

CEA-R-5903



COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE

A0001496



FR0005124

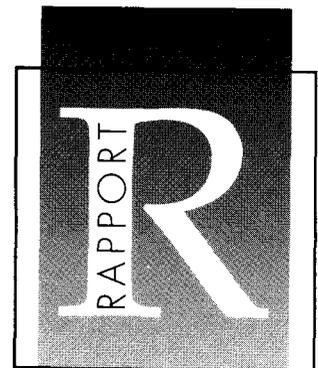
DIRECTION DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

**UTILISATION DE L'APPROCHE MULTI-MODÈLES
POUR L'AIDE AU DIAGNOSTIC
D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES**

par
Renaud THETIOT

DIRECTION DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE
ET DE TECHNOLOGIE
SERVICE D'ÉTUDES DES RÉACTEURS
ET DES MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES

CEA / Saclay



DIRECTION DE L'INFORMATION
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

**RAPPORT
CEA-R-5903**

RAPPORT CEA-R-5903 – Renaud THETIOT**UTILISATION DE L'APPROCHE MULTI-MODELES POUR L'AIDE AU DIAGNOSTIC D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES.**

Résumé : Dans cette thèse nous proposons une méthode de diagnostic. Cette méthode exploite une approche multi-modèles dans laquelle les comportements normaux et anormaux d'un système sont décrits. Cette approche permet de représenter un système à différents niveaux d'abstraction (comportemental, fonctionnel et téléologique). Les connaissances fondamentales sont décrites dans une représentation à base de bond-graphs. Nous montrons que les bond-graphs peuvent être exploités pour générer (complètement ou partiellement) les modèles fonctionnels. Les différents modèles de l'approche multi-modèles permettent de définir l'état fonctionnel d'un système à différents niveaux d'abstraction. Nous exploitons cette propriété pour exonérer les sous-systèmes pour lesquels le comportement attendu est observé. Les modèles comportementaux et fonctionnels des autres sous-systèmes sont ensuite utilisés dans une procédure comportant deux étapes. Dans un premier temps, les comportements anormaux qui expliquent une partie des observations sont identifiés. Dans un second temps, les observations restant inexplicées sont utilisées pour générer des ensembles de conflits et les diagnostics basés sur le respect de la consistance. Ces méthodes ont été appliquées à la modélisation et au diagnostic du Groupe Moto-Pompe Primaire d'un Réacteur à Eau Pressurisée. Cette application illustre les concepts décrits dans cette thèse et montre leurs potentialités.

2000 – Commissariat à l'Energie Atomique – France

RAPPORT CEA-R-5903 – Renaud THETIOT**A DIAGNOSIS METHOD FOR PHYSICAL SYSTEMS USING A MULTIMODELING APPROACH.**

Abstract : In this thesis we propose a method for diagnosis problem solving. This method is based on a multimodeling approach describing both normal and abnormal behavior of a system. This modeling approach allows to represent a system at different abstraction levels (behavioral, functional and teleological). Fundamental knowledge is described according to a bond-graph representation. We show that bond-graph representation can be exploited in order to generate (completely or partially) the functional models. The different models of the multimodeling approach allows to define the functional state of a system at different abstraction levels. We exploit this property to exonerate sub-systems for which the expected behavior is observed. The behavioral and functional descriptions of the remaining sub-systems are exploited hierarchically in a two steps process. In a first step, the abnormal behaviors explaining some observations are identified. In a second step, the remaining unexplained observations are used to generate conflict sets and thus the consistency based diagnoses. The modeling method and the diagnosis process have been applied to a Reactor Coolant Pump Sets. This application illustrates the concepts described in this thesis and shows its potentialities.

2000 – Commissariat à l'Energie Atomique – France

**PLEASE BE AWARE THAT
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT
WERE ORIGINALLY BLANK**

UNIVERSITÉ D'EVRY VAL D'ESSONNE

Numéro d'ordre: 99EVRY016

THÈSE

pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'EVRY VAL
D'ESSONNE**

Discipline : Sciences et Technologies Industrielles

présentée par

Renaud THÉTIOT

le 10 Septembre 1999

titre

**UTILISATION DE L'APPROCHE MULTI-MODELES
POUR L'AIDE AU DIAGNOSTIC D'INSTALLATIONS
INDUSTRIELLES**

devant le jury composé de :

Mr Claude BARRET	Directeur de thèse
Mme Marie Odile CORDIER	Rapporteur
Mr Philippe DAGUE	Rapporteur
Mr Jean-Marc MARTINEZ	Rapporteur
Mr Michel DUMAS	Examineur
Mr Marc PORCHERON	Examineur

CENTRE D'ETUDES MÉCANIQUE D'ILE DE FRANCE

LABORATOIRE MIXTE DE L'UNIVERSITÉ D'EVRY VAL D'ESSONNE ET DU COMMISARIAT À L'ENERGIE

ATOMIQUE

- Rapport CEA-R-5903 -

CEA Saclay
Direction des Réacteurs Nucléaires
Département de Mécanique et de Technologie
Service d'Etudes des Réacteurs et de Mathématiques Appliquées

UTILISATION DE L'APPROCHE MULTI-MODÈLES
POUR L'AIDE AU DIAGNOSTIC D'INSTALLATIONS INDUSTRIELLES

par

Renaud THETIOT

- Mars 2000 -

*Je dédie cette thèse
à Florence, Lucas et Margot
pour le bonheur qu'ils m'apportent...
et pour celui qu'ils m'apporteront.*

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Claude Barret, professeur à l'Université d'Evry Val d'Essonne, pour son soutien et le suivi de mes travaux.

Je remercie tout particulièrement Marie-Odile Cordier, professeur à l'IRISA de l'Université de Rennes I, Philippe Dague, professeur au LIPN de l'Université de Paris XIII Villetaneuse, et Jean-Marc Martinez, chercheur au Commissariat à l'Energie Atomique, qui ont bien voulu me faire l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse. Leurs remarques et leurs critiques ont grandement contribué à l'amélioration de ce mémoire.

Je remercie également Marc Porcheron et Benoit Ricard, de la Direction des Etudes et Recherche d'EDF, de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et de leur précieuse collaboration lors de l'étude du Groupe Moto-Pompe Primaire.

Mes remerciements s'adressent surtout à Michel Dumas, mon responsable de thèse, pour le soutien constant qu'il m'a apporté durant ces travaux par sa disponibilité, sa compétence et ses qualités humaines. Son aide et ses conseils m'ont été très précieux et ont permis à cette thèse d'aboutir.

Je tiens aussi à remercier Fakhher Zouaoui, nos échanges d'idées et ses remarques ont contribué à améliorer ce travail. Ses compétences informatiques m'ont été utiles pour mettre en oeuvre les différentes idées présentées dans ce mémoire.

Je remercie messieurs René-Jean Gibert et Florent Chavand de m'avoir accueilli au sein du Centre d'Etudes de Mécanique d'Ile de France et du groupe Systèmes Complexes, ainsi qu'Imad Toumi et Daniel Caruge, successivement chefs du Laboratoire d'Etudes Thermiques des Réacteurs où j'ai effectué cette thèse.

Je remercie aussi tous les participants du groupe IMALAIA des discussions et des critiques de ce travail.

J'exprime toute ma sympathie à tous ceux qui m'ont « subi » durant ces quelques années, que ce soit au sein du LETR ou de l'université d'Evry : Vincent, Mathilde, Fabrice, Greg, Rachid et bien d'autres qui, je l'espère, me pardonneront de ne pas les citer.

Je remercie enfin Gilles Arnaud, chercheur au CEA, et les différents personnels du LETR et de l'IUP d'Evry pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Résumé

Dans cette thèse nous proposons une méthode de diagnostic. Cette méthode exploite une approche multi-modèles dans laquelle les comportements normaux et anormaux d'un système sont décrits. Cette approche permet de représenter un système à différents niveaux d'abstraction (comportemental, fonctionnel et téléologique). Les connaissances fondamentales sont décrites dans une représentation à base de bond-graphs. Nous montrons que les bond-graphs peuvent être exploités pour générer (complètement ou partiellement) les modèles fonctionnels. Les différents modèles de l'approche multi-modèles permettent de définir l'état fonctionnel d'un système à différents niveaux d'abstraction. Nous exploitons cette propriété pour exonérer les sous-systèmes pour lesquels le comportement attendu est observé. Les modèles comportementaux et fonctionnels des autres sous-systèmes sont ensuite utilisés dans une procédure comportant deux étapes. Dans un premier temps, les comportements anormaux qui expliquent une partie des observations sont identifiés. Dans un second temps, les observations restant inexpliquées sont utilisées pour générer des ensembles de conflits et les diagnostics basés sur le respect de la consistance. Ces méthodes ont été appliquées à la modélisation et au diagnostic du Groupe Moto-Pompe Primaire d'un Réacteur à Eau Pressurisée. Cette application illustre les concepts décrits dans cette thèse et montre leurs potentialités.

Mots-clés: Diagnostic, Physique Qualitative, Multi-modélisation, Groupe Moto-Pompe Primaire

Abstract

In this thesis we propose a method for diagnosis problem solving. This method is based on a multimodeling approach describing both normal and abnormal behavior of a system. This modeling approach allows to represent a system at different abstraction levels (behavioral, functional and teleological). Fundamental knowledge is described according to a bond-graph representation. We show that bond-graph representation can be exploited in order to generate (completely or partially) the functional models. The different models of the multimodeling approach allows to define the functional state of a system at different abstraction levels. We exploit this property to exonerate sub-systems for which the expected behavior is observed. The behavioral and functional descriptions of the remaining sub-systems are exploited hierarchically in a two steps process. In a first step, the abnormal behaviors explaining some observations are identified. In a second step, the remaining unexplained observations are used to generate conflict sets and thus the consistency based diagnoses. The modeling method and the diagnosis process have been applied to a Reactor Coolant Pump Sets. This application illustrates the concepts described in this thesis and shows its potentialities.

