology*. New York: Holt Rhinehart and Winston.
- Borne, P., Dauphin-Tanguy, G., Richard, J. P., & Rotella, F. (1992). *Modélisation et identification des processus*. Paris: Edition Technip.
- Cherifi, E. (1998). *Analyse fonctionnelle et structurelle des systèmes homme-machine pour la supervision*. Ph.D. thesis, University of Valenciennes, France.
- Chittaro, L. G. (1995). Functional diagnosis and prescription of measurement using effort and flow variables. *IEE Control Theory and Application*, 142, 420–432.
- Félot, C. (1997). *Modélisation de systèmes complexes: intégration et formalisation de modèles*. Ph.D. thesis, University of Lille 1, France.
- Karnopp, D. C., & Azerbaijani, S. (1981). Pseudo-bond graphs for generalized compartmental models in engineering and physiology. *Journal of The Franklin Institute*, 312 (2), 95–108.
- Karnopp, D. C., Margolis, D., & Rosenberg, R. C. (1990). *Systems dynamics. A unified approach* (2nd ed.) New York: Wiley.
- Kaufman, A. (1975). *Introduction à la théorie des sous ensembles flous*. Paris: Masson.
- Lind, M. (1994). Modeling goals and functions industrial plants. *Applied Artificial Intelligence*, 8, 258–283.
- Millot, P. (1988). *Supervision des procédés automatisés et ergonomie*. Paris: Edition Hermès.
- Modarres, M. (1993). Functional modeling of complex system using a GTST-MPLD framework. *Proceedings of the first international workshop on functional modeling of complex technical systems*, Ispra, Italy (pp. 21–70).
- Modarres, M., & Cheon, S. W. (1999). Function-centered modeling of engineering systems using the goal tree-success tree techniques and functional primitives. *Reliability Engineering*, 64, 181–200.
- Ould Bouamama, B., & Dauphin-Tanguy, G. (1996). Bond Graph model of a steam generator process and its environment. *Proceeding of the 10th European simulation multicongress ESM'96*, Budapest, Hungary (pp. 238–242).
- Ould Bouamama, B., Dauphin-Tanguy, G., Staroswiecki, M., & Busson, F. (1999). Bond Graph technique as a decision making tool in supervision systems. *Proceeding of KKK conference and symposium in graph theoretic and entropy methods in engineering* (pp. 91–97). Ontario, Canada: University of Waterloo.
- Ould Bouamama, B., Thoma, J.U., & Cassar, J.P. (1997). Bond graph modeling of steam condensers. *Proceeding of IEEE, International conference on systems, man, and cybernetic* No. 3, Orlando, USA (pp. 2490–2494).
- Pomorsky, D. (1996). Analysis of dynamical systems based on information theory. *Proceedings of WAC'96 (World Automation Congress) — ISIA'96*, Montpellier, France (pp. 27–30).
- Richetin, M. (1975). *Analyse structurelle des systèmes complexes en vue d'une commande hiérarchisée*. Ph.D. thesis, University Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Tagina, M., Cassar, J. P., & Staroswiecki, M. (1997). Localisation de défaillances par l'approche bond graph. *JESA, RAIRO-APII* 31 (9), 1489–1508.
- Thoma, J. U. (1975). *Introduction to bond graphs and their applications*. New York: Pergamon Press.
- Thoma, J. U. (1990). *Simulation by bond graphs. Introduction to a graphical method*. Berlin, Germany: Springer.
- Thoma, J. U., & Ould Bouamama, B. (2000). *Simulation and modelling in thermal and chemical engineering. Bond graph approach*. Berlin, Germany: Springer.
- Toro, V. (1982). *Contribution à l'analyse structurale des systèmes complexes à l'aide de l'entropie et ses généralisation*. Ph.D. thesis, University of Lille 1, France.
- Twentesim (1996). *Users' Manual of Twentesim (20sim)*. ctrlra Products Inc., Box 217 NL-7500EE Enschede, The Netherlands.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy set. *Information and Control* (8), 338–353.

Model builder using Functional and bond graph tools for FDI design*

B. Ould Bouamama

M. Staroswiecki

G. Dauphin-Tanguy

K. Samantary**

LAIL, CNRS UPRESA 8021

Cité Scientifique, Bâtiment EUDIL

59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

belkacem.bouamama@univ-lille1.fr Tel. (+33) 320337139, Fax: (+33)320337189

Abstract

The main goal of the present paper is to develop and to implement the model builder in view of the design of Fault Detection and Isolation (FDI) algorithms, in the field of thermo-fluid processes. The methodology is based on causal and behavioural analysis of bond graph, structural and functional models. It is proposed so that, in the implemented software, the designer can easily (because of integration of the functional tool as interface with the human operator) build the thermo-fluid dynamic models of most technological processes and generate fault indicators and dynamic global model in symbolic format. Indeed, rather than concentrating on developing specific models for specific situations, it is worth to develop generic techniques which can be applied to any thermo-fluid process. The methodology is applied to a two tank system.

Key words: Bond Graph, Functional, Fault Detection and Isolation, Simulation, Process Engineering, Thermofluid, Thermodynamics.

* This research is supported by EC-funded project "Advanced Decision Support System for Chemical/Petrochemical Manufacturing Processes (CHEM Project)" N° G1RD-CT-2001-00466

**Samantary is with the LAIL as post-doctoral position within the framework of CHEM project

1 Introduction

Fault detection and isolation (FDI) procedures are essential for improving the safety of risk critical processes, such as nuclear power plants, or chemical/petrochemical production facilities. Different approaches to the design of such procedures have been developed in the past twenty years, depending on the kind of knowledge used to describe the plant operation (see [2], [44], [9], [22], [20], [18], [60], [23], [50] and [49] for a recent review).

The modelling step is most important in FDI design, since model based approaches mainly consist in the comparison of the actual behavior of the system with reference behaviors describing the normal operation (for fault detection) or different kinds of faulty ones (for fault isolation/estimation). Once the model is built, fault indicators can be designed using analytical redundancy [56], [46], [50] or observer based approaches [19], [1], [24]. However, obtaining the model is a difficult task, since complex systems, considered in process engineering, are characterized by the coupling of several phenomena of different natures, as opposed to e.g. purely electrical or purely mechanical systems. Bond graphs are a multidisciplinary and unified graphical modelling language, which provides, from this point of view, a convenient and useful tool for FDI design. Moreover, their causal properties are helpful for the generation of fault indicators in a systematic and generic way.

However, in supervision tasks, human operators do not consider the running process in terms of its mathematical behavior model, but rather in terms of the functions it achieves. In order to give the operator a clear view of the system functional organization, and to allow him to estimate the system ability to achieve its goal, it is useful to offer him a functional modelling tool. Besides its ambiguity and subjectivism, a drawback of function analysis is that it describes the system operation only in terms of goals and functions, without taking into account the physical and dynamic behaviors which supports them. Therefore, the association of Bond Graphs with functional models is highly desirable. Furthermore, Bond Graphs allow to develop generic techniques, which can be applied to any thermofluid process, rather than concentrating on developing specific models for specific situations.

There has been a significant research on software modelling tools for process engineering, starting with the description of stationary behaviors [58], [4]. Dynamic systems are successfully considered in Matlab/Simulink libraries [48], or in recent achievements like the modelica modelling language [14], [59]. However, in the first case, the user must introduce the model equations (which means that the model has already been set), while in the second case, the physical phenomena are not explicitly displayed to the user, and the model can not easily be refined, when its structure changes as the result of more

assumptions. For chemical process applications, the Odysseo (Object-oriented Dynamic Simulation Software Environment) toolbox of the Prosim software allows to model chemical processes for the simulation of their dynamic behavior, using fixed input/output causalities [38]. None of these software derive symbolic state equations, the numerical models being used just for simulation.

SYMBOLS-2000 is an object oriented hierarchical hybrid modeling, simulation and control analysis software. It allows users to create models using bond graph, block-diagram and equation models [40]. Differential causalities and algebraic loops are solved out using its powerful symbolic solution engine. Nonlinearities and user code can be integrated in single editing IDE (integrated development environment). It creates high-level C language code and allows any external code embedding. The simulator module has both online and post-display facilities. Event handlers and online event notification and variation of parameters are key features of this advanced simulator. Most control charts and high-level control analysis can be performed. The iconic modeling facility allows system-morphic model layout. It also has many post-processing facilities over the simulated result. The direct C++ compilation allows easy integration of external code.

This paper presents a model builder for the design of FDI algorithms for thermofluid processes. The methodology is based on the analysis of bond graph, structural and functional models. The system dynamics model, and the residuals associated with Analytical Redundancy Relations (ARRs) are generated under a symbolic form. Thanks to a developed generic item database which consists of a set of predefined process, controllers and sensor classes, and has been incorporated as capsules in the software SYMBOLS 2000, the designer can easily build the dynamic and functional models of most thermofluid processes from the Process and Instrumentation Diagram (P&I D) of the plant, and automatically generate ARRs using a toolbox developed in the SYMBOLS environment. This new module FDIPad for drawing architectural models based on these capsules is derived from the existing BondPad module in SYMBOLS 2000. FDIPad is an IDE to enter the plant model, check the consistency of connections, derive the equations for the residuals and the behavioral model and then finally integrate the system to a simulation model. It also provides structural monitoring ability analysis and isolation properties based on the derived residuals. The same IDE can be used to create models for newer database items based on existing capsules (derived or hierarchical sub-models) or bond graph models or combination of both.

The paper is organized as follows : section 2 briefly describes bond graph modelling. In Section 3, a functional classification of thermofluid plant items is derived, based on a physical level analysis. Three process classes, namely storage, transportation and transformation are distinguished, and proved to form a basis of the functional description of any process. In Section 4 energy

transformations performed by plant items are described by means of their behavioral model. Plant items connection rules are analyzed in Section 5, using a formal language based connection grammar. In Section 6, it is shown how the bond graph tool is used for the behavior model and ARRs generation. The software implementation of the model builder is described in Section 7. Finally, Section 8 provides an illustrative application to a two-tanks process, which shows the practicality of the advocated approach, while Section 9 concludes the paper.

2 The bond graph methodology

Bond graphs have been the subject of many presentations in the literature [45], [54], [3], [28], [6], [55], [11]. They have first been used as a modelling tool, and have been extended to the analysis of systems structural properties (controllability, observability) [51], [57] and to fault detection and isolation design, using a qualitative and causal analysis approach [15], [33], [30], [37]. A quantitative approach to ARRs generation was presented first in [53] for one port (single energy) and later for multiport (multi energy) systems [43]. In this section, only those Bond graph elements needed for further use in FDI and functional analysis are presented.

2.1 Single energy bond graphs

The bond graph model of each plant item is derived from the laws of physics, where the inputs and outputs are power or energy. In single energy bond graphs, these variables are associated with only one field of physics (e.g.; electrical, mechanical).

2.1.1 Variables Used in Bond Graph Modelling

The variables used in bond graphs can be classified as follows:

- (i) *Power variables.* Efforts, $e(t)$, and flows, $f(t)$. The power $P(t)$ exchanged by two plant items is the product of an effort and a flow : $P(t) = e(t) \times f(t)$.
- (ii) *Energy variables.* Energy variables are the momentum $p(t) = \int_{t_0}^t e(\tau)d\tau + p(t_0)$, and the displacement $q(t) = \int_{t_0}^t f(\tau)d\tau + q(t_0)$. Energy, $E(t)$ is related to power $P(t)$ at a port by $E(t) = \int_{t_0}^t P(\tau)d\tau + E(t_0)$.

2.1.2 Information Bonds

When the exchanged power is negligible, it is represented by an information bond. Information bonds represent signals (e.g. sensor or controller outputs) and they appear as bonds with full arrows. Figure 1 represents the two possible types of sensors, namely the effort sensor De and the flow sensor Df . The causality assignment depends on the type of the sensor.

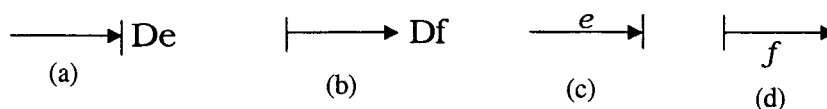


Fig. 1. Information bond: effort (a) and flow (b) detectors, and respective signals (c) and (d).

2.1.3 Basic bond graph elements

There are nine basic bond graph elements, separated into four categories, according to their energy characteristics. These elements and definitions are summarized in figure 2.