Keywords: Diagnosis, Qualitative Physic, Multimodelling, Reactor Coolant Pump Sets

Table des matières

Table des figures	xv
Introduction	1
I Le diagnostic à base de modèles	7
1 Le diagnostic basé sur la consistance	9
1.1 Un diagnostic : un état particulier du système	10
1.2 Calculer et représenter les diagnostics	11
1.2.1 Diagnostics minimaux	12
1.3 Exemple récapitulatif	13
1.4 Les Systèmes de Maintien de la Cohérence	14
1.4.1 Généralités	14
1.4.2 Les ATMS	15
1.4.3 Les CMS	16
1.5 Conclusions	17
2 Diagnostic Abductif	19
2.1 Formalisation générale de l'abduction	19
2.2 Formalisation de l'abduction pour le diagnostic	20
2.3 Différentes définitions du diagnostic abductif	21
2.4 Un exemple de raisonnement abductif	23
2.4.1 Le formalisme	23
2.4.2 Un exemple	25
2.5 DIAPO : une application du diagnostic basé sur l'abduction .	27

2.6	Conclusions	28
3	Diagnostics consistants et mauvais fonctionnements	29
3.1	Représentation : les diagnostics noyaux	30
3.2	Préférences et diagnostics préférés	30
3.2.1	Diagnostics préférés	31
3.3	Gestion des modèles	33
3.4	Conclusions	34
4	Les approches fonctionnelles	35
4.1	L'approche de Sticklen	35
4.2	L'approche de Steels	37
4.3	L'approche de Larsson	38
4.4	Conclusions	39
5	L'approche multi-modèles	41
5.1	L'approche multi-modèles et le diagnostic	43
5.2	Diagnostic grâce aux variables d'effort et de flux	44
5.3	Conclusions	47
6	Conclusions	49

II Représentation du fonctionnement dans l'approche multi-modèles 51

1	Généralités sur l'approche multi-modèles	53
1.1	Notion d'ontologie d'un modèle	53
1.2	Les connaissances fondamentales	55
1.2.1	Modèle structurel	55
1.2.2	Modèle comportemental	55
1.3	Les connaissances interprétatives	56
1.3.1	Les connaissances fonctionnelles	56
1.3.2	Les connaissances téléologiques	59

2	Modèle comportemental et modèle des rôles fonctionnels	61
2.1	Généralités	61
2.2	Les éléments de base	62
2.3	Représentation de la causalité	64
2.4	Construction du modèle des rôles fonctionnels	66
2.5	Exemple	69
3	Construction du modèle des processus	73
3.1	Le problème	73
3.2	Construction des cofonctions	76
3.2.1	Structure des données	77
3.2.2	Sélection des points de départ des cofonctions	77
3.2.3	Suivi de l'effort dans un bond-graph	78
3.2.4	Suivi du flux dans un bond-graph	80
3.2.5	Cas des transformateurs et des gyrateurs	80
3.2.6	Implémentation	80
3.3	Construction des conditions et des effets	81
3.3.1	Conditions de déchargement	81
3.3.2	Conditions de chargement	82
3.3.3	Conditions de transfert	83
3.3.4	Conditions de fonctionnement	88
3.4	Liens entre processus	88
3.4.1	Lien d'exclusivité mutuelle	90
4	Modèle des phénomènes et modèle téléologique	93
4.1	Liens entre phénomènes	94
4.1.1	Lien de support	94
4.2	Modèle téléologique	94
5	Exemple récapitulatif	95
5.1	Construction des processus	95
5.2	Construction des phénomènes	96
6	Conclusion	99

III	Effectuer un diagnostic	101
1	Introduction	103
2	Identification de l'état fonctionnel du système	105
2.1	Sélection des phénomènes	106
2.2	Identification des phénomènes	106
2.2.1	Phénomènes non réalisés	106
2.2.2	Phénomènes réalisés	107
2.2.3	Phénomènes déduits	108
2.2.4	Synthèse des ensembles de phénomènes	109
2.3	Identification des processus	109
2.3.1	Processus inactifs	109
2.3.2	Processus actifs	110
2.3.3	Processus déduits	111
2.3.4	Synthèse des ensembles de processus	113
3	Introduction de fonctionnements anormaux	115
3.1	Au niveau des processus	115
3.1.1	Les familles de processus	115
3.1.2	Processus alternatifs hors famille	117
3.1.3	Exemple	117
3.2	Au niveau des phénomènes	119
3.3	Au niveau des rôles fonctionnels	122
4	Recherche de diagnostic	123
4.1	Gestion des observations	123
4.2	Diagnostic au niveau des phénomènes	124
4.2.1	Identification des phénomènes	125
4.2.2	Explication	130
4.2.3	Exploitation des résultats	132
4.3	Diagnostic au niveau des processus	132
4.3.1	Identification	132
4.3.2	Explication	135

4.4	Construction des conflits	137
4.4.1	Construction des conflits de composants	142
4.5	Implémentation	143
4.5.1	Structure des données	143
4.5.2	Fonctions	144
4.5.3	Procédure	151
4.6	Le diagnostic	155
5	Conclusion	157
IV	Application	161
1	Introduction	163
2	Le modèle comportemental	167
2.1	Modélisation du joint hydrostatique	167
2.1.1	Comportement du joint hydrostatique	167
2.1.2	Modèle du joint hydrostatique	169
2.2	Modélisation de l'injection	171
3	Le modèle des processus	177
3.1	Processus hydrauliques	178
3.2	Processus mécaniques	180
4	Description des modèles téléologique et des phénomènes	183
4.1	Un modèle téléologique du GMPP	183
4.2	Les phénomènes	184
5	Description des dysfonctionnements	187
5.1	Au niveau des processus	187
5.1.1	Blocage de la bague: joint bloqué ouvert	187
5.1.2	Colmatage du joint	188
5.2	Au niveau des phénomènes	188

6 Diagnostic par l'approche multi-modèles	191
6.1 Observations disponibles	191
6.2 Identification du fonctionnement normal	192
6.2.1 Phénomènes à réaliser	192
6.2.2 Identification de l'état des phénomènes	193
6.2.3 Exploitation	193
6.3 Identification des comportements dégradés	193
6.3.1 Cas du colmatage sans modèles alternatifs	194
6.3.2 Cas du colmatage avec modèles alternatifs	196
7 Conclusion	199
Conclusions et perspectives	203
Bibliographie	207

Table des figures

1	Effectuer une opération de maintenance corrective	2
1.1	Inverseurs en série	10
1.2	Circuit Logique	13
1.3	Architecture du résolveur de problèmes	14
2.1	Treillis des problèmes de diagnostic	22
2.2	Structure des données	23
2.3	Graphe causal associé au moteur	26
3.1	Treillis des préférences entre les modes	31
4.1	Organisation de l'approche de [Sticklen et Chandrasekaran(1989)]	36
4.2	La description fonctionnelle de [Steels(1989)]	37
4.3	Les relations entre les buts, les fonctions et les composants.	39
5.1	L'architecture Multi-Modèles	42
1.1	L'architecture Multi-Modèles	54
1.2	Le Tetrahedron Of State	57
2.1	Convention de notation sur les bords	62
2.2	Les éléments de bond-graph	63
2.3	Les jonctions dans un bond-graph	64
2.4	Exemple de causalité sur une résistance	65
2.5	Représentation des éléments du bond-graph, leurs équations et leurs causalités.	67
2.6	Rôles fonctionnels et éléments de bond-graph	68
2.7	Exemple de correspondances entre système physique, bond-graph, graphe d'influences et modèle des rôles fonctionnels.	70
3.1	Exemple	73
3.2	Bond-graph de l'exemple	74
3.3	Isolation des processus	75

3.4	Partie du bond-graph de la boucle primaire d'un REP et modèle des rôles fonctionnels correspondants	75
3.5	Exemple de quintuplets décrivant des bonds	77
3.6	Éléments de stockage en causalité intégrale	82
3.7	Éléments de stockage en causalité dérivée	82
3.8	Transfert entre source et résistance (dissipation d'énergie)	84
3.9	Transfert entre élément de stockage et résistance (dissipation d'énergie)	85
3.10	Transfert entre deux sources	86
3.11	Transfert entre deux sources cas (3.a) et (3.b)	89
3.12	Transfert entre deux sources cas (3.c) et (3.d)	89
3.13	Transfert entre deux sources cas (3.e) et (3.f)	91
5.1	Exemple des réservoirs : modèle téléologique et phénomènes associé	98
2.1	Synthèse des ensembles de phénomènes	109
2.2	Synthèse des ensembles de processus	113
3.1	Exemple : Bond-graph et modèle des rôles fonctionnels	118
3.2	Exemple	120
3.3	Exemple : Bond-graph et modèle des rôles fonctionnels	120
4.1	Organisation de la tâche de diagnostic au niveau des phénomènes : étapes 1 et 2	126
4.2	Organisation de la tâche de diagnostic au niveau des processus : étapes 1, 2a et 2b	133
4.3	Construction des conflits de phénomènes	137
4.4	Construction des conflits de processus et de rôles fonctionnels	138
4.5	Utilisation des conflits pour la focalisation d'une approche abductive	156
4.6	Utilisation des conflits pour la focalisation d'une approche par consistance	156
1.1	Schéma du GMPP	164
2.1	Schéma du joint 1	168
2.2	Profil de la glace flottante	168
2.3	Schéma mécanique du joint 1	170
2.4	Bond graph mécanique du joint 1	171
2.5	Bond graph hydraulique du joint 1	172
2.6	Bond-graph du GMPP (joint 1)	172
2.7	Bond graph de l'ensemble injection/joints du GMPP	173
2.8	Modèle des rôles fonctionnels de l'ensemble injection/joints du GMPP	175
2.9	Graphe d'influence de l'ensemble injection/joints du GMPP	176

4.1	Modèle téléologique du GMPP	183
4.2	Modèle téléologique et modèle des phénomènes du GMPP	186
5.1	Modèle téléologique et modèle des phénomènes du GMPP avec introduction du fonctionnement dégradé	190

Introduction

Généralités

L'aide au diagnostic, et plus généralement l'aide à l'opérateur, est une composante de plus en plus nécessaire dans la supervision des systèmes industriels. L'accroissement de la complexité des installations, ainsi que la mise en oeuvre de moyens d'automatisation et d'informatisation de plus en plus nombreux, rendent nécessaire la mise en oeuvre d'outils permettant d'appréhender globalement le fonctionnement et les propriétés des systèmes. Ces outils d'aide à la prise de décision ont pour but d'éviter les erreurs d'interprétation de l'état du système et permettent ainsi de déterminer plus facilement les procédures de pilotage à mettre en oeuvre.