Symbol	Definition	Name
$\mathbf{Se} \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$	$e = e(t)$	Source of effort
$\mathbf{Sf} \begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array}$	$f = f(t)$	Source of flow
$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} \mathbf{R}$	$\Phi_R(e, f) = 0$	Resistance
$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} \mathbf{C}$	$\Phi_C(e, q) = 0$ $\Phi_C(e, \int f(t)dt) = 0$	Capacitance
$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xrightarrow{f} \end{array} \mathbf{I}$	$\Phi_I(f, p) = 0$ $\Phi_I(f, \int e(t)dt) = 0$	Inertance
$\begin{array}{c} \textcircled{1} \xrightarrow{e} \\ \textcircled{2} \xrightarrow{f} \\ \text{: m} \end{array} \mathbf{TF}$	$e_1 = m.e_2$ $f_2 = m.f_1$	Transformer
$\begin{array}{c} \textcircled{1} \xrightarrow{e} \\ \textcircled{2} \xrightarrow{f} \\ \text{: r} \end{array} \mathbf{GY}$	$e_1 = r.f_2$ $e_2 = r.f_1$	Gyrator
$\begin{array}{c} \textcircled{2} \downarrow \\ \textcircled{1} \xrightarrow{e} \quad \textcircled{3} \xrightarrow{f} \\ \text{: 0} \end{array}$	$f_1 + f_2 - f_3 = 0$ $e_1 = e_2 = e_3$	Common effort junction
$\begin{array}{c} \textcircled{2} \downarrow \\ \textcircled{1} \xrightarrow{e} \quad \textcircled{3} \xrightarrow{f} \\ \text{: 1} \end{array}$	$e_1 + e_2 - e_3 = 0$ $f_1 = f_2 = f_3$	Common flow junction

Fig. 2. Definitions of the basic bond graph elements

2.2 Multi-energy Bond Graph

In complex processes, several phenomena (chemical, thermal, hydraulic) are coupled. thermofluid systems involve additional complexity in the modelling

task, since the mass that flows through the process carries the internal energy which is stored in it, and which is thus transported from one location to another in a non-dissipative fashion. Using multi-energy pseudo-bond graphs, [5], [25] power variables are vectors:

$$E = \begin{bmatrix} e_h & e_t & e_c \end{bmatrix}^t, \quad F = \begin{bmatrix} f_c & f_t & f_c \end{bmatrix}^t. \quad (1)$$

where e_t , e_h and e_c represent respectively the thermal effort (the specific enthalpy or the temperature), the hydraulic effort (the pressure), and the chemical effort (the chemical potential, chemical affinity or the concentration). f_t , f_h and f_c represent respectively the thermal flow ((by conduction \dot{Q} or by convection \dot{H} i.e. enthalpy flow), hydraulic flow (mass flow \dot{m}) and chemical flow (molar flow \dot{n}). In fact the number of variables is higher than the number of degree of freedom. Consequently, the selection of power variables in process engineering process plants including thermofluid, biological and chemical engineering is not trivial and depends on the type of the modelled process. The list of power variables which can be used in process engineering can be consulted in [55].

For thermofluid processes in which both convection and conduction heat transfer can take place, it is important to well distinguish a model with mass at rest, the Lagrangian Reference Frame, and a model with mass in movement, the Eulerian Frame. This difference is well developed in [55] (chapter 1). For modelling such processes is used pseudo bond graph introduced first by Karnopp [25], [27]. Any bond graph in which the effort-flow variables are not power variables is called a pseudo bond graph.

In thermofluid process, thermal and hydraulic energies are coupled. Their coupling can be represented by a multi-bond as shown in figure 3(c) or by small rings around the bonds (a). Some authors [28] distinguish type of energy using full lines for hydraulic bonds and dotted lines for thermal bonds 3(b).

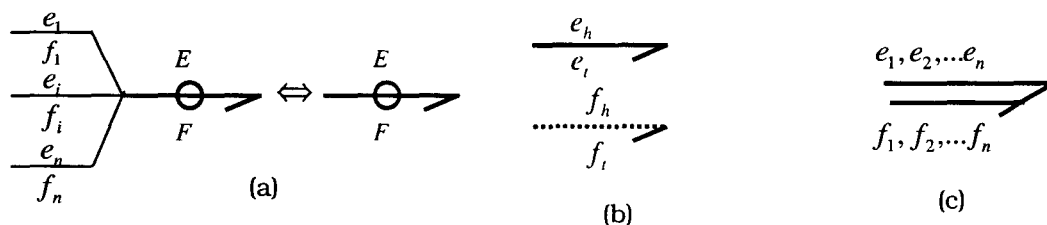


Fig. 3. Multi-energy bond graph representation

A general expression for convected energy is:

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

Taking into account that in practice the kinetic energy term $\frac{\rho v^2}{2}$ is negligible for sufficiently low flow velocities v , the convected energy \dot{H} , is calculated from the mass flow \dot{m} and the specific thermal capacity c_p :

$$\dot{H} = \dot{m}.h = \dot{m}c_pT. \quad (3)$$

Finally, the thermofluid power variables are:

$$E = \begin{bmatrix} e_h & e_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & T \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} f_c & f_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{H} & \dot{m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3 Functional processors

3.1 What is a function ?

From the supervision point of view, integration of functional modelling could be helpful to the human operator, who considers the running system in terms of its functions rather than in terms of its mathematical model.

However, using functional representation needs some preliminary clarification. Indeed, most functional modelling approaches are well structured[8], but the representations are open to different interpretations, leading to as many models as users, since the term "function" is somewhat ambiguous. In the literature, two main definitions of "device functions" exist. The first one, given by Keuneke [29], considers the function as some intended purpose. Indeed, since a device has been designed to achieve some goal, its functions can be defined from the teleological point of view (note that this is an open, subjective interpretation). The second one is proposed by Murakami [41], who defines a function as the consequences of some physical transformation, that is from a behavioral perspective (this is a closed, objective interpretation, [35]).

Following the lines by Murakami and Modarres, the system is here defined as a set of interconnected processors, associating a processor with each plant item, on the basis of its bond graph model [16].

3.2 Processors and the tetrahedron of states

Let E_Σ be the system environment, i.e. the set of processed entities, namely matter (E^m), energy (E^e), and information (E^i). The process is considered

as a set of changes which affect material, energy or information. For this, let us consider the well known tetrahedron of states which has been proposed initially by Paynter [45] and further by [54] (fig.4a). It consists of four generalized variables ($e, f, p,$ and, q) and five generalized relations which represent the abstractions of the relations between variables in different physical theories Those four kinds of variables can be arranged on a circle, such that the tetrahedron displays the integrations transforming flow into displacement and effort into momentum in a counter clock wise rotation. The C -element introduces a functional relation between displacement and effort, the I -element between momentum and flow, and the R -element between effort and flow.

Thus the tetrahedron of states contains four generalized variables and five relations among them; three relations are constitutive equations ($\Phi_R(e, f, R)$, $\Phi_C(e, q, C)$, and $\Phi_I(e, p, I)$) and two are structural equations which are independent of any metric notion and correspond to two mathematical operations: integration and derivation. This classification is such that the product of an effort by a flow ($e.f$) always has the meaning of *power*. The product of a displacement by an effort ($q.e$) means *potential energy*. The product of an impulse by a flow ($p.f$) means *kinetic energy*.

From the tetrahedron of states, the system of transformation of power and energy (fig.4b.) can be derived.

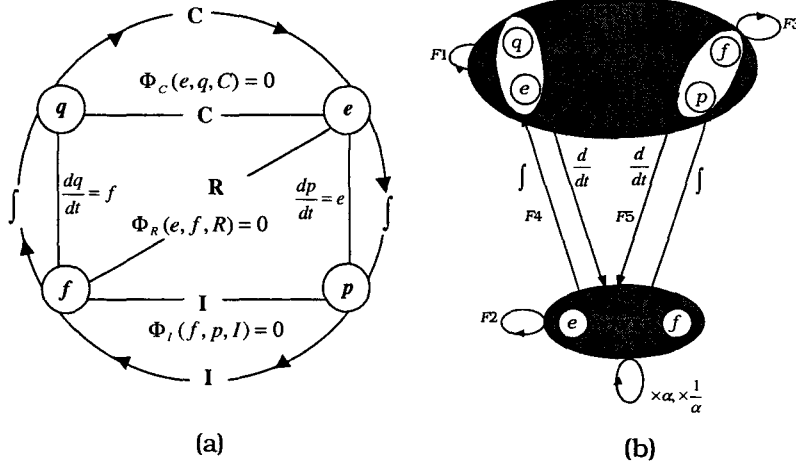


Fig. 4. System of transformations of power and energy induced by the tetrahedron of states

From this system, three transitions, namely the structural relations of the tetrahedron, can be associated with some processor. Transition F_4 shows power **accumulation (A-process)** into energy by integration, while F_5 shows energy **transfer (T-process)** through derivation into power, and $\alpha, \times \frac{1}{\alpha}$, shows power **conversion or transformation (C-process)** using algebraic relations. Therefore three general processors, of type **A, T, C** can be defined in the context of energy system. The three other relations, F_1, F_2 and F_3 ,

correspond respectively to the constitutive equations $\Phi_R(e, f)$, $\Phi_C(e, q)$ and $\Phi_I(f, p)$, and only denote constraints among the states of the environment.

In summary, functional modelling (in the sense of [16]) can be achieved using two classes of processed entities (i.e. power and energy) represented by vectors built on the four generalized variables, and three classes of processes, namely storage (**A-process**), transportation (**T-process**) and transformation (**C-process**).

- *A-processes* receive power as input and produce energy (potential and/or kinetic) as outputs by storage. They belong to a class of *power to energy transformation by integration*

$$E^{Po} \xrightarrow{\int} E^{en}, \quad (e, f) \rightarrow \{(q, e), (p, f)\} \quad (5)$$

- *T-processes* receive energy as inputs and produce power (i.e. flow of energy) by transportation. They belong to a class of *energy to power transformation by derivation*

$$E^{en} \xrightarrow{d/dt} E^{Po}, \quad \{(q, e), (p, f)\} \rightarrow (e, f) \quad (6)$$

- *C-processes* receive power as inputs and produce power by conversion, transformation, dissipation etc. They belong to a class of *power to power transformation using algebraic equations*

$$E^{Po} \xrightarrow{\alpha:1/\alpha} E^{Po}, \quad (e, f) \rightarrow (e, f) \quad (7)$$

Remark 1 *the fourth possibility, namely energy to energy transformation $E^{en} \xrightarrow{1} E^{en}$, $\{(q, e), (p, f)\} \rightarrow \{(q, e), (p, f)\}$ corresponds to a path of length at least two in the graph of figure 5. Therefore, such transformations consist, at least, of two processes of type $\{A, T, C\}$.*

Figure 5 gives the general graphical form of each processor class.

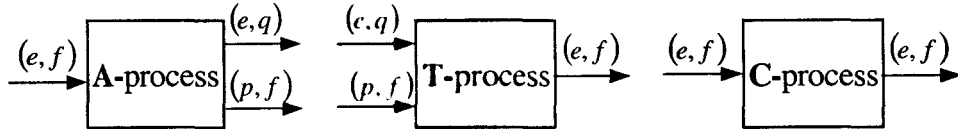


Fig. 5. General forms of the functional diagrams corresponding to the $\{A\}$, $\{T\}$, and $\{C\}$ processes

3.3 The thermofluid process classes

From the plant item point of view, A – *processors* are e.g. receivers, boilers, tanks, condensers, etc. which perform a storage process. In bond graphs, a storage process is associated with a capacitive multiport (C-field). The dynamic model of A – *processes* is given by the general constitutive laws for the C-field, which link the effort and the generalized displacement.

Remark 2 *The compressibility and fluid inertia are from a bond graph point of view a storage elements. (C and I elements), but from a functional point of view they belong to a phenomena but not to a technological components. This is why, they will be considered as a phenomena which belongs to a transportation process. Thus, for instance a compressible fluid with mass inertia and flowing through a pipe belong to a transportation process with an RIC dynamic model. On one hand, in classical bond graph approach, are considered just a phenomena (represented mainly by R, C and I element) [45], [54], [3] and [39]). On another hand, from a functional point of view, the process is considered only in term of it's function [34], [8], [16]. In the proposed approach, the processes are considered is term of the type of power and energy transformation which are quantified based on bond graph modelling.*

Resistive (dissipative) and transformation processes associated with functional C – *processors* receive power and produce power. Resistive processes are valves, restrictions, friction, etc. which transform power into power by dissipation. Transformer processes are pumps, motors, turbines, etc. which transform power from one type into power of another type.