Ces outils d'aide à l'interprétation du fonctionnement d'un système peuvent être classés en trois grandes familles :

- Ceux permettant de justifier le fonctionnement du système, ils vont permettre à un opérateur de mieux comprendre le fonctionnement du système. Ils lui fourniront des explications du fonctionnement attendu.
- Ceux permettant de déterminer les origines des dysfonctionnements, ils vont permettre à un opérateur de déterminer les causes expliquant des variations imprévues du comportement d'un système
- Ceux permettant d'évaluer les états futurs d'un système, ils vont aider l'opérateur à évaluer les conséquences du choix d'une action de commande.

Ces trois types d'outils constituent le coeur même des applications du raisonnement à base de modèles (Model Based Reasoning) reposant sur des modélisations qualitatives du comportement des systèmes. En France, une synthèse des applications de ce domaine est présentée dans [Allouche et al.(1997)].

Nous nous intéressons plus particulièrement au deuxième type d'outils, ceux qui vont permettre d'effectuer un diagnostic, c'est-à-dire d'identifier et d'expliquer une ou plusieurs défaillances.

Problématique

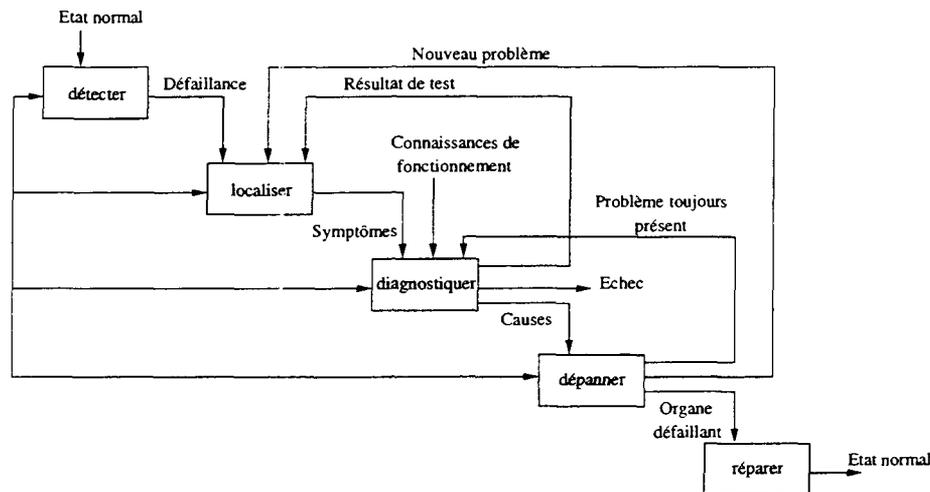


FIG. 1 – *Effectuer une opération de maintenance corrective*

Si l'on regarde la norme Afnor X60-010, relative à la maintenance, le diagnostic est défini comme étant : « *L'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test* ». Dans cette thèse nous allons donc présenter différentes approches logiques pour résoudre un problème de diagnostic et en proposer une nouvelle. Il est intéressant de replacer le diagnostic dans un contexte plus global qui est la maintenance corrective d'un système. A partir de la norme, on peut découper une opération de maintenance corrective en différentes tâches suivant le schéma de la figure 1¹. Examinons plus précisément chacune de ces tâches :

- *détecter*: C'est savoir reconnaître le passage d'un état normal à un état dégradé. Cette phase permet de détecter une défaillance d'un système.
- *localiser*: Une fois que l'on a détecté une défaillance on est amené à localiser la défaillance grâce à l'observation des symptômes.
- *diagnostiquer*: A partir des connaissances de fonctionnement et des symptômes on tente de diagnostiquer les causes de la défaillance. Cette phase de diagnostic peut aussi amener à raffiner la localisation, ou conduire à un échec.
- *dépanner/réparer*: Une fois les causes déterminées on pourra dépanner ou réparer le système puis vérifier que ce dépannage a bien éliminé le problème.

1. tiré de [Chatain(1991)]

De plus, on doit vérifier qu'aucun nouveau problème n'apparaît après cette action, c'est-à-dire qu'aucun autre problème n'était masqué par le problème résolu ou que le changement d'état dû au dépannage du premier problème n'a pas généré de nouvelles défaillances.

On voit, dans cette description globale du problème, que la tâche de diagnostic ne peut pas être complètement déconnectée des tâches de détection et de localisation. La méthode que nous allons proposer s'attachera à prendre en compte aussi bien l'aspect détection et localisation que l'aspect explication (diagnostic).

Toutes les méthodes de diagnostic à base de modèles reposent, comme leur nom l'indique, sur l'exploitation des particularités des modèles décrivant le comportement du système. Le choix de la modélisation est donc particulièrement crucial dans la problématique du diagnostic.

Nous avons choisi de représenter les systèmes à diagnostiquer en utilisant l'approche multi-modèles [Chittaro et al.(1993)] dont les qualités pour l'interprétation du comportement d'un système ont été démontrées pratiquement dans [Zouaoui(1998)]. Cette approche est une approche hiérarchique qui permet d'intégrer différents modèles à différents niveaux d'abstraction. Cette approche permet ainsi de représenter le comportement d'un système aussi bien sous un aspect "horizontal" : c'est-à-dire différents modèles d'un système au même niveau d'abstraction (en prenant en compte des hypothèses de modélisation différentes ou des points de vues physiques différents au même niveau d'abstraction), que sous un aspect "vertical" : c'est à dire en modélisant le même comportement à des niveaux d'abstractions différents (en prenant en compte des niveaux de granularité différents pour les composants et sous systèmes du système à modéliser).

Dans cette approche, nous utilisons principalement une modélisation à base de bond-graphs au niveau comportemental. Nous montrons dans cette thèse que les bond-graphs permettent la construction systématique de certaines parties des modèles utilisés dans cette approche ou fournissent une aide à la construction d'autres parties. Nous verrons aussi comment les dysfonctionnements du système peuvent être décrits au niveau de chacun des modèles mis en oeuvre. Enfin, nous verrons comment la multimodélisation peut être exploitée pour effectuer le "diagnostic" d'une défaillance. Nous verrons en particulier comment localiser les défaillances et comment, dans certaines conditions, ces défaillances peuvent être expliquées. Enfin, nous appliquerons cette approche de modélisation et notre méthode de diagnostic à un système physique réel correspondant à une partie du Groupe Moto Pompe Primaire d'une centrale nucléaire utilisant un Réacteur à Eau Pressurisée.

Objectifs

Nos objectifs sont de deux ordres :

- Du point de vue modélisation, nous allons nous attacher à spécifier comment la modélisation initiale, sous forme de bond-graph, peut être utilisée pour générer d'autres modèles ou pour guider leur construction.
- Du point de vue diagnostic, nous allons :
 1. Préciser les possibilités de modélisation des défaillances aux différents niveaux d'abstraction de l'approche multi-modèles.
 2. Identifier les différents états possibles (consistants avec les observations, défaillants, hors contexte) des objets modélisés (phénomènes, processus ou rôles fonctionnels).
 3. Utiliser ces identifications des "composants" d'un système et les caractéristiques propres de l'approche de modélisation (hiérarchisation des connaissances, description fonctionnelle du comportement) pour : localiser les défaillances et fournir des explications à celles-ci lorsqu'elles sont connues.

Organisation du rapport

Dans cette thèse nous proposons une méthode de diagnostic basée sur l'exploitation d'une approche multi-modèles. Ce rapport est composé de quatre parties.

La première présente un état de l'art des différentes méthodes de diagnostic, elle comprend six chapitres. Les trois premiers présentent les différentes approches du diagnostic à base de modèles, tout d'abord les méthodes par consistance n'utilisant que des modèles du bon fonctionnement des composants, puis les méthodes abductives et enfin, les méthodes par consistance utilisant des modèles du fonctionnement dégradé des composants. Les deux suivants décrivent les approches fonctionnelles du diagnostic, en particulier le cinquième chapitre montre les possibilités de diagnostic dans l'approche multi-modèles.

La deuxième présente en détail le cadre général de l'approche multi-modèles, les différents modèles qui la composent et les méthodes de construction de ceux-ci. Nous présentons d'abord, dans le premier chapitre, l'approche multi-modèles telle qu'elle a été proposée dans Chittaro [Chittaro et al.(1993)]. Les trois chapitres suivants s'attachent à préciser les différents modèles et les apports que nous introduisons. En particulier, nous décrivons comment l'utilisation des bond-graphs facilite et automatise partiellement la construction des modèles des rôles fonctionnels et des processus. Dans le dernier chapitre, avant la conclusion, un exemple récapitulatif illustre cette partie.

La troisième partie présente notre méthode de diagnostic. Elle s'organise autour de cinq chapitres. Après une introduction (premier chapitre), nous définissons, dans le second chapitre, les différents états possibles des phénomènes et des processus. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des possibilités de description des comportements anormaux dans l'approche multi-modèles. Le quatrième chapitre propose une méthode de diagnostic basée sur le respect de la consistance entre prédictions et observations et sur l'explication des observations. Le dernier chapitre présente les conclusions que l'on peut tirer de notre méthode de diagnostic.

Enfin, la quatrième et dernière partie présente l'application pour laquelle nous avons développé des modèles du comportement normal (chapitres 2, 3 et 4) et "anormal" (dans le cinquième chapitre) pour effectuer une identification du comportement puis un diagnostic des défaillances (chapitre six). Nous présentons les conclusions sur la mise en oeuvre de cette application dans le dernier chapitre.

Première partie

Le diagnostic à base de modèles

1

Le diagnostic basé sur la consistance

Le diagnostic basé sur la consistance repose sur l'utilisation d'un modèle du bon fonctionnement du système. Il est lié essentiellement à la tâche de localisation. En effet, le modèle ne prenant en compte que le fonctionnement normal il est impossible d'expliquer un comportement anormal. Ce modèle du bon fonctionnement est construit à partir d'une description de la structure du système ainsi que d'une description du comportement normal de chacun des composants à l'intérieur de cette structure [Reiter(1987), De Kleer et Williams(1986), De Kleer(1986)]. Ce sont les différences entre les observations et les prédictions obtenues grâce à la modélisation du comportement normal du système qui vont permettre la détection des défaillances. Ce type de raisonnement (basé sur la consistance) permet la déduction de tous les ensembles inconsistants d'hypothèses faites sur le comportement des composants. Dans ce type de raisonnement les liaisons entre les composants (i.e. la structure) ne peuvent pas être en défaut. Les liaisons pour lesquelles on veut pouvoir obtenir des pannes doivent être explicitement modélisées comme des composants.