In transportation processes, the driving force which leads to material transport is due to the difference between upstream and downstream efforts (effort gradient, pressure drop, chemical potential difference, temperature difference, ...). This process (T – *process*) receives the energy associated with the pair (e, q) or (f, p) as an input and produces the power associated with the pair (e, f) (or directly with the flow in pseudo bond graph) as an output. Since only real (i.e. with energy dissipation) transportation process are considered, a T – *process* is always grouped with a C – *process* and noted as a TC – *process*.

Both resistive and transformation processes (as bond graph multiport) are described by algebraic relations relating the effort to the flow variables. From a functional point of view, the resistive multiport can be associated with differential equations, if compressibility and/or inertia of the fluid is considered, but then the process is to be considered as an actual transportation process as mixed TC – *process*.

Based on the functions achieved by the items of the three classes, a (non exhaustive) classification of thermofluid processes is given in figure 6. Thermofluid energy sources, similar to those given in bond graphs, are added to

the thermofluid process classes. The sources can be modulated by any external control signal. For instance, the pressure or mass flow source can be provided by a single pump which is not connected to any pipe, meaning that the reaction of the upstream system is not taken into account. The thermal source can be produced by a heater. The thermofluid source consists of hydraulic and thermal conjugate flows, transferred by the convection of the fluid.

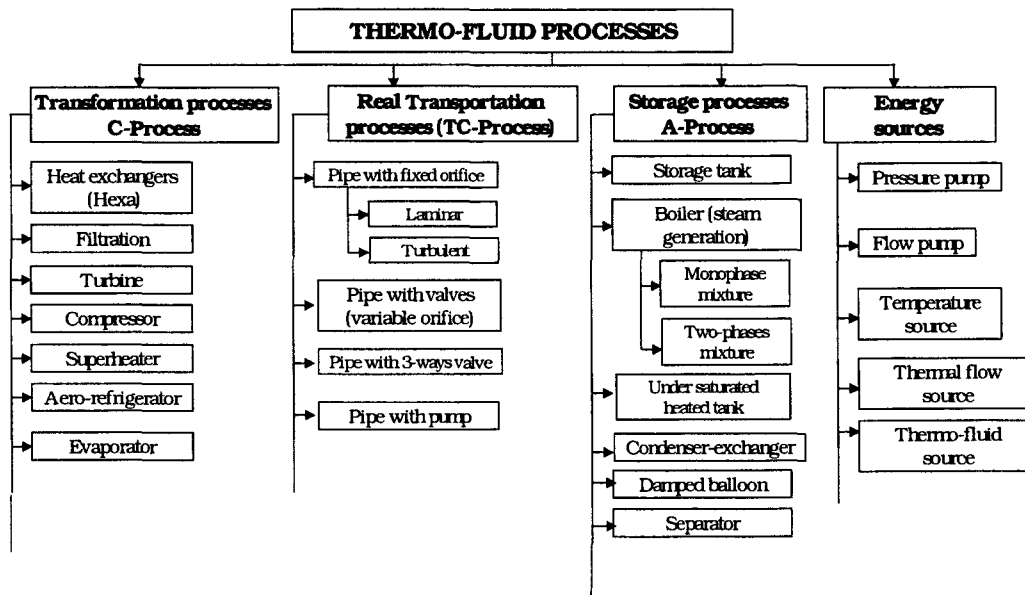


Fig. 6. Basic package structure of the thermofluid processes

4 Component connection grammar

Complex systems are built by the inter-connection of low-level components. Many hierarchical levels can be considered between the field level and the overall system level. At each level, plant items can be associated with a functional class and with a behavior model. When connecting the functional diagrams of a subset of plant items, connection rules have to be satisfied, so as to ensure that the obtained high level plant item has a physical meaning, i.e. its functional type is well defined. Connection rules are deduced from the tetrahedron of states. Using formal language notations, they are expressed by means of a syntax which defines valid high level processes.

4.1 Connection rules

Since each process is associated with a functional type which belongs to the vocabulary $V = \{A, T, C\}$, a sequence of connected items (e.g. a valve, a pipe, a tank,...) can be represented by a chain (a "word") w whose characters are

elements of $V = \{A, T, C\}$. Using such chains, [17] proves that four connection rules define the set of syntactically correct sequences of connected items:

$$\begin{aligned}
 R0 &: w = C.w_C + A.w_A + T.w_T \\
 R1 &: w_C = C.w_C + A.w_A + \varepsilon \\
 R2 &: w_A = T.w_T + \varepsilon \\
 R3 &: w_T = C.w_C + \varepsilon
 \end{aligned} \tag{8}$$

where w is a chain which represent an element of V^* , the language constructed on $V \cup \{\varepsilon\}$, and ε is the word of length zero; w_C (resp. w_A, w_T) are chains which follow a C -process (resp. a A -process, a T -process). Those rules mean respectively that : ($R0$) a process sequence can begin with any process of the three defined classes namely A, T , or C ; ($R1$) successors of C -processes start with a C or with a A -process; ($R2$) successors of A -processes start with a T -process; ($R3$) successors of T -processes start with a C -process. Fig. 7 shows the finite state machine which recognizes the language $L(G)$ defined by the connection rules $Ri, (i = 0 - 3)$ given above. Each path of length l starting from node 0 generates a syntactically valid sequence of l processors.

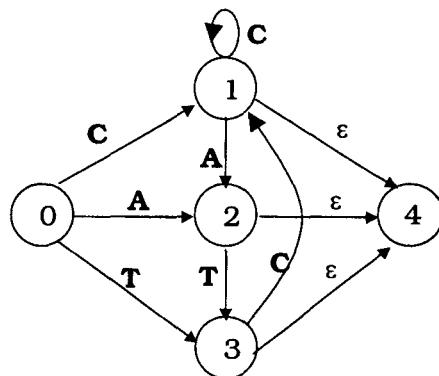


Fig. 7. Transition system G that recognises language $L(G)$

It can be noted that rules $R0 - R3$ match our intuition that a process sequence can begin and end by a process which belongs to one of the defined classes (A, T, C); a power can be subject to an infinite number of conversions, losses, dissipation (i.e. C -processes); after a storage process (A -process) an energy can be subject to anything but a C -process; a T -process is always associated with a C -process (loss of energy, dissipation, etc.).

4.2 Equivalence rules

The set of syntactically valid chains can be equipped with an equivalence rule. Indeed, a syntactically valid sequence of N processes is equivalent to a global

process which receives as input the inputs that enter the first process and produces as output the outputs produced by the last process. For example, in fig.8(a) the AT sequence is equivalent to a global process of type C , thus giving the equivalence $AT = C$. However, there exists many sequences of processes without any equivalent process as shown in figure 8b.

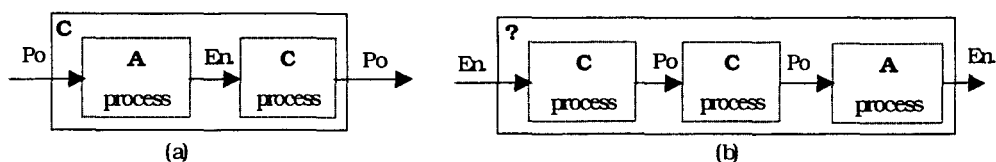


Fig. 8. Equivalent sequence

Then, according to the inputs and outputs at the beginning and the end of the chain, the following equivalence rules hold :

- (i) a chain which processes power into power is equivalent to a whole C-process,
- (ii) a chain which processes power into energy is equivalent to a whole A-process,
- (iii) a chain which processes energy into power is equivalent to a whole T-process.

These three subsets cover all the chains that can be encountered in any valid network. Thus, their union is equal to $L(G)$.

In [16] it is proven that :

- (1) a network is syntactically valid if each chain of this network is valid,
- (2) a functional model is syntactically valid if all its levels of abstraction are valid networks.

The equivalence rules are helpful guides for hierarchical organization. In a top-down approach they give the general form of all the chains of the lower levels of abstraction. In a bottom-up approach they give the type of the equivalent high level process.

5 Behavior model using Bond Graph

Functions describe the type of transformation that plant items involve on energy and power. The physical laws expressing how this transformation is done are mathematically described by the **behavior model**. From the dynamic behavior point of view, each subclass of A, T, C processes consists of a set of bond graph elements.

As discussed previously the problems in model building for process engineering are in practice mainly of two kinds: causal and behavioral. For those tasks, the submodels should be causally connectable and the obtained global model

should be accurate. Note that the connection rules as given above concerns just the functional connection: the inputs and outputs are a power or an energy. In the next section the causality from the algorithmic point of view is discussed.

5.1 Causal properties of thermofluid processes

In the functional modelling, the causality problem (i.e. algorithmic level of modelling) is not taking into account (see [31] [29] [8] [7] [29] [16] [32]). From a physical point of view, physics is acausal. But, from a functional point of view, as explained previously, the set of processes of types (A, T, C) receive power or energy and produce power or energy according to the connection rule. It means that there is a "causal" transformation for each type of process.

5.1.1 Causality for storage processes class

A storage process is associated with a C-multiport. A storage process receives power as inputs (from transportation **T**-process) and produces energy by storage (see 5). From the thermofluid pseudo bond graph model, the inlet power is associated with hydraulic flow and thermal flow. The stored energy (by power integration) can be calculated by the constitutive equation of C-multiport. The energy variables in pseudo bond graph (which can be evaluated) are associated with time integral of mass flow ($m = \int \dot{m} dt$), and integral of enthalpy flow ($H = \int \dot{H} dt$).

In practice the used variables are temperature and pressure (and/or level). The thermofluid effort variation (pressure and temperature for instance) in the storage process is due to the inlet and outlet flow variation. We consider that for storage processes, the causality is integral: the inputs are flows (F), and the output is the efforts (E) (fig. 9). The pressure is associated with volume (hydraulic displacement) and the temperature is associated with entropy (thermal displacement). Parameters are introduced as attributes. F , and E represent the vectorial power variables (see. equ. 4). The suffix "in" and "out" represent respectively input and output. F_{in} and F_{out} are respectively the algebraic sum of inflows and outflows

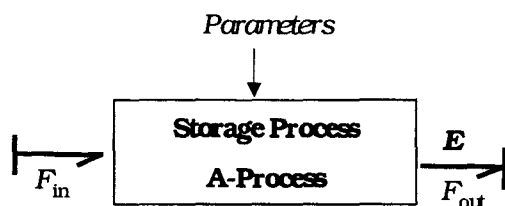


Fig. 9. Integral causality for storage processes (A-process)

5.1.2 Causality for TC processes class

Concerning the transportation processes (T-process) associated with dissipation processes (C-process) (since we consider actual transportation processes instead of ideal ones), the driving force which leads to energy dissipation or material transportation is the difference between the upstream and downstream efforts (pressure drop, chemical potential difference, temperature difference). The process sequence TC receives as input the energy provided by A – process and produces as output the power. Usually the causality for a pipe in thermofluid processes is the following: the input is the driving force (effort) and the output is the flow. Thus, from a dynamic modelling point of view, TC – Process (for the pipes subclass) represents an RI system. In the thermofluid process, the inductance I concerns of course only hydraulic energy due to the mass inertia of the fluid. Another type of C-process concerns power transformers. This type of C – process receives power as inputs and produces power by conversion (motor, turbine, ...).

Globally, most of TC – processes are mainly modelled by R-multiport. The assigned causality for TC – processes will be arbitrary. It depends on the inlet and outlet signal imposed by the connected process at upstream and downstream, it could be in conductance causality (fig. 10a), in resistance causality (fig. 10b), or arbitrary (fig. 10c).

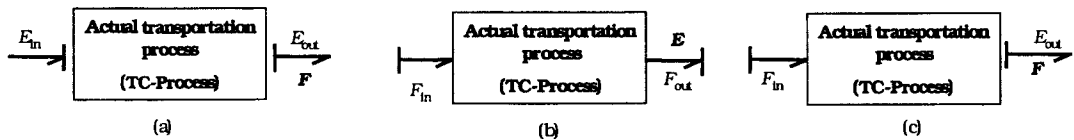


Fig. 10. Conductance (a), resistance (b) and arbitrary causality for TC-process

5.2 Bond Graph model of basic phenomena

In the paper is presented just for illustration the dynamic bond graph model of a simple storage tank as a subclass of storage process class. Other models because of limited place are not presented. Some of them (boiler, pipe, condenser, ...) can be consulted in [55] [42].