La première caractérisation formelle d'un problème de diagnostic basé sur la consistance a été faite dans [Reiter(1987)] sous la forme d'un triplet (SD , $COMPS$, OBS). Ces trois ensembles sont définis de la façon suivante :

- SD est un ensemble de formules de la logique du premier ordre (avec égalité), modélisant le fonctionnement physique du système.
- $COMPS$ est un ensemble fini de constantes permettant d'identifier les composants du système.
- OBS est un ensemble de formules du premier ordre représentant les observations effectuées sur le système.

Exemple :

Pour éclairer ce formalisme, prenons l'exemple de deux inverseurs en série (figure 1.1) dont la modélisation est la suivante :

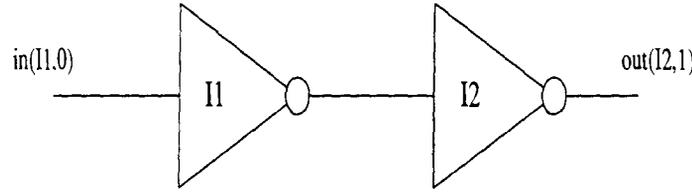


FIG. 1.1 - Inverseurs en série

- *SD* :

- modélisation du comportement d'un inverseur x :

$$\begin{aligned} \neg AB(x) \wedge in(x, 0) &\rightarrow out(x, 1) \\ \neg AB(x) \wedge out(x, 1) &\rightarrow in(x, 0) \\ \neg AB(x) \wedge in(x, 1) &\rightarrow out(x, 0) \\ \neg AB(x) \wedge out(x, 0) &\rightarrow in(x, 1) \end{aligned}$$

- modélisation de la structure (ici, une connexion) :

$$out(I1, v) \wedge in(I2, v) \rightarrow (v, w)$$

- *COMPS* = {*I1*, *I2*} :

- *OBS* = {*in(I1, 0)*, *out(I2, 1)*} :

Ici on suppose que la connexion entre *I1* et *I2* ne peut pas être défectueuse.

1.1 Un diagnostic : un état particulier du système

Pour pouvoir définir clairement un diagnostic basé sur la consistance il est nécessaire d'introduire la notion d'état du système. Dans un état du système chaque élément C de *COMPS* (chaque composant) est défini relativement à un prédicat particulier $AB(C)$ signifiant que le composant est anormal et à sa négation $\neg AB(C)$ signifiant que le composant est normal. Chaque élément C de *COMPS* a donc comme assignation $AB(C)$ ou $\neg AB(C)$. $AB(C)$ et $\neg AB(C)$ sont appelés des AB-littéraux.

On représente généralement un état du système par $D(C_p, C_n)$, où C_p et C_n ² sont deux ensembles disjoints de composants tels que $C_p = COMPS - C_n$. $D(C_p, C_n)$ est la conjonction :

$$[\bigwedge_{C \in C_p} AB(C)] \wedge [\bigwedge_{C \in C_n} \neg AB(C)]$$

2. C_p est l'ensemble des composants en panne et C_n l'ensemble des composants normaux

Un diagnostic sera un état pour lequel les ensembles C_p et C_n ne conduisent pas à une inconsistance, c'est à dire qu'il n'y aura pas de contradiction entre les valeurs prédites par le modèle pour cet état (via les ensembles C_p et C_n) et les valeurs observées OBS .

Formellement soit $(SD, COMPS, OBS)$ le triplet représentant le problème de diagnostic à résoudre et $D(C_p, C_n)$ un état du système. Alors, $D(C_p, C_n)$ sera un diagnostic basé sur la consistance ssi :

$$SD \cup OBS \cup \{D(C_p, C_n)\} \text{ est consistant.}$$

Dans notre exemple (figure 1.1) les diagnostics consistants sont :

$$D_1(\{I1, I2\}, \emptyset) = \{AB(I1) \wedge AB(I2)\}$$

$$D_2(\{I1\}, \{I2\}) = \{AB(I1) \wedge \neg AB(I2)\}$$

$$D_3(\{I2\}, \{I1\}) = \{\neg AB(I1) \wedge AB(I2)\}$$

Notons qu'un diagnostic n'existera pour $(SD, COMPS, OBS)$ que si :

$$SD \cup OBS \text{ est consistant.}$$

En effet, si $SD \cup OBS$ est inconsistant, alors, quel que soit l'état $D(C_p, C_n)$, $SD \cup OBS \cup D(C_p, C_n)$ sera inconsistant.

1.2 Calculer et représenter les diagnostics

Le calcul des diagnostics passe par une première phase où l'on calcule les « conflits ». Nous allons tout d'abord introduire cette notion.

Pour un paramètre observable P , si $P(a)$ est la valeur prédite pour le bon fonctionnement du système alors on aura :

$$SD \cup \{\wedge_{C_i \in COMPS_1} \neg AB(C_i)\} \Rightarrow P(a) \\ \text{avec } COMPS_1 \subseteq COMPS$$

Cela signifie que pour pouvoir prédire $P(a)$ il suffit de supposer que chaque C_i de $COMPS_1$ est non-anormal ($\neg AB(C_i)$). Donc si, dans OBS , P a une valeur $P(x)$ différente de $P(a)$ on doit alors supposer que l'un, au moins, des C_i est anormal ($AB(C_i)$). Cet ensemble $COMPS_1$ détermine un « conflit ». Un conflit sera donc un ensemble de composants dont l'un au moins est défectueux. En effet, si $P(x) \in OBS$ on obtient :

$$SD \cup OBS \cup \{\wedge_i \neg AB(C_i)\} \Rightarrow \perp \\ \text{soit } SD \cup OBS \Rightarrow \vee_i AB(C_i)$$

Le conflit correspondant sera $Conf_1 = \{\vee_i AB(C_i) \mid \forall C_i \in COMPS_1\}$:

$$SD \cup OBS \rightarrow Conf_1$$

Un conflit pour le système $(SD, COMPS, OBS)$ est donc défini formellement comme une disjonction d'AB-littéraux positifs déduite de $SD \cup OBS$.

Les diagnostics sont alors les ensembles intersectant chaque conflit. Un diagnostic est donc composé d'AB littéraux, la consistance étant assurée si ce diagnostic (état) contient au moins un AB littéral de chacun des conflits. En effet, pour supprimer le conflit $Conf_j$ (et ainsi rétablir la consistance), il faut supposer qu'un des composants de $COMPS_j$ est anormal.

Soit $Conf$ l'ensemble des conflits déduits de $(SD, COMPS, OBS)$: $SD \cup OBS \rightarrow Conf$. $D(C_p, C_n)$ sera un diagnostic ssi :

$$Conf \cup \{D(C_p, C_n)\} \text{ est consistant.}$$

Dans notre exemple (figure 1.1), pour un fonctionnement normal du système, on aurait $SD \cup \{\neg AB(I1) \wedge \neg AB(I2)\} \Rightarrow out(I2, 0)$. Or l'observation est $out(I2, 1)$ donc le seul conflit est : $AB(I1) \vee AB(I2)$,

$$\begin{aligned} \{AB(I1) \vee AB(I2)\} \cup \{D_1(\{I1, I2\}, \emptyset)\} &\text{ est consistant} \\ \{AB(I1) \vee AB(I2)\} \cup \{D_2(\{I1\}, \{I2\})\} &\text{ est consistant} \\ \{AB(I1) \vee AB(I2)\} \cup \{D_3(\{I2\}, \{I1\})\} &\text{ est consistant} \\ \{AB(I1) \vee AB(I2)\} \cup \{D_4(\emptyset, \{I1, I2\})\} &\rightarrow \perp \end{aligned}$$

Seul l'état D_4 supposant que les deux composants sont non anormaux est inconsistent.

Avec le formalisme utilisé il y a 2 modes possibles pour chaque composant, soit au total $2^{\|COMPS\|}$ états. Il y a donc jusqu'à $2^{\|COMPS\|}$ solutions potentielles à notre problème de diagnostic. Il faut donc trouver un moyen de départager et de représenter économiquement les diagnostics solutions.

1.2.1 Diagnostics minimaux

L'un des premiers critères que l'on peut appliquer est un critère de parcimonie. On ne garde que les diagnostics minimaux pour l'inclusion des composants en panne.

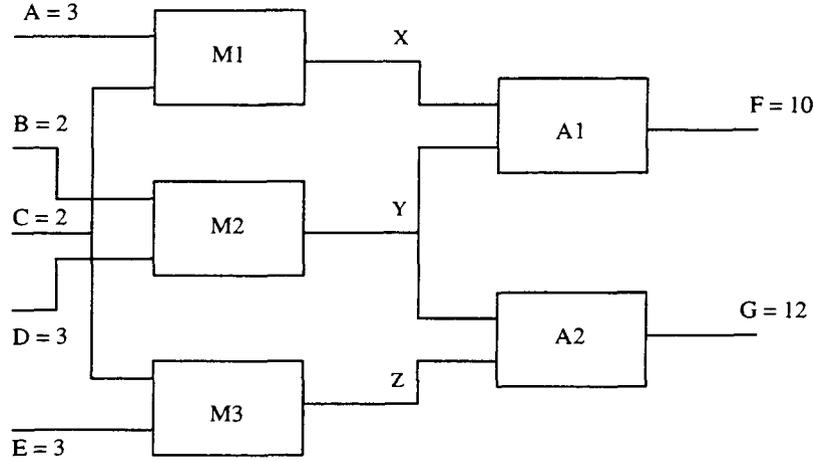
- $D(C_p, C_n)$ sera un diagnostic minimal si et seulement si aucun sous-ensemble de C_p ne définit un diagnostic.

Dans l'exemple de la figure 1.1, parmi les trois diagnostics consistants seul deux sont minimaux :

$$\begin{aligned} D_2(\{I1\}, \{I2\}) &= AB(I1) \wedge \neg AB(I2) \\ \text{et } D_3(\{I2\}, \{I1\}) &= \neg AB(I1) \wedge AB(I2) \end{aligned}$$

Ce qui n'est pas le cas de $D_1(\{I1, I2\}, \emptyset)$.

1.3 Exemple récapitulatif

FIG. 1.2 - *Circuit Logique*

Pour illustrer tous les concepts introduits, nous allons utiliser l'exemple ci-dessus. Dans cet exemple, M1, M2, et M3 sont des multiplieurs alors que A1 et A2 sont des additionneurs. Les observations $F = 10$ ($val(F, 10)$) et $G = 12$ ($val(G, 12)$) permettent de déduire deux conflits :

- (1) - $AB(A1) \vee AB(M1) \vee AB(M2)$
- (2) - $AB(A1) \vee AB(M1) \vee AB(M3) \vee AB(A2)$

Soit CXT l'ensemble des valeurs observées en entrée :

$$CXT = \{val(A, 3) \wedge val(B, 2) \wedge val(C, 2) \wedge val(D, 3) \wedge val(E, 3)\}$$

Avec CXT la phase de prédiction nous donne :

$$\begin{aligned} SD \cup CXT \cup \{\neg AB(A1) \wedge \neg AB(M1) \wedge \neg AB(M2)\} &\rightarrow val(F, 12) \\ SD \cup CXT \cup \{val(F, 10)\} \cup \{\neg AB(A1) \wedge \neg AB(M1)\} &\rightarrow val(Y, 4) \\ SD \cup CXT \cup \{val(G, 12)\} \cup \{\neg AB(M3) \wedge \neg AB(A2)\} &\rightarrow val(Y, 6) \end{aligned}$$

On voit bien désormais que le conflit (1) vient de la contradiction entre $val(F, 12)$, la valeur prédite, et $val(F, 10)$, valeur observée; alors que le conflit (2) vient de la contradiction entre $val(Y, 4)$, valeur prédite avec l'observation $val(F, 10)$, et $val(Y, 6)$, valeur prédite avec l'observation $val(G, 12)$

Les diagnostics minimaux construits à partir de (1) et (2) sont :

$$\begin{aligned} D_1 &= \{AB(A1)\} \\ D_2 &= \{AB(M1)\} \\ D_3 &= \{AB(M2) \wedge AB(M3)\} \\ D_4 &= \{AB(M2) \wedge AB(A2)\} \end{aligned}$$

Toute la partie calcul des conflits du diagnostic basé sur la consistance repose principalement sur l'utilisation de Systèmes de Maintien de la Cohérence. Ces systèmes permettent le calcul de tous les conflits minimaux d'une façon exhaustive. Nous devons donc, pour éclairer la technique de calcul des conflits, présenter les Systèmes de Maintien de la Cohérence.

1.4 Les Systèmes de Maintien de la Cohérence

1.4.1 Généralités

Le diagnostic basé sur la consistance est réalisable grâce à l'utilisation des Systèmes de Maintien de la Cohérence (SMC). Le plus connu des systèmes de diagnostic basé sur la consistance est le General Diagnostic Engine (GDE) de De Kleer et Williams [De Kleer et Williams(1987)]. C'est un des premiers systèmes capable de gérer des défaillances multiples. D'ailleurs, la notion de conflits présentée au paragraphe 1.2 découle des travaux de J. De Kleer.

GDE construit les diagnostics minimaux à partir des conflits minimaux. Ce calcul des conflits minimaux est effectué grâce à l'utilisation d'un ATMS (Assumption based Truth Maintenance System).

L'architecture d'un GDE comprend un Système de Déduction dépendant du domaine d'étude et un Système de Maintien de la Cohérence indépendant du domaine. La figure 1.3 représente l'architecture générale d'un système de résolution de problèmes. Le système de déduction gère une base de connaissances

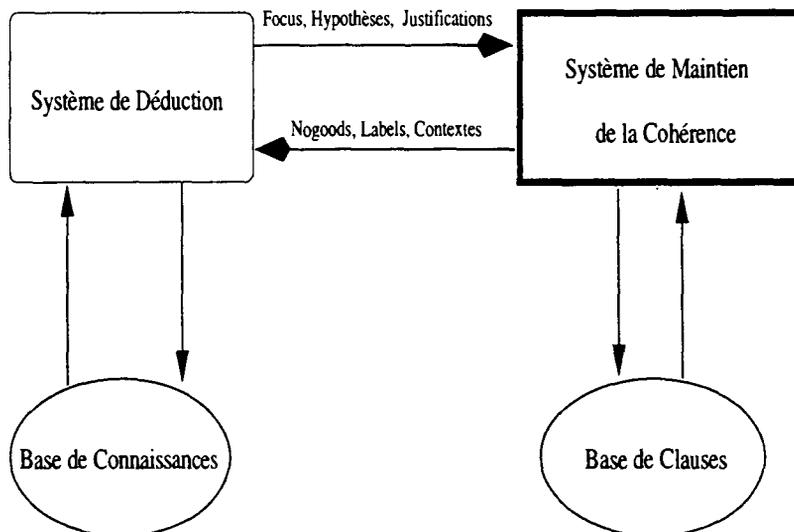


FIG. 1.3 - Architecture du résolveur de problèmes

contenant la description du système et les hypothèses de travail qui peuvent être

nécessaires dans la résolution, par exemple l'ordre des préférences entre les modes de comportement d'un composant (voir section 3).

Le mécanisme du système de déduction transmet au SMC les justifications nécessaires à la description du système et des observations.

Les SMC³ sont divisés en deux grandes familles : les ATMS et les CMS. La première famille, les ATMS, utilise des mécanismes de propagation pour mettre à jour les labels. La deuxième famille, les CMS (Clause Management System), utilise le principe de résolution, ou des restrictions de celui-ci, pour générer l'ensemble des impliqués premiers de la base de clauses (base de connaissances). La caractéristique principale des SMC est de permettre le calcul des éléments suivants :

- *Environnements* : On appelle environnement d'un littéral d un ensemble d'hypothèses qui permet, via l'ensemble des justifications, de déduire d .
- *Nogoods* : Les nogoods sont les environnements inconsistants. C'est à dire les ensembles d'hypothèses que l'on ne peut pas supposer vraies en même temps sans obtenir une contradiction.
- *Label* : Le label d'un littéral d est l'ensemble des environnements permettant de déduire d .
- *Contexte* : L'ensemble des littéraux déductibles d'un environnement consistant E est appelé contexte de E .

Le label d'un littéral d est maintenu :

- *Complet, Correct, Cohérent et Minimal*

L'architecture générale d'un résolveur de problème a été proposée par Reiter et De Kleer [Reiter et De Kleer(1987)]. Dans cet article ils relient les notions de l'ATMS à la notion d'impliqué premier⁴. Les labels et les nogoods calculés correspondent à des impliqués premiers particuliers de l'ensemble des justifications introduites dans l'ATMS.

1.4.2 Les ATMS

L'ATMS proposé par De Kleer ([De Kleer(1986), De Kleer et Williams(1986)] et [Reiter et De Kleer(1987)]) gère les justifications sous la forme de clause de Horn propositionnelle de type $\alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n \rightarrow \beta$ où les α_i sont les antécédents de la clause et β le conséquent.

De plus, dans un ATMS on trouve deux types de littéraux : les hypothèses, qui vont permettre de définir les environnements, et les non-hypothèses, tous

3. Ceux à labels complexes, qui manipulent explicitement des hypothèses

4. Sur les notions d'impliqué et d'implicant premiers voir aussi [Reiter(1987)]

les autres littéraux. Les données sont représentées dans l'ATMS par des noeuds contenant le nom de cette donnée, le label de cette donnée et enfin les justifications de cette donnée. La tâche de l'ATMS est d'associer à chaque noeud les « environnements » permettant de déduire le littéral « marquant » ce noeud. Un environnement E pour un littéral l sera un ensemble minimal d'hypothèses qui permet de déduire ce littéral l pour un ensemble de justifications J . Dans le cas du diagnostic, J est formé de clauses de Horn propositionnelles, conséquences logique de $SD \cup OBS$:

$$J \cup E \rightarrow l$$

Ce système permet de raisonner sur plusieurs contextes en même temps. En effet le même littéral peut être déduit à partir de différents environnements. Formellement, on appellera contexte de E ($Cxt(E)$) l'ensemble des littéraux déductibles d'un environnement E . L'ensemble minimal des environnements minimaux permettant de déduire le littéral l est appelé label de l : $\mathcal{L}(l)$. A chaque nouvelle justification introduite dans le SMC le label des littéraux intervenant dans cette justification (α_i) est mis à jour. Il existe enfin un noeud particulier, le noeud \perp , qui symbolise l'incohérence. Tous les ensembles d'hypothèses menant à une incohérence sont affectés comme environnements du noeud \perp . Chacun de ces environnements incohérents est appelé un nogood (N_i). Comme les labels, l'ensemble des nogoods N_{ogood} est maintenu minimal (pour l'inclusion).

$$SD \cup OBS \cup N_i \rightarrow \perp, \forall N_i \in N_{ogood}$$

Dans l'ATMS de De Kleer [De Kleer(1986)] les justifications sont introduites incrémentalement. A chaque ajout de justifications l'ATMS met à jour le label de toutes les données.

1.4.3 Les CMS

Les SMC du second type sont ceux basés sur le principe de résolution. On les regroupe dans la classe des Clause Management Systems. La première forme élaborée du CMS est proposée par Kean et Tsiknis [Kean et Tsiknis(1988)]. Puis Tayrac et Cayrol [Tayrac(1990)] ont adopté cette architecture en proposant de réintroduire la notion d'hypothèse, perdue dans le CMS de Kean et Tsiknis.

SMC basé sur la CAT résolution

L'idée de Tayrac est de conserver les fonctionnalités du CMS sans calculer tous les impliqués premiers de la base de clauses. Dans son SMC les clauses ne sont plus uniquement des clauses de Horn mais des clauses totalement générales sous la forme implicative de Kowalski. Sous cette forme, les parties antécédentes et conséquentes sont respectivement une conjonction et une disjonction de littéraux positifs. L'ensemble des littéraux est divisé en littéraux typés (les hypothèses)

et littéraux non-typés (toutes les autres données). Cette distinction permet à Tayrac de définir un ensemble particulier de clauses, les *Clauses à Antécédents Typés (CAT)*, qui ne contiennent que des littéraux typés en partie antécédent. Ensuite il définit une stratégie de résolution qui permet de ne calculer que les impliqués premiers qui sont aussi des CAT.

Certaines CAT correspondent à des généralisations des *nogoods* et des environnements, on les appelle des *G-nogoods* et des *G-environnements*. Un impliqué premier CAT ne contenant qu'un seul littéral non typé d en partie conséquent correspond à un *G-environnement* pour ce littéral d . Un impliqué premier CAT n'ayant aucun littéral non typé en partie conséquent correspond à un *G-nogood*. Les *G-nogoods* et les *G-environnements* vérifient les mêmes propriétés que les *nogoods* et les environnements définis par De Kleer, mais ils peuvent contenir des hypothèses et des négations d'hypothèses. En effet les hypothèses sont les littéraux typés de la partie antécédent et les négations d'hypothèses sont les littéraux typés de la partie conséquent d'une même CAT. Le *G-label* d'un littéral d sera l'ensemble des *G-environnements* permettant de déduire d .