5.2.1 Storage processes class

According to the assigned integral causalities of the multiport C , and the zero vectorial junction (conservation thermal and mass law energy), the outputs of the accumulator are calculated by the constitutive equation of the multiport C of type as follows:

$$E = \begin{bmatrix} e_h \\ e_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{ch} (\int (F_{in}, F_{out}) dt) \\ \Phi_{ct} (\int (F_{in}, F_{out}) dt) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_{ch} (m, H) \\ \Psi_{ct} (m, H) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Φ_{ch} and Φ_{ct} are strongly non-linear relations and depend on the thermodynamic state (saturated, under saturated, two phases ...), of the fluid. We assume that a perfect mixing occurs rapidly in each accumulator.

5.2.1.1 Storage tank This subclass is used in industry only to store the fluid which is generally under saturated (since not heated). The icon of such a component and the corresponding bond graph model are given in figure 11.

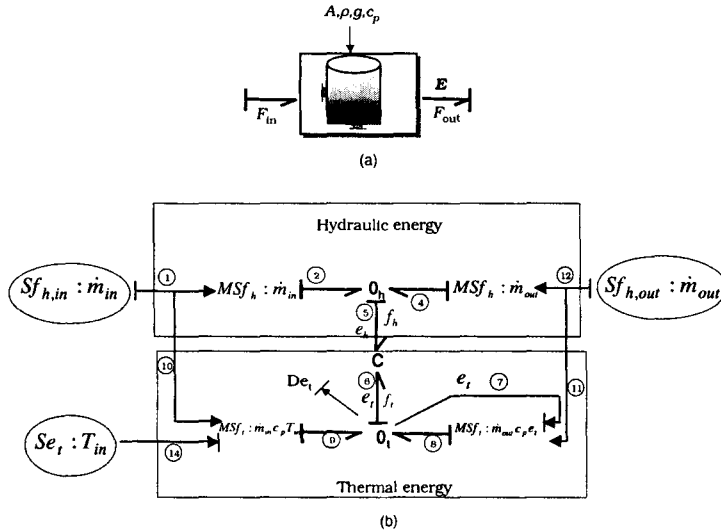


Fig. 11. Storage tank component (a) and bond graph model

The bond graph thermal C-element depends on hydraulic state variable (mass m). There exists thus two causal paths from hydraulic flow source to the thermal state variable as shown by the bond graph model 11b.

In the industrial process, the instrumentation system consists of two effort detectors, pressure ($De_{h,p}$) and temperature (De_t) sensors and level sensor $De_{h,l}$

$$DE = \left[De_{h,p} \quad De_t \quad De_{h,l} \right] \quad (10)$$

The level sensor can be considered as effort detector because the level variable depends in fact on pressure in the under saturated state. But in the saturated it depends on both pressure and on mixture quality of steam (in the boiler for instance). Thus in fact it depends on the volume (displacement variable).

The dynamic model is generated under state equations form. The state variables are associated with integral of hydraulic flow (\dot{m}) and thermal flow (\dot{H}). The state vector x does not appear on the bond graph, but only its derivative. In the storage component the dimension is 2 (Two ports C):

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} f_h \\ f_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{m} \\ \dot{H} \end{bmatrix} \quad (11)$$

The actual sources noted u are the inlet mass flow \dot{m}_{in} , outlet mass flow \dot{m}_{out} and the inlet temperature T_{in} of the fluid. As usually described in the literature [26] [27] [39] [36], the enthalpy flow is not a controlled source, but an energetic source which depends on temperature and mass flow (which can be provided by any pump). The state equations are directly deduced from a bond graph model in a systematic way (for details see [55], appendix1 or [11], chapter1). From figure ??, we obtain:

$$\begin{cases} u = [\dot{m}_{in} \ \dot{m}_{out} \ T_{in}] \\ \dot{x} = f(x, u) \Rightarrow \begin{cases} \dot{m} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \\ \dot{H} = \dot{m}_{in} c_p T_{in} - \dot{m}_{out} \cdot c_p \cdot \frac{H}{m} \end{cases} \\ y = C(x) \Rightarrow \begin{cases} De_{h,p} = \frac{1}{\rho C_h} \cdot \dot{m} - g z_p \\ De_t = \frac{1}{c_p} \cdot \left(\frac{H}{m} \right) \\ De_{h,l} = f(De_{h,p}) = \frac{De_{h,p}}{\rho g} + z_p \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

The pressure (effort variable e_h) at sensor position z_p ($z_p \in [0, z_{\max}]$) in the tank and the average temperature (effort variable e_t) are given by the constitutive equations of thermal and hydraulic bond graph capacity in integral causality:

$$e_h = \begin{cases} \frac{1}{C_h} \int_0^t f_h dt + e_h(0) - \rho \cdot g \cdot z_p & \text{if } e_h < \frac{1}{C_h} \cdot z_{\max} \\ \rho \cdot g \cdot z_{\max} & \text{if } e_h = \rho \cdot g \cdot z_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

$$e_t = \frac{1}{C_t} \int f_t \cdot dt + e_t(0)$$

where z_{\max} , ρ and g are maximal level of the tank, density of the fluid and gravity. For a cylindrical tank, $C_h = \frac{A}{\rho \cdot g}$.

The thermal capacity C_t is modulated by effort variable, i.e. the thermal energy depends on the hydraulic energy:

$$C_t = C_t(e_h) = \frac{g}{A \cdot c_p (e_h + \rho \cdot g \cdot z_p)} \quad (14)$$

Equations of type 13 are needed for ARRs generation.

6 Bond graph representation of a monitored system

A monitored system can be represented as shown in figure 12. It consists mainly of two parts: the first processes powers and energy (the plant and the set of actuators), the second processes signals (the information system, i.e. the sensors and the control system).

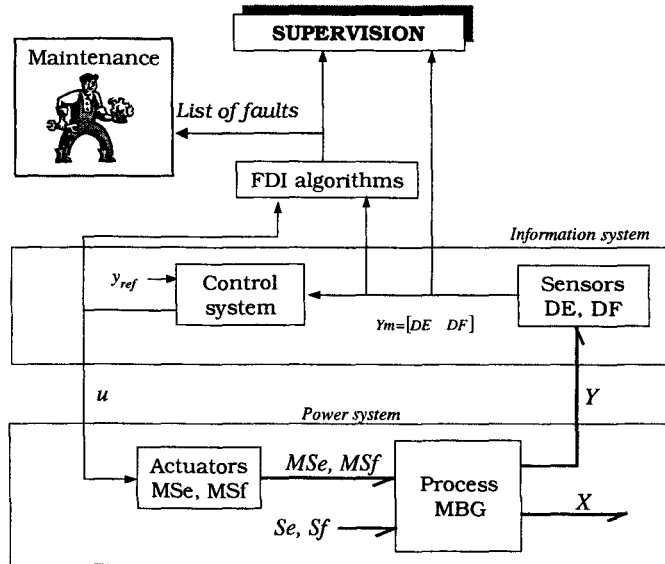


Fig. 12. Bond Graph representation of the supervised system

The bond graph model represents the energetic part of the system. The actuators are modelled by sources. The sources can be simple (Se, Sf) e.g. pump, heater, supply pressure, or modulated (MSe, MSf), i.e. controlled by an external signal provided by a controller or by the user. The exchanged power is represented by a half arrow (a bond) which labels power variables. In the information system the exchanged power is negligible, it is represented by an information bond.

A system is described by a set of constraints Φ , a set of variables Z , and a parameter vector θ . The variables can be known or unknown according to the fact they are measured or not.

(1) Constraints

The constraints Φ can be seen as any relation which links the system variables and parameters. The set of constraints includes constraints which describe the structure (Φ_j), the behavior (Φ_b), the measurements (Φ_m), the control system (Φ_c), and the actuators Φ_a

$$\Phi = \left\{ \Phi_j \ \Phi_b \ \Phi_m \ \Phi_c \ \Phi_a \right\} \quad (15)$$

The structural equations Φ_j are independent on any metrics, and represent a set of conservation laws (of mass and of energy), equilibrium equations. They are deduced from junction equations. The number of Φ_j equations is equal to the sum of the numbers of "0-junction", "1-junction", and the 2-ports elements, TransFormers (TF) and GYrators (GY) elements.

$$\begin{aligned} \Phi_j &= \{\Phi_{j0}\} \cup \{\Phi_{j1}\} \cup \{\Phi_{TF}\} \cup \{\Phi_{GY}\} \\ \Phi_j &\in \mathfrak{R}^{n_j}, \text{ where } n_j \text{ is the number of junctions} \end{aligned} \quad (16)$$

The behavioral equations Φ_b are mathematical expressions which describe how the energy transformation is done (the physical laws). In a bond graph models, they are called "constitutive laws" and they are based on the bond graph elements R , C and I .

$$\Phi_b \in \mathfrak{R}^{n_e} \text{ where } n_e \text{ is the number of bond graph } \mathbf{R}, \mathbf{C}, \text{ and } \mathbf{I} \text{ elements.} \quad (17)$$

The measurement constraints Φ_m describe the measurements which are available. They expresses the way by which the sensors transform some state variables of the process into output signals which can be used for FDI and control purpose. In bond graph models the sensors are represented by flow detectors DF (or effort detectors DE):

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \{\Phi_{DE}\} \cup \{\Phi_{DF}\} \\ \Phi_m &\in \mathfrak{R}^{n_s} \text{ where } n_s \text{ is the number of sensors.} \end{aligned} \quad (18)$$

DE consists of pressure, temperature and level sensors. DF consists only of hydraulic mass flow sensor : $DE = \left[De_{h,p} \ De_t \ De_{h,l} \right]$, $DF = Df_h$

As said previously, level sensor $De_{h,l}$ can be dependent or not on pressure sensor $De_{h,p}$.

Control constraints Φ_c describe the control algorithms. The inputs are the set points and the sensor outputs. The outputs u act on the actuators, namely the modulated (effort) MSe or flow (MSf) sources.

$$\begin{aligned}\Phi_c(u, y_{ref}, Y_m, \theta_{reg}) &= 0 \\ \Phi_c &\in \mathfrak{R}^{n_c} \text{ where } n_c \text{ is the number of controllers}\end{aligned}\tag{19}$$

where θ_{reg} is a controller parameters (gain, integral time, ...), y_{ref} , and Y_m represent respectively the set point value, and the sensor outputs.

The control sources constraints Φ_a describe the controlled energy source models (controlled pump, controlled heater,...). The inputs are the control signal u provided by the controllers and the output is the regulating variable MSf or MSe (such as the mass flow provided by a volume flow rate pump to control a level in a tank).

$$\begin{aligned}\Phi_a(MSf, u) &= 0, \quad \Phi_a(MSe, u) = 0 \\ \Phi_a &\in \mathfrak{R}^{n_a} \text{ where } n_a \text{ is the number of controlled sources}\end{aligned}\tag{20}$$

Unlike structural, and behavioral equations, which use power variables as input-outputs, measurement and control algorithms use information signals. Finally the number of constraints is equal to $(n_j + n_e + n_s + n_c + n_a)$:

$$\Phi \in \mathfrak{R}^{n_j + n_e + n_s + n_c + n_a}\tag{21}$$

(2) Variables

The constraints of the set Φ apply to a set of variables Z , which are known (K) or unknown (X).

$$Z = X \cup K\tag{22}$$

The unknown variables are the power variables (flow and effort) which label the bonds. The vector X containing all the power variables is

$$\begin{aligned}X(t) &= \{e_1(t), f_1(t)\} \cup \{e_2(t), f_2(t)\} \dots \cup \{e_{n_e}(t), f_{n_e}(t)\} \\ X &\in \mathfrak{R}^{2*n_e}, \text{ where } n_e \text{ is the number of bond graph R,C, and I elements}\end{aligned}\tag{23}$$

The subset K of known variables contains the control variables u , the variables whose value is measured by a sensor Y_m and the controlled (MSe , MSf) and perturbation (Se , Sf) sources

$$K = MSe \cup MSf \cup Se \cup Sf \cup Y_m \cup u. \quad (24)$$

Finally, $Z \in \mathfrak{R}^{2*n_e+n_k}$, where $n_k = n_s + n_a + n_c$.

(3) Parameters

$\theta \in \mathfrak{R}^p$ is a parameter vector which is associated with the characteristics of the R,C, and I elements, i.e. flow coefficient, capacity value (which can be variable),....

7 Generation of fault indicators

FDI procedures considered in this paper are based on residuals designed through the analytical redundancy approach. When compared with observer based residuals, analytical redundancy based residuals provide many interesting features:

- they are simple to understand, since they correspond to relations between system variables which can be explained from the physical model,
- these relations can easily be graphically displayed, using causal graphs, bipartite graphs, bond graphs,
- they can easily be given ad hoc structural properties,
- they can be defined under a symbolic form, using formal computation software.