Les SMC et en particulier le CMS rencontrent un gros problème qui est le coût calculatoire. En effet, ils calculent le label complet de toutes les données. L'explosion combinatoire qui en découle handicape fortement l'utilisation courante de tels systèmes. Aussi, pour contrôler cette explosion, deux voies sont possibles : calculer uniquement une partie du label pour uniquement les données qui sont utiles et/ou contrôler l'ajout de clauses à l'interface SD/SMC. Récemment une stratégie dérivée de la CAT-résolution, la CATGDL-résolution proposée dans [Dumas et al.(1996)], permet de focaliser la résolution sur la production d'impliqués premiers particuliers. Ces impliqués premiers sont définis relativement à un focus F , lequel focus est constitué d'un ensemble d'hypothèses négatives D et d'un ensemble d'hypothèses positives G soit $F = G, D$. Ces impliqués premiers doivent contenir en partie antécédent un sous-ensemble de G et en partie conséquent un sous ensemble de D . Les états pour lesquels on veut vérifier l'existence (ou non) d'une solution serviront de focus F .

1.5 Conclusions

Cette méthode de diagnostic ne s'avère pas toujours très efficace. Imaginons le cas où les OBS nous amènent à déduire un unique conflit mettant en jeu tous les composants du système à diagnostiquer. Cette situation peut se traduire par : « l'un au moins des composants est défectueux », mais aussi par, « à l'exception de l'état où tous les composants sont normaux, tous les états du système sont des diagnostics ». D'une façon générale, dans le cas où le(s) conflit(s) contiennent une majorité des composants du système, il est nécessaire de pouvoir trouver des méthodes permettant de restreindre l'espace des candidats diagnostics générés par le produit cartésien de tels conflits.

Une première méthode est de se restreindre, comme on l'a vu en 1.2, à des candidats mettant en jeu le minimum de composants défectueux. On ne gardera ainsi que les candidats avec un C_p de cardinalité minimale. Malheureusement, dans ce cas là, pour un conflit donné, il y aura autant de diagnostics minimaux qu'il y a de composants présents dans le conflit. Il faut donc trouver d'autres méthodes pour départager les candidats. Un autre problème majeur est la perte du sens physique lors de la construction des candidats : un candidat logiquement possible est parfois physiquement impossible [Struss et Dressler(1989)].

Une approche particulièrement intéressante, à ces deux points de vue, est d'intégrer des modèles des mauvais fonctionnements connus des composants. Ceci permet de vérifier que les composants que l'on suppose anormaux, pour rétablir la consistance, ont un dysfonctionnement qui correspond à un des dysfonctionnements connus. C'est ce que l'on verra dans la section 3. En effet, avant de présenter l'insertion de mauvais fonctionnement dans le raisonnement basé sur la consistance, il faut d'abord étudier comment des connaissances de mauvais fonctionnement seules peuvent être utilisées. Nous présentons, dans le chapitre suivant, des méthodes de diagnostic abductif qui n'utilisent que des connaissances de mauvais fonctionnement.

2

Diagnostic Abductif

La tâche du diagnostic abductif est la recherche d'explications aux phénomènes observés. Le diagnostic abductif est donc basé sur l'utilisation de modèles permettant de décrire les mauvais fonctionnements d'un système, ou d'un composant, et d'en déduire les observations causées par ce comportement. Ces observations correspondent à des phénomènes déjà observés ou à des symptômes de dysfonctionnements prévisibles. Un diagnostic sera, ici, un ensemble d'hypothèses permettant d'expliquer tout ou partie de OBS. L'une des formalisations les plus abouties d'un problème de diagnostic abductif est celle de Console [Console et Torasso(1990), Console et Torasso(1992)], elle est en effet très générique et permet de comparer plus facilement les différents types de problèmes de diagnostic.

2.1 Formalisation générale de l'abduction

On se place dans le cadre de la logique des propositions, où l'on définit une théorie \mathcal{T} telle que: $\mathcal{T} = \mathcal{F} \cup \{ \text{th} \mid \mathcal{F} \rightarrow \text{th} \}$ avec \mathcal{F} un ensemble d'axiomes. Soit \mathcal{A} un ensemble de formules abductibles et soit G une formule quelconque :

\mathcal{E} un sous ensemble de formules abductibles ($\mathcal{E} \subseteq \mathcal{A}$) sera une explication pour G si $\mathcal{F} \cup \mathcal{E} \Rightarrow G$. Il faut bien évidemment que $\mathcal{F} \cup \mathcal{E}$ soit cohérent. On peut de plus définir les explications en terme de minimalité: une explication \mathcal{E} sera minimale pour G s'il n'existe pas d'explication \mathcal{E}' pour G telle que $\mathcal{E}' \subset \mathcal{E}$.

Dans le cadre du diagnostic, \mathcal{A} correspondra aux causes possibles de pannes et sera un ensemble de formules atomiques, \mathcal{F} correspondra à la description du système et G à un ensemble d'observations faites sur le système réel. Comme \mathcal{A} , G sera un ensemble de formules atomiques.

2.2 Formalisation de l'abduction pour le diagnostic

Dans [Console et Torasso(1992)] un problème de diagnostic est présenté comme un triplet :

$$DP = \langle \langle SD, COMPS \rangle, CXT, OBS \rangle$$

- $\langle SD, COMPS \rangle$ ensemble de formules et d'atomes représentant le système.
- CXT ensemble de formules atomiques, c'est l'ensemble des observations contextuelles (non à expliquer).
- OBS ensemble de formules, c'est l'ensemble des observations non contextuelles, c.à.d. les variables dont la valeur va influencer sur l'abduction d'explications.

Dans CXT ou OBS l'atome $f(a)$ signifiera que la valeur a a été observée pour le paramètre f . Une contrainte est imposée à $CXT \cup OBS$: $CXT \cup OBS$ ne doit contenir qu'une seule instance d'un même paramètre observable.

D'une manière plus précise, un problème d'abduction est représenté par un triplet $AP = \langle \langle SD, COMPS \rangle, CXT, \langle \Psi^+, \Psi^- \rangle \rangle$ dans lequel :

- $\Psi^+ \subseteq OBS$, Ψ^+ correspond à un sous-ensemble d'observations, ce sous ensemble est celui qui contient les observations que l'on va chercher à expliquer.
- $\Psi^- = \{ \neg f(x) \mid f(y) \in OBS \text{ pour toute valeur admissible } x \text{ du paramètre } f \text{ autre que } y \}$.

Ψ^- correspond à un ensemble de littéraux négatifs, ces littéraux sont, pour chaque paramètre f ayant une valeur dans OBS , la négation des autres instances possibles de f (on suppose que les observables ne peuvent prendre qu'une seule valeur). Accessoirement on peut trouver dans Ψ^- des informations concernant des observations négatives. Par exemple si g est un paramètre n'ayant aucune valeur dans OBS l'observation $\neg g(a)$ peut être insérée dans Ψ^- , dans ce cas, Ψ^- contient l'union des observations négatives et des valeurs en conflit avec celles contenues dans OBS .

Console et Torasso définissent une assignation W comme une conjonction d'atomes abductibles telle que, pour chaque élément $c \in COMPS$, W contient exactement un élément de la forme $\alpha(c)$ (α symbole abductible). On peut rapprocher la notion d'assignation de celle d'état : en effet dans une assignation chaque « composant » possède une « valeur » α , équivalente au mode (AB ou $\neg AB$) dans un état.

Une assignation W pour le problème $AP = \langle \langle SD, COMPS \rangle, CXT, \langle \Psi^+, \Psi^- \rangle \rangle$ sera une explication pour AP si :

1. pour chaque $m(a) \in \Psi^+$ on a :

$$SD \cup CXT \cup W \rightarrow m(a)$$

2. W est consistant avec Ψ^- c.a.d. :

$$SD \cup CXT \cup W \cup \Psi^- \text{ est consistant}$$

ce qui revient à dire que, pour chaque $\neg m(b) \in \Psi^-$, on a :

$$SD \cup CXT \cup W \not\rightarrow m(b)$$

En fait, dans ce formalisme, un diagnostic abductif explique Ψ^+ et est consistant avec Ψ^- . La consistance avec Ψ^- consiste à vérifier que W ne permet pas de déduire, pour un paramètre, une valeur différente de celle que ce paramètre possède dans OBS .

A partir d'une explication W , on pourra construire un diagnostic. Dans la section 2.4 on trouvera un exemple permettant d'illustrer ces définitions.

2.3 Différentes définitions du diagnostic abductif

C'est le contenu de Ψ^+ qui va fixer le type de connaissance utilisée dans le processus d'abduction. En effet, OBS peut être partitionné entre les observations issues de phénomènes correspondant à des comportements normaux du système OBS_n et les observations correspondant à des comportements anormaux du système OBS_{an} . Les éléments appartenant à OBS_n ne pourront être expliqués que si le comportement du système en bon fonctionnement est complètement décrit dans SD . De la même façon pour les éléments appartenant à OBS_{an} seuls ceux correspondant à des dysfonctionnements modélisés pourront être expliqués.

Il peut donc exister plusieurs définitions différentes d'un problème d'abduction suivant ce que l'on veut prendre en compte dans Ψ^+ .

- $\Psi^+ = OBS_n \cup OBS_{an}$. Dans ce cas, on retrouve la définition de l'abduction donnée par [Poole(1989)] qui correspond à l'idée que toutes les observations doivent être expliquées pour obtenir un diagnostic. Ce type de diagnostic est celui ayant la plus forte notion d'explication.
- $\Psi^+ = OBS_{an}$. Ce cas correspond à la restriction que l'on fait nécessairement lorsque l'on ne dispose dans SD que d'informations liées au mauvais fonctionnement du système.

- $\Psi^+ = \emptyset$. Ce cas correspond à un raisonnement basé sur la consistance seule, en effet, il ne reste plus que la condition de consistance (2) à vérifier.
- $\Psi^+ = OBSn$. Dans ce cas on ne cherche à expliquer que les observations liées à des phénomènes normaux, SD n'a besoin de contenir que la description du bon fonctionnement du système. Ce type d'abduction peut aussi être réalisé grâce à l'utilisation d'un SMC. En effet chaque observation de bon fonctionnement possède un label qui correspond à des hypothèses justifiant (expliquant) l'apparition de cette observation.

De la même façon que dans le diagnostic basé sur la consistance, on peut introduire les notions d'explications minimales (pour l'inclusion), d'explications partielles ou noyaux (voir 3.1). En effet si on appelle $faute(W)$ l'ensemble des composants n'ayant pas une assignation correspondant à leur fonctionnement correct dans W alors :

- $faute(W)$ sera une explication minimale si et seulement si il n'existe pas d'explication W' telle que $faute(W') \subset faute(W)$.
- Une explication partielle W_p est un ensemble consistant d'atomes abductibles tel que tous les éléments de Ψ^+ sont déduits de $SD \cup CXT \cup W_p$.
- Une explication noyau W_n est une explication partielle minimale (pour l'inclusion) telle que toute assignation complète, sur ensemble de W_n , est une explication.

Graduation des problèmes

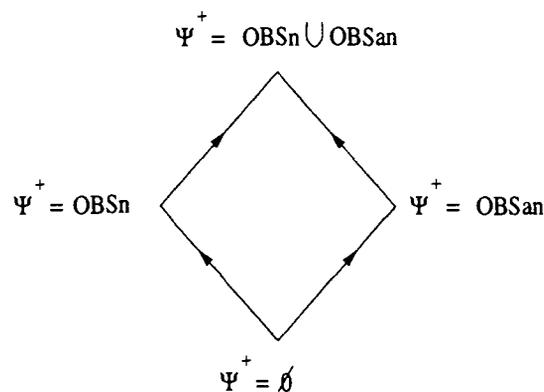


FIG. 2.1 – Treillis des problèmes de diagnostic

Dans [Console et Torasso(1992)], les auteurs montrent que l'on peut relier ces quatre problèmes. Si l'on compare deux formulations d_1 et d_2 d'un problème de diagnostic (en tant que problème d'abduction), on dira que d_1 précède d_2 si

$\Psi_{d_1}^+ \subset \Psi_{d_2}^+$. En ce qui concerne les explications, si d_1 précède d_2 alors $EXPL_{d_2} \subseteq EXPL_{d_1}$. Grâce à cette définition et ces propriétés on peut définir un treillis représentant les différents problèmes de diagnostic suivant le contenu de Ψ^+ . On voit que, plus on monte dans le treillis (figure 2.1), plus l'ensemble de solution se réduit et plus la solution est fortement explicative.

Cette formalisation suppose que tous les littéraux abductibles, plus particulièrement les causes, sont équiprobables. Ainsi si l'on a deux solutions W_1 et W_2 à la formulation d d'un problème de diagnostic on ne pourra pas les départager.

2.4 Un exemple de raisonnement abductif

2.4.1 Le formalisme

Dans [Console et al.(1989), Console et Torasso(1990)] on trouve une représentation explicite de ce type de raisonnement ainsi qu'une description des éléments y intervenant. Dans la figure 2.2 on peut voir cette structure. Elle comprend cinq types de noeuds et trois types d'arcs.

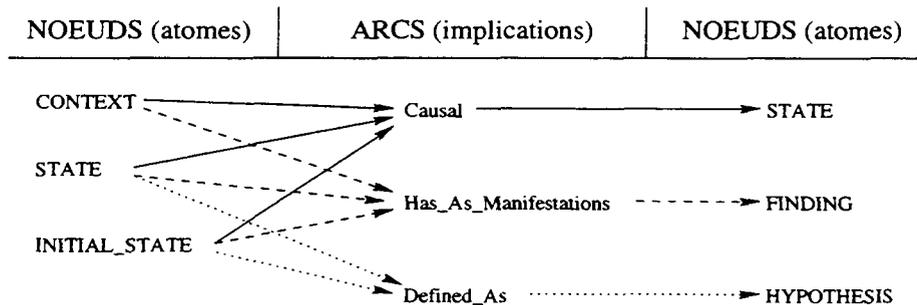


FIG. 2.2 – Structure des données

Examinons ces noeuds :

- Les noeuds *CONTEXT* (C_i): ils correspondent aux informations contextuelles.
- Les noeuds *INITIAL-STATE* (γ_i): ils correspondent à des états abductibles⁵ qui ne peuvent être que l'origine d'un arc causal. Chaque état initial d'un composant est caractérisé par une valeur qualitative prise dans l'ensemble: correct, défaut1, défaut2, ..., défautn.
- Les noeuds *STATE* (S_i): ils correspondent à des états partiels internes au système. Ils sont eux aussi définis relativement à un certain nombre de valeurs qualitatives. Ils peuvent être l'origine ou l'extrémité d'un arc causal.

5. Les états dont nous parlons ici ne doivent pas être confondus avec la notion d'état du diagnostic basé sur la consistance. Ici un état n'est que l'assignation d'une valeur qualitative à un paramètre représentatif d'un certain comportement du système.

- Les noeuds *FINDING* (F_i): ils correspondent à des manifestations observables des états internes du système qui eux ne peuvent pas être observés.
- Les noeuds *HYPOTHESIS* (H): ils correspondent à des défauts de fonctionnement du système modélisé.

Les noeuds STATE, INITIAL-STATE, FINDING et CONTEXT sont représentés par des formules atomiques comme on l'a vu dans la section 2.2.

Examinons les arcs :

- Les arcs *Causal* (CA): ils représentent les relations de cause à effet directes entre un ensemble de noeuds CONTEXT, INITIAL-STATE et STATE et un noeud STATE.
- Les arcs *Has-As-Manifestations* (HAM): ils représentent les relations entre les noeuds CONTEXT, INITIAL-STATE et STATE et un noeud FINDING. Cela correspond à relier des états initiaux ou partiels (non observables) à une manifestation observable.
- Les arcs *Defined-As* (DA): ils représentent les relations entre les noeuds INITIAL-STATE et STATE et un noeud HYPOTHESIS. Ils permettent de définir les hypothèses associées à des états éventuellement initiaux.

Les arcs Causal et Has-As-Manifestations sont des implications du type :

$$\gamma_1(x_1) \wedge \dots \wedge \gamma_i(x_i) \wedge S_1(y_1) \wedge \dots \wedge S_j(y_j) \wedge C_1(z_1) \wedge \dots \wedge C_k(z_k) \rightarrow$$

$$S(f(x_1, \dots, x_i, y_1, \dots, y_j, z_1, \dots, z_k)) \text{ dans le cas d'un arc Causal ou}$$

$$F(f(x_1, \dots, x_i, y_1, \dots, y_j, z_1, \dots, z_k)) \text{ dans le cas d'un arc Has-As-Manifestations.}$$

Les fonctions $f()$ permettent d'exprimer les relations entre les attributs des états initiaux γ_i , des états S_j et des paramètres contextuels C_k avec les attributs de l'état « causé » S ou de la manifestation F . L'ensemble des formules correspondant à ce réseau « causal » sera donc le modèle de comportement du système. L'arc Defined-As lui n'est pas défini grâce à une implication logique. Il correspond à l'équivalence états / hypothèse. Il ne représente pas la causalité comme les liens HAM ou CA, mais sera utilisé à un autre niveau d'abstraction dans le raisonnement. On va donc utiliser cet arc pour définir $def(H)$ qui sera l'ensemble des états et des états initiaux associés au noeud hypothèse H . $def(H)$ sera utilisé pour définir le diagnostic à partir des états déductibles d'une explication. Dans le cas où les noeuds $S_1, \dots, S_i, \gamma_1, \dots, \gamma_j$ sont connectés au noeud H par des arcs Defined-As on a :

$$def(H) \equiv \{\exists x_1 S_1(x_1) \wedge \exists x_i S_i(x_i) \wedge \dots \wedge \exists y_1 \gamma_1(y_1) \wedge \dots \wedge \exists y_j \gamma_j(y_j)\}$$

Notons que dans [Console et al.(1989)] est présentée une définition qui est liée à une représentation s'appliquant à un modèle de causes de pannes ne contenant

que du mauvais fonctionnement. Dans cette version antérieure à celle présentée ici, les noeuds INITIAL-STATE sont appelés INITIAL-CAUSE et les noeuds CONTEXT ne sont pas définis. La différence principale tient à l'existence d'arc de type *MAY*. Ces arcs sont des arcs HAM ou CA classiques auxquels est ajoutée une condition abstraite α qui représente le fait qu'une partie de la relation HAM ou CA est incomplètement connue et qu'une condition peut influencer sur cet arc. Ces conditions α doivent être prises en compte au niveau des hypothèses. Entre autres, on pourra trouver un exemple d'utilisation de ce type de méthode dans [Porcheron et al.(1994), Porcheron et Ricard(1993)]. Dans ces articles on trouvera aussi des utilisations de raisonnement abductif sur différents types d'informations.

2.4.2 Un exemple

Pour illustrer cela on prendra l'exemple présenté dans [Console et Torasso(1990)]. Les implications logiques définissant une partie d'un moteur y sont décrites de la façon suivante :

1. *reservoir* – *huile(normal)* \rightarrow *niveau* – *huile(normal)*
2. *reservoir* – *huile(perce)* \rightarrow *fuite* – *huile(presente)*
3. *fuite* – *huile(presente)* \rightarrow *huile* – *sous* – *voiture(presente)*
4. *fuite* – *huile(presente)* \rightarrow *niveau* – *huile(bas)*
5. *niveau* – *huile(normal)* \rightarrow *temoin* – *huile(vert)*
6. *niveau* – *huile(bas)* \rightarrow *temoin* – *huile(rouge)*
7. *niveau* – *huile(normal)* \wedge *moteur(marche)* \rightarrow *temp* – *moteur(normale)*
8. *niveau* – *huile(bas)* \wedge *moteur(marche)* \rightarrow *temp* – *moteur(haute)*

Dans cette description on a :

1. *reservoir*–*huile* est un état initial ayant deux valeurs admissibles « *normal* » et « *perce* » ;
2. *huile* – *sous* – *voiture* et *temoin* – *huile* sont des manifestations ayant respectivement pour valeurs admissibles *absente*, *presente* et *vert*, *rouge* ;
3. *moteur* est une observation contextuelle ayant pour valeurs admissibles *marche*, *arret* ;
4. *fuite* – *huile*, *niveau* – *huile* et *temp* – *moteur* sont des états ayant respectivement pour valeurs admissibles *absente*, *presente* ; *bas*, *normal*, *haut* et *normale*, *haute*.