In a Bond graph model, an ARR has the form:

$$f(DE, DF, Se, Sf, MSe, MSf, \theta) = 0 \quad (25)$$

Analytical redundancy based FDI algorithms first compute a residual, using the so-called "computation form"

$$r = f(DE, DF, Se, Sf, MSe, MSf, \theta)$$

and then perform a test to check whether this residual is really zero (in practice, modelling uncertainties, unknown inputs and measurement noises lead to check if the residual value - or mean value - is in a vicinity of zero).

A residual will be coherent with the model of the system if it is null or inferior to a chosen threshold. The coherence of each residual is tested using a direct comparison between its value and a threshold ϵ . The aim of the isolation step is to provide a list of elements which are failing. The recognition procedure compare the coherence vector with all the signatures and determines which of the signatures are the closest.

7.1 Structural analysis

Let s be a binary relation between Φ and Z , such that $s(f_i, z_j) = 1$ if and only if the constraint $f_i \in \Phi$ applies to the variable $z_j \in Z$ ($s(f_i, z_j) = 0$ otherwise). The structure of the system is the bi-partite graph whose binary incidence matrix follows from the binary relation s . It is known that any (finite dimensional) bi-partite graph can be canonically decomposed into three sub-graphs (which represent subsystems), namely the under, just and over-constrained subsystems. It was shown in [12] that the over-constrained subsystem is the monitorable part of the overall system, since it is the only one to exhibit some redundancy, which can be expressed by analytical redundancy relations (ARRs). Indeed, the model of an over-constrained subsystem contains more constraints than unknowns, so that some compatibility conditions must hold for this system to have solutions. The ARR are just these compatibility conditions, which are expressed by the existence of relationships between the known variables [50], [44].

7.2 ARR generation from a system of equations

Finding the ARR under the symbolic form 25 can be done using several approaches. In the first approach the unknown variables are first computed as functions of the known ones, and then this solution is substituted into the remaining relations (such remaining relations exist since the monitorable system is over-constrained). In the second approach, the unknown variables are eliminated from a subset of the monitorable subsystem equations, which directly provides the ARR. In the linear case, elimination can be performed thanks to a projection technique, leading to parity space residuals [9]. For non-linear systems, formal elimination can be performed using available software like Matlab, [48]. Details on elimination theory may be found in [13] [47]. Note that this supposes the system equations to be given under an appropriate (polynomial) form, so as to apply results from elimination theory [10], [21], [49].

7.3 ARRs generation from a bond graph model

In the cited model based methods, the model is given under complicated equations with sometimes any physical means for unknown variables, the sensors placement is not clearly shown in the process. The constraints are not deduced in a systematic way. It is not trivial in the real systems to write the model under a "beautiful" form $\dot{x} = f(x, u, \theta)$.

Using a bond graph tool allows to deal with the enormous amount of equations describing the dynamic behavior of the different phenomena which occur in the system. It allows, (independently of the physical nature of the studied system), precisely by its graphical nature, to display the exchange of power in a system, including storage and transformation and the instrumentation diagram (sensor location in the real process).

ARRs can be deduced directly from bond graph models using a systematic methodology. In [52] is proposed a method to generate ARRs from a bond graph model using covering causal path. The goal is to study all the causal paths relating the considered junction to the sources and the sensors. In this paper the method is extended to closed loop system, using generalized covering causal path [43] with systematic writing of equations.

The ARRs generation algorithm can be summarized by the followings steps:

- (i): Choose a junction,
- (ii): Find the corresponding ARR by writing its characteristic equations;
- (iii): Pass to the following junction;
- (iv): If the second ARR is independent from the first one, then keep it, else pass to another junction;
- (v): Repeat point (iii) until enough distinct signatures can be obtained.

8 Implementation

8.1 Generic plant Item Data Base

The system architecture is a component oriented model, which directly describes the process plant as a network of interconnected plant items (valve, pump, pipe, ...). The Piping and Instrumentation Diagrams (P&ID) is used

for the visual description of the system architecture. A plant item is a quantity of matter or space that is, or is intended to be, a part of the process plant, e.g. pump, valve, pipe, ... A process plant is a functional assembly of plant items.

The user build the P&ID of the supervised process based on implemented generic plant item data base. The generic plant item data base consists of a set of predefined process classes. The structure of the library is divided into three main parts as shown in figure 13.

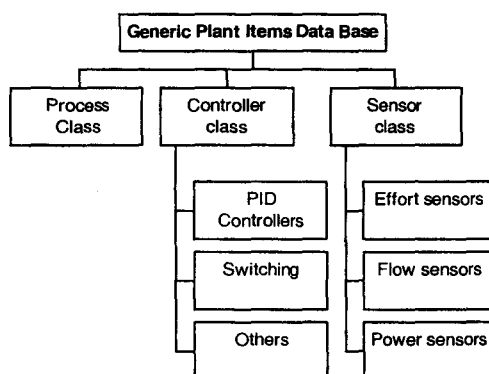


Fig. 13. Structure of the Generic Plant Items Data Base

The thermofluid process class concerns plant items (boiler, valve, pipe, tank,...) building up the industrial process which is to be modelled. This level uses power variables (energy) to describe the plant items. The library will be useful in several application areas, e.g. power generation plants, heating and refrigeration plants, etc..The inputs and outputs are associated with power variables (mass flow, pressure, temperature, etc..).

The controller class is associated with the control process. This level is added by the user according to his control system. The used controllers can be switching (on-off controllers such as a relay) or continuous (PID, Proportional, Integral, and derivative) controllers. Other algorithms can be defined by the user.

Sensor class represents the available instrumentation. Three subclasses of sensors can be distinguished: effort sensors (pressure, temperature, level), flow sensors (hydraulic flow) and power sensors (thermal power provided to the boiler for instance).

The generic plant item data base is displayed under icon model library familiar to the industrial user. Based on the P&ID of the process plant, the architectural model can be built using the items for required components and connecting them.

8.2 Symbols Software Presentation

The software interface is shown in figure 14

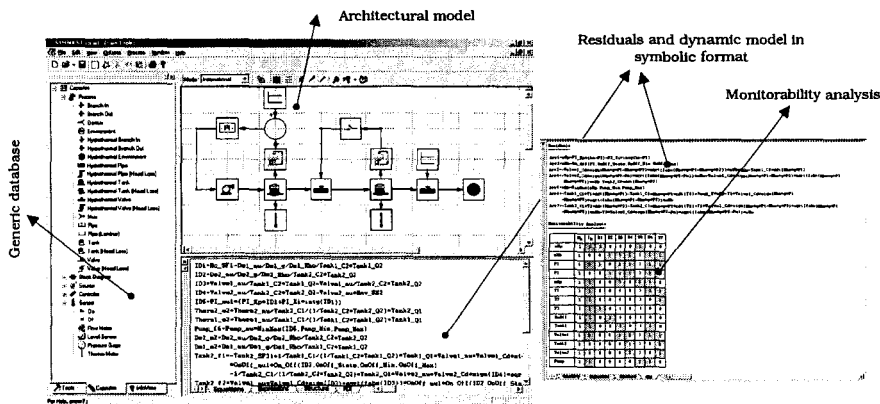


Fig. 14. Software interface for model builder and ARRs generation

The generic database consists of fixed causality and generic causality capsules. While storage tank is modelled as a fixed causality capsule, which has a flow input and effort output, the valve is modelled as a variable causality generic capsule. Valve sub-model capsule can have either effort or flow as the input and the flow through the valve is the output. Capsules are well modelled sub-systems with their partly derived equations. Their equations are linked together in the main model and then reduced to result in compact behavioral equations. The internal model of the tank capsule is shown in figure 15a. The elements connected to bonds 1, 3, 4, 5 and 6 are external flow input ports. Elements connected to bonds 7-11 are external effort output ports. Bond number 12 is connected to an effort output port which may be connected to measurement devices. All these external ports have an attribute that specifies them as optional ports. Optional ports may or may not be connected in the main model. For example, only three ports of this capsule are connected to other capsules in the illustrated model. The C-element for storage of liquid appears in bond 2. The parameter for the element is C2. One or more representative icons and some help text can be embedded as resources to the capsule object.

8.2.1 Connectivity rules

The connectivity of capsules is checked for validity in the main model. Any errors found there are reported. All post-processing is suspended till the model is syntactically valid. As an example, if two tanks (A -processes) are connected directly without a transportation process such as valve or pipe between them, then the network process is not valid as discussed previously. This invalidity is displayed by the software as shown in figure 15b. In thermofluid systems, the connections are vector bonds. The input and output side vector dimensions

of each bond is checked for consistency of dimensions. A syntactically valid model can be linked to create a global model. While creating global models, consistent input and output ports of capsules are assimilated and a memory model of the junction structure is created.

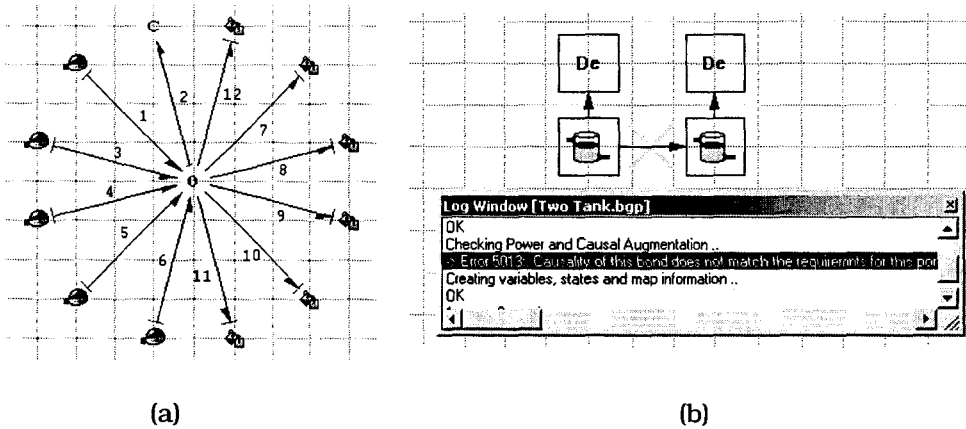


Fig. 15. Internal model of the tank capsule (a), and connectivity rules (b)

8.2.2 ARRs and behavioral model generation

It has been implemented using SYMBOLS 2000 interface and symbolic manipulation routines. The model is drawn using sub-models only from the set of generic object database based on thermofluid defined classes previously. The sub-model capsules have been created using the features of the SYMBOLS 2000 software. They contain the bond graph and equation model for the component and interface constraints. These sub-components when connected to create **architectural model** for a system create syntactically valid models. The software using the power directions, causal properties and vector dimensions for each connection checks the model validity automatically.

The integrated model is generated by symbols 2000 software using these connections. Each sub-model capsule is assigned to an identifying name. Then the variables within that component are referred using this identifier as a prefix. The behavioral model generation is automatically done by SYMBOLS 2000 software.

However, for generation of residuals we need a global model on which causal properties are analyzed and altered to create a proper computable FDI system. This has been implemented using a routine to create the **Global System Model**. The behavioral model for the system is created using preferred integral causality. The part equations of the capsules are linked together to arrive at the compact set of state equations. If the residuals for the global model has already been derived, they are also integrated to these equations. There is an option to derive the equations for faulty systems. Each capsule may be

associated with another hidden capsule that has fault models embedded to it. As an example, in the capsule for storage tank, a leakage flow is added as a negative flow source and stored as the corresponding faulty mode capsule. The non-faulty mode capsule is used to derive the residuals whereas the hidden capsule with embedded faults may be used for the behavioral model. If no corresponding faulty-mode capsule is found, the non-faulty capsule is used instead. Linking residuals with the behavioral model requires automatic creation of certain relations to obtain results of integrated and differentiated terms appearing in the residuals. For example, the integration of any term X in the residuals is added as an pseudo state ($Y[n+1]$, where n is the number of real states and Y is the state vector) whose derivative is X . This pseudo state is automatically replaced in the residuals in place of X to create a compatible simulation model. Similar state-space realizations are used for the derivatives.

By default, SYMBOLS 2000 assigns integral causalities. To assign differential causalities, all measurements are converted initially to reverse sources and all I and C elements are dualized. After integral causality assignment on partially dualized graph, the dualized elements are again dualized to return to normal graph. The third pre-processing step involves mapping all sources and measurements to some workshop terms. A Define Measurements interface has thus been built into the program.

The global model in preferred differential causalities and inverted measurements is now ready for **residual derivation algorithm and monitorability analysis** using Powerful symbolic manipulation routines of SYMBOLS

The behavioral model can be used to create a simulation model for the SYMBOLS 2000 simulator module. Bond graphic parameter names can be suitably replaced by more workshop like terms or other non-linear expressions. For example faults may be associated with some time interval or occurrence of some event. Additionally, the SYMBOLS 2000 simulator module provides slider variables whereby faults may be simulated interactively by the user at the run-time (figure 16b).. Such interactive variation of parameters leads to availability of options to try out several combinations and to make subjective observations from the online plotting of the residuals. The simulator interface of SYMBOLS 2000 with the on-line results for water levels in the tanks (used application given below), and attributes values for each plant item (such as tank area, hydraulic coefficient for valve etc...) is shown figure 16a. These plots have been scaled independently. In the main model shown in the figure 15, there are two tanks, namely 'Tank1' and 'Tank2'. The parameters for these become 'Tank1_C2' and 'Tank2_C2'. Similar name-scopes are used for the valves and the controllers. The default names for measured variables and sources can be changed by the user. Using such variable names, the residuals are derived from the global model and displayed in the bottom pane of the IDE.

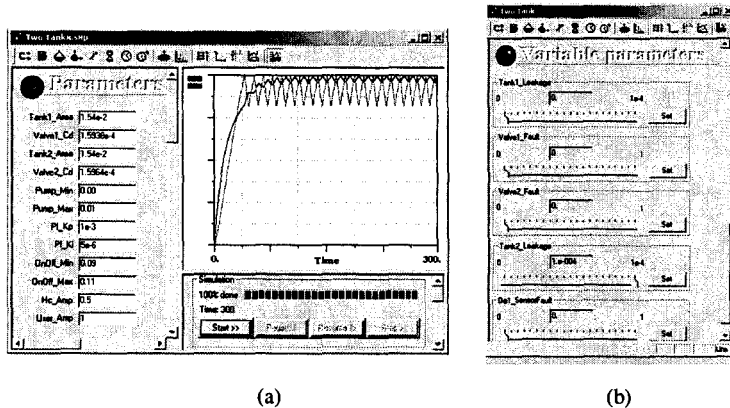


Fig. 16. Slider fault mode

9 Application

9.1 Description of the process

The process to be supervised¹ is a two coupled tanks depicted in figure 17. The main aim of the process plant is to provide a continuous water flow Q_o to a consumer. Tank 1 is filled by a pump P_1 up to a nominal water level of $h_1 = 0.5m$. The water level in the tank1 is controlled by a PI level controller acting to the inlet flow Q_p provided by the pump. The water flow Q_{12} between the tanks can be controlled by a valve1 using an "On/Off" controller in order to keep the water level h_2 at the medium level ($0.09m \leq h_2 \leq 0.11m$) in tank T_2 . The quantity of water outflow Q_o to a consumer is controlled by the valve2 position provided by the user. In our case, valve2 is opened in nominal regime. The valves V_{f1} and V_{f2} can be used to simulate a leakage respectively in the tanks. In the faultless mode V_{f1} and V_{f2} are closed.

9.2 Functional modelling

9.2.1 Functional diagram

The functional model as described in [16] can be built as shown in figure 18.

9.2.1.1 Syntactic validation of the network connection It is possible to compute the general form of the syntactically valid chains of a functional network, using the tools of grammar theory given previously. A network will be said to be syntactically valid if each chain of this network is valid. The

¹ This process is a benchmark used by the CHEM group

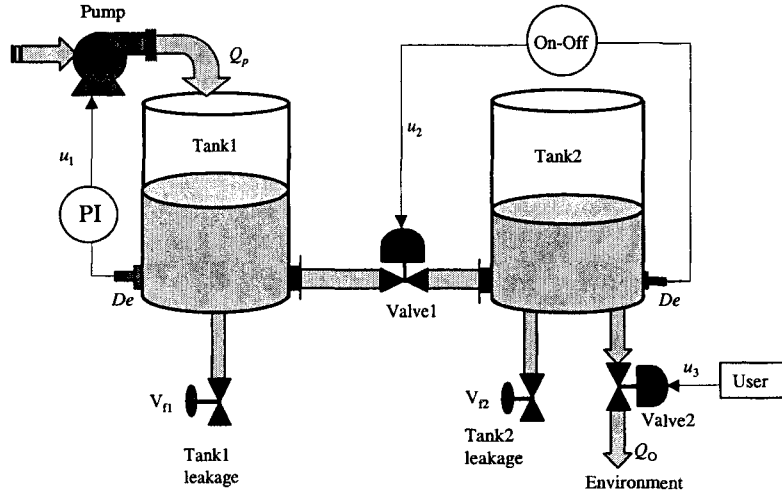


Fig. 17. P&ID diagram of the two-tank system

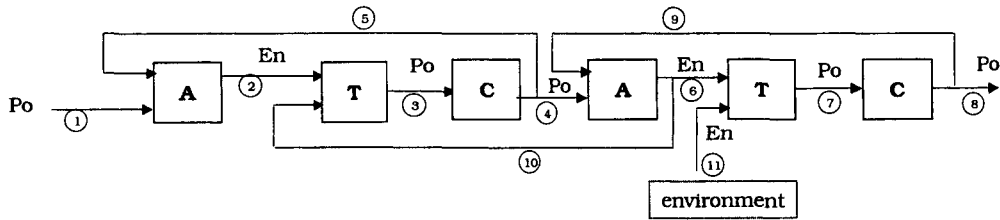


Fig. 18. Functional diagram of two-tank system

covering energy paths from the input "1" to the output "8" without the loops (5 and 9) gives the following chain:

$$w_{1,8} = A.T.C.A.T.C \Leftrightarrow w_{1,8} = C \quad (26)$$

This chain belongs to the general valid one $L(G)$. Thus this sequence is syntactically valid. Let us consider for example the chain 4, 6, 7, 8, 9 (covering the loop 8, 9). The loops of length k , ($k = 1, \dots, n$) are:

$$\begin{aligned} w_{4,8}^1 &= A.T.C = C \\ w_{4,8}^2 &= (A.T.C)(A.T.C) = C^2 = C \end{aligned} \quad (27)$$

$$w_{4,8}^n = (A.T.C) \dots (A.T.C)^n = C^n = C$$

This process sequence is element of $L(G)$, thus syntactically valid. However, if the feed back is connected from the C-process as shown figure 19, we obtain the following chain:

$$w_{4,8}^1 = A.T.C = C \quad (28)$$

$$w_{4,8}^2 = (A.T.A).C. = ??$$

The sequence $w_{4,8}^2$ is not valid since it is not an element of $L(G)$ because of the chain $(T.A)$. The power flow must be looped from resistive process (or transformation process T) in order to consider only a real transportation process.

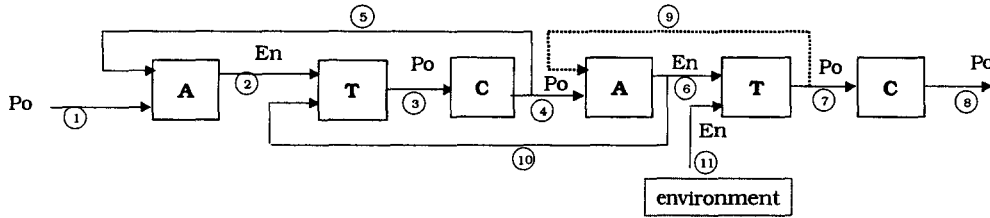


Fig. 19. An example of syntactically non valid process sequence

9.2.1.2 Functional decomposition of the process Since the network process of figure 18 is valid, it can be decomposed into two subsystems as shown in figure 20.

$$w_{1,8} = (A.T.C). (A.T.C) = C.C \quad (29)$$

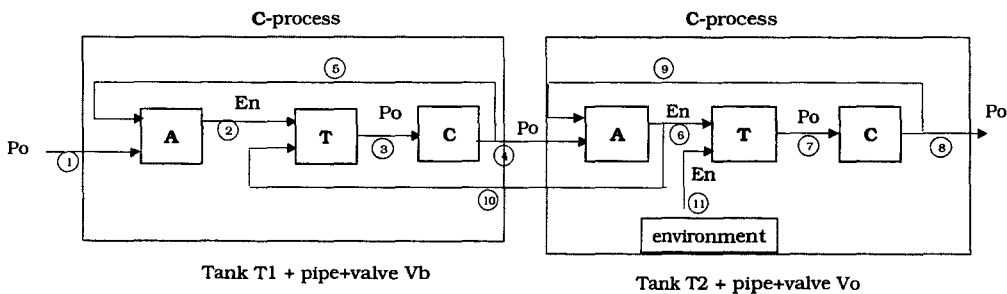


Fig. 20. Functional decomposition of the system into two subsystems

The drawback of this representation (on top of functional aspect) as developed in [17][16] is that the energy causality is introduced and displayed explicitly to the user. While, the use of bond graph tool (as it will be shown in the next section) allows the displaying display the architectural model in modular fashion using industrial plant item because of classification given in figure 6 and causal properties of the bond graph methodology.

9.2.2 Architecture model builder

Based on the P&ID diagram given above, and the implemented data base in the software, the architecture model is built (fig.21a). The list of plant items is storage tank, (as subclass of storage process), pipe with variable orifice (controlled valve), and environment. The information system (control and measurement system will be added later). If the network process is not valid, this invalidity is displayed by the software when checking integrity in the software (fig 21b). The final architectural model is given in figure 23.

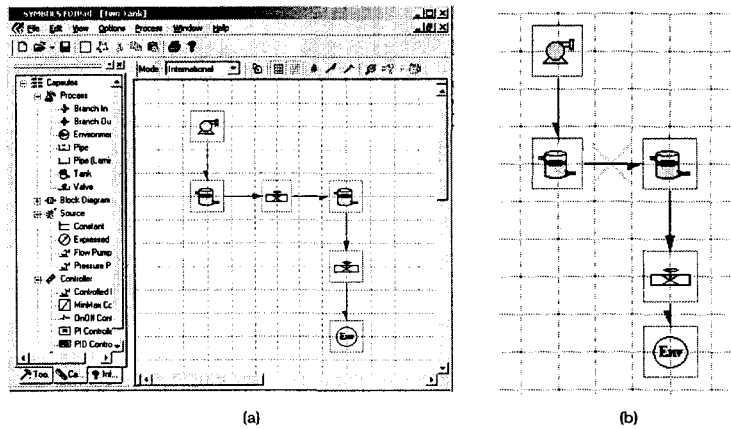


Fig. 21. How to built the architecture model ?

9.3 Behavioral model builder

The bond graph model in normal regime (without faults) is given figure 22. As discussed previously, the quantitative model can be derived from the bond graph model. In implemented software the bond graph model is hidden (but can be displayed if needed), only the corresponding generic component is displayed to the user.

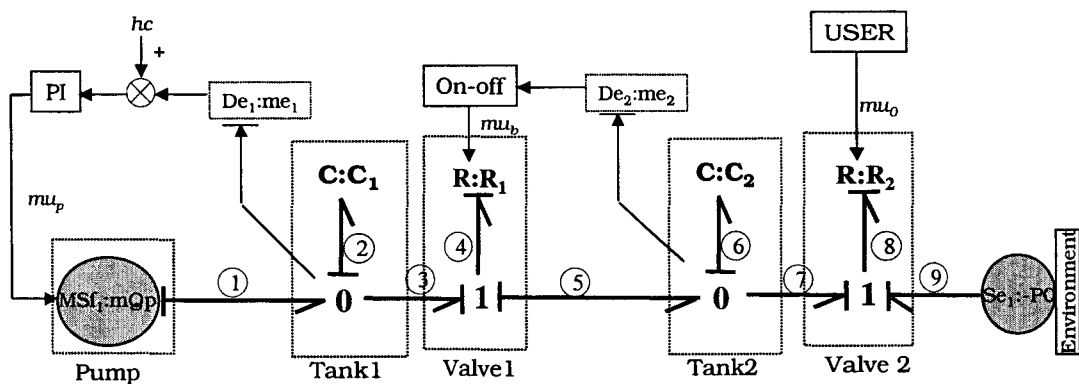


Fig. 22. Bond graph model of the two-tank system

According to the used instrumentation and control system, the industrial user build easily (because of used professional icon type interface). The global process plant (including information system connecting each component.(fig. 23). Equations for the derivative of state variable, measurement variables, controller outputs and output of the controlled sources are given in terms of state variables, system parameters and intermediate variables. the global model in symbolic format is displayed in the bottom pane of the IDE (fig. 23).

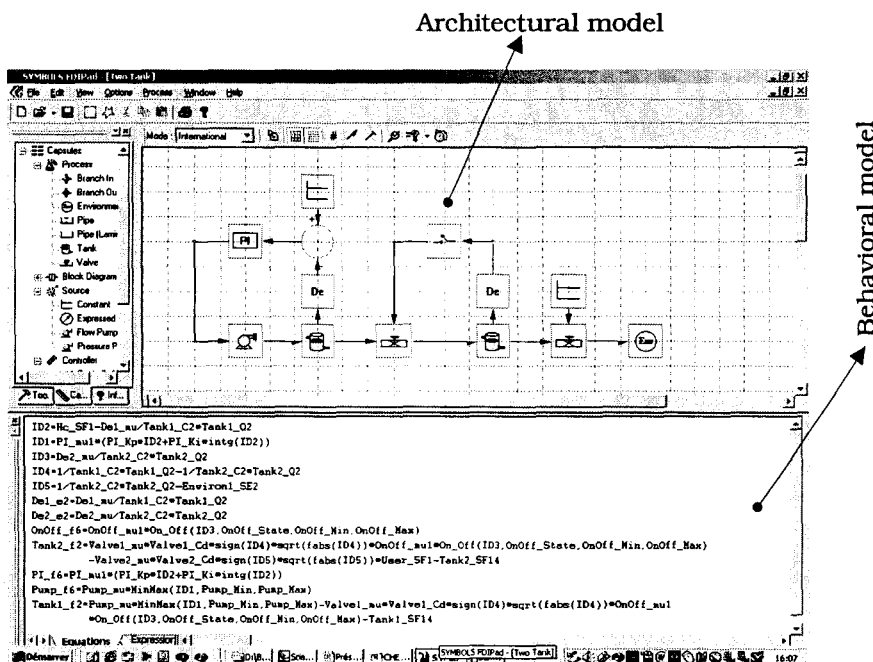


Fig. 23. Behavioral and architectural model generation interface

9.4 ARR's generator builder

9.4.1 Used variables

Based on methodology developed above, the vector containing all the variables for FDI and associated with the bond graph model given by the figure 22 is: $Z = X \cup K$. Since we have four bond graph elements (R_1 , R_2 , C_1 , and C_2) $n_e = 4$, the unknown variables vector X from the bond graph model is of dimension 8:

$$X \in \mathbb{R}^8 : X = \left[f_2 \ e_2 \ f_4 \ e_4 \ f_6 \ e_6 \ f_8 \ e_8 \right] \quad (30)$$

The subset K of known variables is of dimension 7, $K \in \mathbb{R}^7$. Indeed, there are

two sources, two sensors, and three controllers.

$$K = \begin{bmatrix} MQp & P0 & me_1 & me_2 & mu_p & mu_b & mu_0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

The main parameters θ are the value of hydraulic coefficient (R_1 and R_2 elements), and hydraulic capacities (C_1 and C_2).

$$\theta = \begin{bmatrix} C_{d1} & C_{d2} & C_1 & C_2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

9.4.2 Constraint relations

The process plant bond graph model consists of four junctions ($n_j = 4$), four bond graph elements ($n_e = 4$), two sensors ($n_s = 2$), and two controllers (PI, and on-off) ($n_c = 2$) ($mu_0 = cste = 1$), and one controlled source ($n_a = 1$). Thus, 13 constraint relations are available and only 8 variables are unknown, implying that the system is over determined..

- *Structural equations* Φ_J . From junction equations, we have

$$\begin{aligned} \Phi_1 : MQp - f_4 - f_2 &= 0, & \Phi_2 : e_6 - e_2 + e_4 &= 0 \\ \Phi_3 : f_6 + f_8 - f_4 &= 0, & \Phi_4 : e_8 - e_6 + P_0 &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

- *Behavioral equations* Φ_b . The constitutive equations for C_1 , R_1 , C_2 and R_2 elements give respectively:

$$\begin{aligned} \Phi_5 : \begin{cases} s.e_2 = \frac{1}{C_1} f_2 \text{ if } e_2 < \frac{1}{C_1} Z_{1 \max} \\ s.e_2 = 0 \text{ if } e_2 = \frac{1}{C_1} Z_{1 \max} \\ e_2 \in \left[0, \frac{1}{C_1} Z_{1 \max}\right] \end{cases} &, \quad \Phi_6 : f_4 = C_{d1} \cdot \text{sign}(e_4) \sqrt{|e_4|} \cdot mu_b \\ \Phi_7 : \begin{cases} s.e_6 = \frac{1}{C_2} f_6 \cdot \text{ if } e_6 < \frac{1}{C_2} Z_{2 \max} \\ s.e_6 = 0 \text{ if } e_6 = \frac{1}{C_2} Z_{2 \max} \\ e_6 \in \left[0, \frac{1}{C_2} Z_{\max}\right] \end{cases} &, \quad \Phi_8 : f_8 = C_{d2} \cdot \text{sign}(e_8) \sqrt{|e_8|} mu_0 \end{aligned} \quad (34)$$

- *Measurement equations* Φ_m :

$$\begin{aligned} \Phi_9: me_1 &= \begin{cases} C_1.e_2 & \text{if } C_1.e_2 < Z_{1\max} \\ Z_{1\max} & \text{if } C_1.e_2 = Z_{1\max} \end{cases} \\ \Phi_{10}: me_2 &= \begin{cases} C_2.e_6 & \text{if } C_2.e_6 < Z_{2\max} \\ Z_{2\max} & \text{if } C_2.e_6 = Z_{2\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (35)$$

- *Control algorithm models* Φ_c . The water level in Tank1 is controlled by a PI level controller. The water level in Tank T₂ has a switching controller with hysteresis On_Off generic function:

$$\begin{aligned} \Phi_{11}: mu_p &= PI_K_p(h_c - De_1) + PI_K_i \int (h_c - me_1)dt \\ \Phi_{12}: mu_b &= on_off(me_2, OnOff_State, OnOff_Min, OnOff_Max) \end{aligned} \quad (36)$$

where h_c , PI_K_p , and PI_K_i are respectively the set-point, the gain and the integral time of PI controller. me_2 , $OnOff_State$, $OnOff_Min$, $OnOff_Max$ are respectively the sensor level indication, the hysteretic state, minimum threshold values, and maximum threshold.

- *Controlled source equation* Φ_a . For simplicity we assume that the flow provided by the pump MQp is proportional to the controller output mu_p . Taking into account that the flow from the pump is limited to $Pump_Max$, and $Pump_Min$, MQp can be written as:

$$\begin{aligned} \Phi_{13}: MQp &= \begin{cases} mu_p & \text{if: } 0 < mu_p < Pump_Max \\ 0 & \text{if: } mu_p \leq Pump_Min \\ mu_p & \text{if: } mu_p \geq Pump_Max \end{cases} \\ &= MinMax(mu_p, Pump_Min, Pump_Max) \end{aligned} \quad (37)$$

9.4.3 Residual generation methodology

The ARR_s are obtained using the algorithm given above. For illustration, let us consider just one ARR generation.

- (1) **Junction 0₁**. Considering the first structural equation (equ. 33), two variables are unknowns (f_4 and f_2). The goal is to decrement the number of unknown variables and to increment the number of known variables. The ARR is then generated when all unknown variables are determined. The

unknown variables in symbolic format are directly deduced from the bond graph based on covering causal path rules.

- f_2 is calculated by the generic constitutive equation of storage tank modeled by C element (relation Φ_1). The effort e_2 is measured and determined using measurement equation, Φ_9 ($e_2 = me_2$). We finally obtain:

$$f_2 = C_1.s.me_2 \quad (38)$$

- f_4 is given by the constitutive Φ_6 equation of R1 (equ. 34). In Φ_6 ("1" junction equation) e_4 is unknown. This variable is expressed in term of known variables using the covering causal paths (4-3-De₁:me₁), and (4-5-De₂:me₂) which leads to $e_4 = me_1 - me_2$. The second variable is known, thus f_4 is:

$$f_4 = Cd_1.sgn(me_1 - me_2).\sqrt{|me_1 - me_2|.mu_b} \quad (39)$$

Substituting expressions of f_2 , and f_4 in "0 junction" relation Φ_1 , we obtain the first ARR:

$$\begin{aligned} ARR_1 &= mQ_p - C_1.s.me_2 + Cd_1.sgn(me_1 - me_2).\sqrt{|me_1 - me_2|.mu_b} \\ &= ARR_1(De_1, De_2, MSf_1, mu_b,) \end{aligned} \quad (40)$$

Let us pass to another junction.

- (2) **Junction 1₁**. This structural equation is given by Φ_2 relation (equ. 33). In this equation, e_2 , e_4 , and e_6 are unknowns. Covering different causal paths lead to: $e_2 = me_1$, $e_6 = me_2$. $e_4 = \Phi_{R1}^{-1}(f_4, mu_b)$. It is easy to express f_4 in term of known variables using causal path (4-3-2-De₁:me₁). This leads to: $f_4 = mQ_p - C_1.s.me_2$.

Thus, the second residual (substituting e_2 , e_6 , and e_4 in Φ_2) can be written as:

$$ARR_2 = \Phi_{R1}^{-1}(me_2, me_1, mQ_p, mu_b) = ARR_2(De_1, De_2, MSf_1, mu_b) \quad (41)$$

ARR_2 is dependent on the first one : they have the same signature, thus, we pass to another junction. This result can be deduced without any calculation, while for the second ARR are used the same causal paths (for calculation of unknown variables) as for the first one.

r_i	De_1	De_2	$Pump$	$Leak_{T_1}$	$Leak_{T_2}$	$V1$	$V2$	PI	On_off
r_1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r_2	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r_3	1	1	0	1	0	1	0	0	0
r_4	1	1	0	0	1	1	1	0	0
r_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Table 1

Failure signatures

9.4.4 Automatic ARRs generation

The ARRs derived from the global model (fig.23) are displayed in the bottom pane of the IDE (fig. 24).

```

Arr1=mQp-MinMax(mUp,Pump_Min,Pump_Max)
Arr2=mUp-PI_Kp*(hc-me1)-PI_Ki*intg(hc-me1)
Arr3=mQp-Tank1_C2*ddt(me1)-Valve1_Cd*sign(me1-me2)*sqrt(fabs(me1-me2))*mUb
Arr4=Valve1_Cd*sign(me1-me2)*sqrt(fabs(me1-me2))*mUb-Tank2_C2*ddt(me2)-Valve2_Cd*sign(me2-P0)*sqrt(fabs(me2-P0))*mUc
Arr5=mUb-On_Off(me2,OnOff_State,OnOff_Min,OnOff_Max)

```

Fig. 24. ARRs generation in symbolic format interface

9.4.4.1 Monitoring ability analysis The set of ARRs generates a binary table. The columns of this table are called failure signatures (tab. 1). A "1" entry in the i th row and the j th column of the table indicates that the residual r_i is sensitive to the j th fault. For example, note that the signature V_s of De_2 and valve1 (V1) are the same, $V_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$. This means that fault which may affect those elements can be detected but not isolated.

9.5 Simulation results

To analyze the sensitivity of the residuals to different faults, a number of simulations have been performed. The decision procedure consists in comparing the current value of the residual with some fixed threshold. If this value exceeds the threshold, we can consider that a fault has occurred. Different kinds of faults can be simulated by the user (sensor faults and plant faults) as described previously (16b).

In the faultless mode the set-point of the level controller of tank T_1 is changed from initial value ($h_1(0) = 0$) to $h_1 = 0.5m$. The behavior of the system is given in figure 25a. We show the reaction of the residuals in the faultless mode (fig.25b), and in faulty mode (fig. 26).

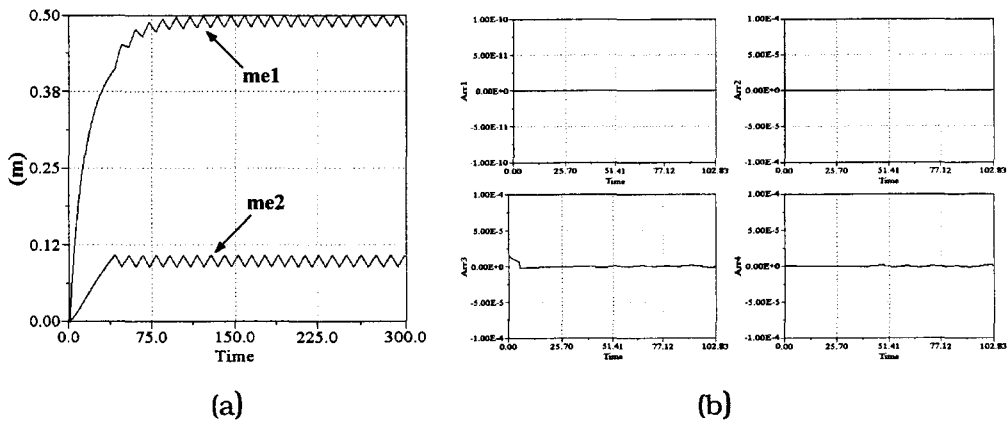


Fig. 25. Behaviour (a) and residuals in fault less mode (b)

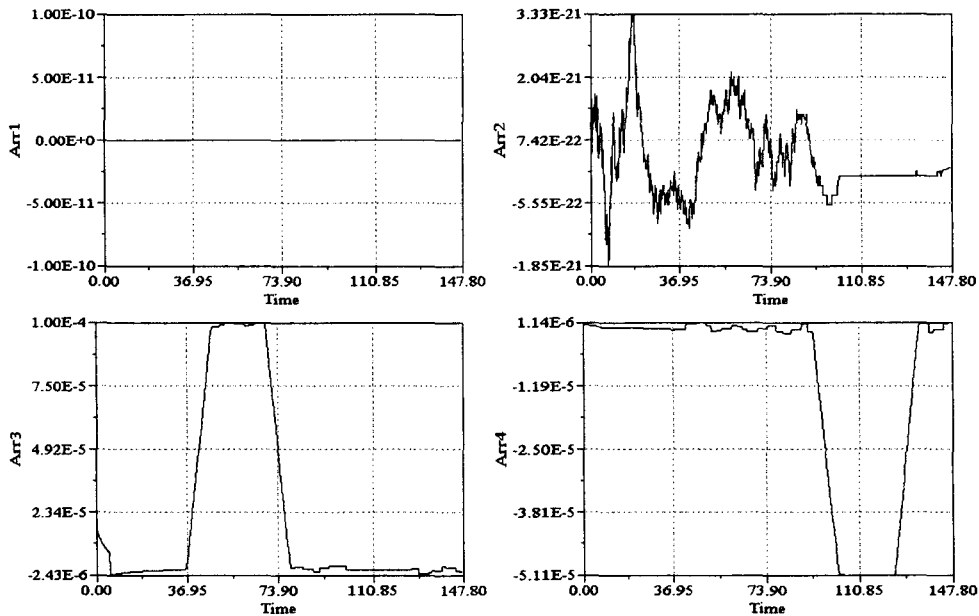


Fig. 26. Residuals for Valve1 (Vb) blockage (during 100s-200s)

The residuals obtained are noisy due to derivatives of measurements. Moving average of their values over a 10 second interval has been taken before plotting. Such averages would be necessary to avoid false alarm triggering, since spontaneous values of derivatives of noisy measurements may reach very high values beyond specified thresholds. The simulated faults are water leak fault in tank T_1 from 36s up to 69s, and valve 2 fault: from 93s up to 116s. In this scenario, the valve is blocked out. The faults are realized as abrupt faults, which can be simulated by step-like additive signals.

10 Conclusion

A methodology based on bond graph analysis and functional modelling to develop and implement a model builder in view of the design of (FDI) algorithms, in the field of thermofluid processes has been presented. The innovative interest of the presented approach consists in the use of only one representation (bond graph modelling) for ARRs and dynamics models generation in symbolic format. Furthermore the methodology is proposed in such way that, in the implemented software, based on the Process and Instrumentation Diagram (P&I D) of the process plant, the industrial designer can easily (because of integration of the functional tool as interface with the human operator) build the thermofluid dynamic and functional models of most technological processes and generate fault indicators. The developed approach is applied to a two tank system. The proposed method can be directly applied by industrial designers to any thermofluid process to ensure rapid technology transfer.

Further work should include chemical processes which will add an other class of processes taking into account a matter transformation occurring during chemical reactions.

References

- [1] E. Alcorta and P. Frank. Deterministic non linear observer-based approach to fault diagnosis. a survey. *Control Eng. Practice (CEP)*, 5(5):663–670, 1997.
- [2] M. Basseville, G. Benveniste, and G. Moustakides. Detection and diagnosis of changes in the eigen structure of non stationary multivariable systems. *Automatica*, 23:479–489, 1987.
- [3] P. C. Breedveld. *Physical Systems Theory in Terms of Bond Graphs*. PhD thesis, University of Twente, The Netherlands, 1984.
- [4] L. T. Briegler. Chemical process simulation. *Chemical Engineering*, pages 50–61, October 1989.
- [5] F. Busson and 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.
- [6] F. E. Cellier. *Continuous System Modelling*. Springer Verlag, New York, 1991.
- [7] E. Cherifi. *Analyse Fonctionnelle et Structurelle Des Systèmes Homme-Machine Pour la Supervision*. PhD thesis, University of Valenciennes, France, 1998.
- [8] L. Chittaro, C. Guido, E. Tasso, and 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.
- [9] E. Chow and A. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection system. *IEEE, Trans. A. C.*, 29(7), 1984.
- [10] D. Cox, J. Little, and D. O'Shea. *Ideals, Varieties, and Algorithms, Undergraduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, 1992.
- [11] G. Dauphin-Tanguy. Les bond graphs. Paris, France, 2000.
- [12] P. 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.
- [13] S. Diop. Elimination in control theory. *Mathematical Control Signals Systems*, 4:17–32, 1991.
- [14] H. Elmqvist, F. E. Cellier, and M. Otter. Object oriented modelling of hybrid systems. In *ESS'93 European Simulation Symposium*, The Netherlands, 1993.
- [15] J. Feenstra, P. J. Mosterman, B. G., and P. C. Breedveld. Bond graph modeling procedures for fault detection and isolation of complex flow processes. In *Proceedings of the Internatiol Conference on Bond Graph Modeling and Simulation*, pages 77–82, Phoenix Arizona, January 2001.
- [16] C. Feliot. *Modélisation de Systèmes Complexes : Intégration et Formalisation de Modèles*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille1, Villeneuve D'Ascq (France), 1997.
- [17] C. Feliot, M. Staroswiecki, and J. Cassar. Towards a formal language of physical systems. In *IEEE SMC Conference*, Bejin (China), 1996.
- [18] P. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy- a survey and some new results. *Automatica*, 26(3):459–474, 1990.
- [19] P. M. Frank. Advanced fault detection and isolation schemes using non-linear and robust observers. In *10th World Congress on Automatic Control*, Paris, 1987.
- [20] J. Gertler and D. Singer. A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation. *Automatica*, 26(2):381–388, 1990.
- [21] C. Guernez, M. Petitot, J. Cassar, and 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.
- [22] R. Iserman. Process fault detection based on modeling and estimation methods. *A Survey Automatica*, 20(4):387–404, 1984.
- [23] R. Iserman. Detection based on modelling and estimation methods, a survey. *Automatica*, 20:387–404, 1994.

- [24] P. Kaboré, M. Staroswiecki, and 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.
- [25] D. Karnopp. State variables and pseudo-bond graphs for compressible thermo-fluid systems. *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 101(3):201–204, September 1979.
- [26] D. Karnopp. Bond graph models for electrochemical energy storage: Electrical, chemical and thermal effects. *The Franklin Institute*, 327:983–992, 1990.
- [27] D. Karnopp and S. Azerbaijani. Pseudo bond graphs for generalised compartmental models in engineering and physiology. *Journal of The Franklin Institute*, 312(2):95–108, 1981.
- [28] D. Karnopp, D. Margolis, and R. Rosenberg. *Systems Dynamics: A Unified approach*. John Wiley, New York, second edition, 1990.
- [29] A. Keuneke. Device representation: The significance of functional knowledge. *IEE Expert*, 6(2):22–25, 1991.
- [30] T. Kohda, H. Katsube, H. Fujihara, and K. Inoue. Identification of system failure causes using bond graph models. *International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Proceedings*, 5:269–274, 1993.
- [31] J. L. Lemoigne. *La Modélisation Des Systèmes Complexes*. Dunod Bordas, Paris (France), afcet systèmes edition, 1989.
- [32] M. Lind. Modeling goals and functions of complex industrial plants. *Applied Artificial Intelligence*, 8:258–283, 1994.
- [33] D. Linkens and H. Wang. Qualitative bond graph reasoning in control engineering. ii. fault diagnosis. *ICBGM'95, Proceedings of the 1995 Western Multiconference*, pages 189–194, 1995.
- [34] P. Millot. *Supervision Des Procédés Automatisés et Ergonomie*. Editions Hermes, Paris, 1988.
- [35] M. Modarres and S. Cheon. Function-centered modeling of engineering systems using the goal tree-success tree technique and functional primitives. *Reliability Engineering System Safety*, 64(2):181–200, May 1999.
- [36] 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.
- [37] P. J. Mosterman and B. G. Diagnosis of continuous valued systems in transient operating regions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 29(6):554–565, 1999.
- [38] A. Moyse, L. Jourda, J. M. Le-Lann, and X. Joulia. Process, hydraulic and control devices in odysseo, an object-oriented framework for process dynamic simulation. Montpellier, 5-7 October 1999.

- [39] A. Mukherjee and R. Karmakar. *Modelling and Simulation of Engineering Systems Through Bond Graphs*. Alpha Sciences International, Pangbourne, UK, 2000.
- [40] A. Mukherjee and 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.
- [41] N. Murakami. Computer-aided design-diagnosis using feature description. artificial intelligence in engineering: Diagnosis learning. *Elsevier, Gero edition*, pages 199–226, 1988.
- [42] B. Ould-Bouamama. Model builder for thermo-fluid systems using a bond graph and functional modelling. In *13th European Simulation Symposium, ESS01*, pages 822–826, Marseille, France, October, 18-20 2001. SCS.
- [43] B. Ould Bouamama, F. Busson, G. Dauphin-Tanguy, and 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.
- [44] R. J. Patton, P. M. Frank, and R. N. Clark. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ, 1989.
- [45] H. Paynter. *Analysis and design of Engineering Systems*. M.I.T. Press, 1961.
- [46] Y. Peng, A. Youssouf, P. Arte, and M. Kinnaert. A complete procedure for residual generation and evaluation with application to a heat exchanger. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(6), November 1997.
- [47] A. Seidenberg. An elimination theory for differential algebra. *University of California, Publication Mathematics*, 3:31–65, 1956.
- [48] Simulink. *Dynamic System Simulation for Matlab*. Math Works, France, 1997.
- [49] M. Staroswiecki and G. Contet-Verga. Analytical redundancy relations for fault detection and isolation in algebraic dynamic systems. *Automatica*, 37:687–699, 2001.
- [50] M. Staroswiecki, V. Coquempot, and J. Cassar. Generation of analytical redundancy relations in linear interconnected system. In *IMACS Annals on Computing and Applied Mathematics Proceedings MIN-S2 90*, Brussels, 1990.
- [51] C. Sueur and G. Dauphin-Tanguy. Bond graph approach for structural analysis of MIMO linear systems. *Journal of the Franklin Institute*, 328(1):55–70, 1991.
- [52] 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.
- [53] M. Tagina, J. Cassar, G. Dauphin-Tanguy, and M. Staroswiecki. Monitoring of systems modelled by bond graph. In *ICBGM'95. International Conference on Bond Graph Modeling*, pages 275–280, Las Vegas, 1995.

- [54] J. Thoma. *Introduction to Bond Graphs and their Applications*. Pergamon Press, 1975.
- [55] J. U. Thoma and B. Ould Bouamama. *Modelling and Simulation in Thermal and Chemical Engineering. Bond Graph Approach*. Springer Verlag, 2000.
- [56] G. C. Verga. Analytic redundancy relations for state affine systems. Bruxelles, 1997. ECC'97.
- [57] M. Verge and 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.
- [58] L. T. Westerberg and B. R. Benjamin. Thoughts on a future equation-oriented flowsheeting system. *Computers and chemical Engineering*, 9(5):517–526, 1985.
- [59] C. Wollhaf, K. Schultz, and S. Engell. BaSiP-batch process simulation with dynamically reconfigured process dynamics. *Computer and Chemical Engineering supplement*, pages 1281–1286, 1996.
- [60] J. Wünnenberg. *Fault Detection in Dynamic Systems*. PhD thesis, University of Duisburg, 1990.