Enfin, on a une hypothèse (non représentée dans la liste d'implications) qui est *surchauffe – moteur* et le $def(H)$ associé qui est :

$$- def(surchauffe - moteur) \equiv temp - moteur(haute)$$

Ces données peuvent être regroupées dans le schéma suivant FIG 2.3.

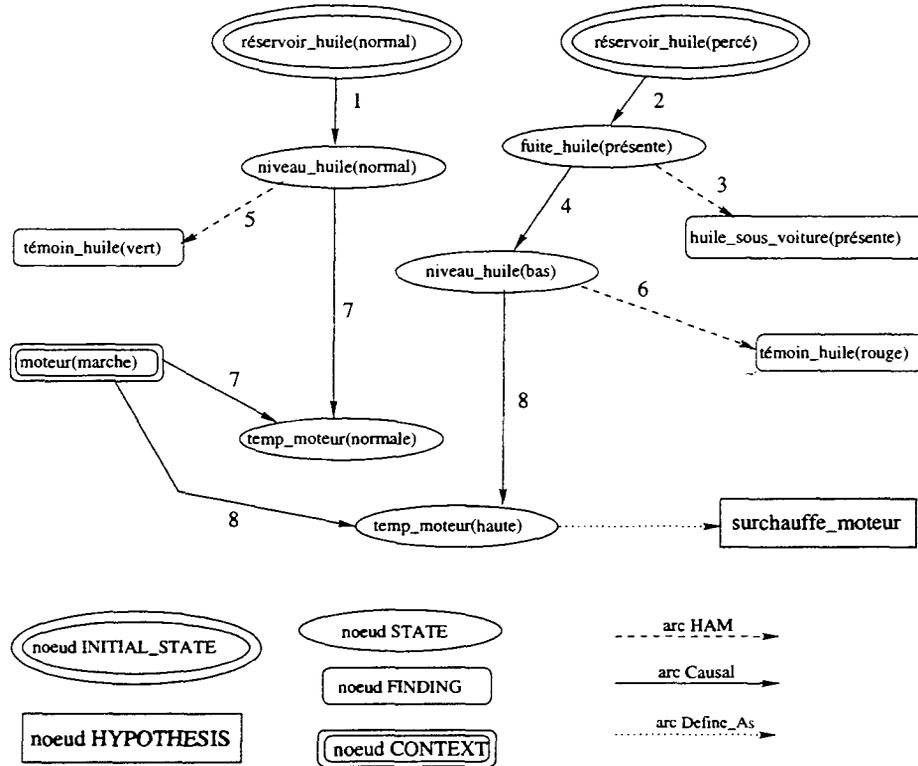


FIG. 2.3 – Graphe causal associé au moteur

Prenons le cas où, par exemple, on a comme contexte *moteur(marche)* et comme observation *huile – sous – voiture(présente)*. On a donc $\Psi^+ = \{huile - sous - voiture(présente)\}$ et $\Psi^- = \{\neg huile - sous - voiture(absente)\}$. La seule explication possible est *reservoir – huile(percé)* et le diagnostic associé est (via $def(H)$) *surchauffe – moteur*. Ici Ψ^+ est uniquement composé d'observations « anormales » et on retrouve le diagnostic à la « Poole » c'est à dire que toutes les observations « anormales » sont expliquées.

Prenons maintenant le cas où on a comme observations *moteur(marche)* et *huile – sous – voiture(absente)* alors l'explication sera *reservoir – huile(normal)*⁶ parce que l'on fait l'hypothèse que le modèle est complet⁷. Ce qui correspondrait bien au résultat d'un diagnostic reposant sur la consistance.

6. En effet $huile - sous - voiture(absente) \equiv \neg huile - sous - voiture(présente) \Rightarrow \neg fuite - huile(présente) \Rightarrow \neg reservoir - huile(percé) \equiv reservoir - huile(normal)$.

7. En fait, avec le modèle utilisé, on ne trouve pas de diagnostic car il n'existe pas de noeud hypothèse associé au noeud *reservoir – huile(normal)*.

2.5 DIAPO : une application du diagnostic basé sur l'abduction

Comme elle est présentée dans [Console et Torasso(1992)], la description d'un modèle de pannes en calcul propositionnel est peu adaptée à la surveillance en continu d'un système. En effet, elle limite les possibilités d'expression de la symptomatique. En particulier, il est impossible de gérer plusieurs instances d'un même symptôme à des instants différents, il n'y a pas non plus de notions de fonction ce qui limite les possibilités d'expression de relations de dépendance entre éléments constitutifs des observations. Pour remédier à cela, dans [Porcheron et Ricard(1996), Porcheron et Ricard(1997)] M. Porcheron et B. Ricard proposent une extension de la description des modèles de pannes à partir de l'utilisation de formules quantifiées d'un langage du premier ordre de la forme $\exists x_1, \dots, x_n \in E, P(x_1, \dots, x_n)$ où P correspond à un symptôme représenté par un ensemble de formules atomiques liées par des connecteurs logiques. Un symptôme est décrit par une formule du type: $\exists x_1, \dots, x_n \in E, Type(x_1, T_1) \wedge \dots \wedge Type(x_n, T_n) \wedge Parameter(x_1, P_1) \wedge \dots \wedge Parameter(x_n, P_n) \wedge Prop(x_1, \dots, x_n)$. Les x_i représentent des événements qui sont d'un certain type ($Type(x_i, step)$) affectant la mesure ($Parameter(x_i, P)$) d'une variable observée et vérifiant une propriété ($Prop(x_i)$). Une observation sera un symptôme si elle permet d'attribuer la valeur vraie à la formule logique associée à ce symptôme.

Cette description des symptômes peut conduire à des explications insatisfaisantes. En effet, on recherche ici une explication pour l'ensemble des événements observés. Ainsi, si deux symptômes S_1 et S_2 partagent le même domaine d'interprétation, on peut être conduit à expliquer simultanément S_1 et S_2 même si l'on a une unique observation O qui satisfait à la fois S_1 et S_2 . Si C_1 et C_2 (voir exemple 1) sont les explications respectivement de S_1 et S_2 alors $C_1 \wedge C_2$ sera bien l'explication de $S_1 \wedge S_2$ mais pas forcément celle recherchée qui est celle de O . En effet, si S_1 et S_2 portent sur deux variables différentes alors on cherche réellement l'explication de ces deux événements. Dans ce cas, la justification $S_1 \wedge S_2 \rightarrow O$ utilisée classiquement en abduction, signifiant qu'une explication de $S_1 \wedge S_2$ est une explication de O , est valide. Par contre, si S_1 et S_2 portent sur la même variable on cherche alors une explication à un seul événement portant sur cette variable, dans ce cas on doit utiliser la justification $S_1 \vee S_2 \rightarrow O$, qui signifiera que O peut être expliquée par une explication de S_1 ou de S_2 . Dans notre exemple, l'explication de O devient $C_1 \vee C_2$.

$$C_1 \rightarrow S_1$$

$$C_2 \rightarrow S_2$$

Exemple 1

Dans [Porcheron et Ricard(1996)], M. Porcheron et B. Ricard proposent donc de construire un modèle d'explication des événements dans lequel ils écrivent ces

disjonctions explicitement sous la forme $S \rightarrow e$ pour chaque symptôme S satisfait par un événement e . Reprenons l'exemple précédent : si l'on rajoute les clauses $S_1 \rightarrow e$ et $S_2 \rightarrow e$ et si S_1 et S_2 sont satisfaits par e alors l'évènement e a pour explication $C_1 \vee C_2$ ce qui correspond au résultat souhaité ; l'utilisation du modèle des événements semble avoir l'effet désiré. Supposons maintenant que S_2 soit plus précis que S_1 (par exemple $S_2 \equiv (40 \leq \text{temperature} < 45)$ est plus précis que $S_1 \equiv (\text{temperature} > 39)$, si $O \equiv (\text{temperature} = 40)$ ils seront tous les deux satisfaits). Dans ce cas, toute observation satisfaisant S_2 , satisfait aussi S_1 , on peut écrire $S_2 \rightarrow S_1$. Ceci nous donne donc deux explications, l'une ne contenant que C_2 puisque C_2 permet d'expliquer $S_1 \wedge S_2$ et l'autre contenant $C_1 \wedge C_2$. Néanmoins, dans DIAPO, seul les diagnostics abductifs minimaux sont conservés. Dans [Cordier(1998)] de nouvelles définitions de l'explication sont proposées qui, en introduisant une notion de précision entre les observations et les symptômes, permettent d'obtenir les mêmes résultats. Ces nouvelles définitions permettent d'éviter la construction du modèle des événements tout en permettant la prise en compte directe de l'aspect temporel dans les modèles abductifs.

2.6 Conclusions

Le diagnostic abductif, malgré la qualité des explications qu'il fournit, souffre de plusieurs problèmes. Il semble en effet difficile de pouvoir décrire toutes les pannes, certaines, plus rares ou n'ayant jamais eu lieu peuvent ne pas être connues. Les approches basées sur l'abduction souffrent donc d'un problème d'incomplétude. Dans la pratique, pour des systèmes pour lesquels le retour d'expérience est important, les résultats obtenus sont suffisants et certaines applications ont pu être conduites jusqu'à la phase d'industrialisation [Porcheron et Ricard(1997)].

Les modèles de pannes, utilisés en abduction, contiennent des descriptions des pannes du système, il est donc difficile de décrire un fonctionnement normal dans cette approche abductive. Ainsi, bien que Console et al. aient montré que les deux approches sont logiquement équivalentes, dans la pratique on voit que les approches par modèle de pannes ne permettent pas d'expliquer les observations normales. Les approches par consistance utilisent, elles, des modèles du comportement des composants. Une observation normale peut donc être expliquée par son label. Certaines des données liées aux mauvais fonctionnements des systèmes permettent de décrire des comportements anormaux des composants. Ces modèles du comportement des composants peuvent être utilisés de la même façon que les modèles du fonctionnement normal avec une méthode dérivant de celle proposée par De Kleer (voir section 1). Une observation anormale sera expliquée par son label, la différence viendra du mode de comportement assigné aux composants du label qui pourra être un mode de fonctionnement anormal.

3

Diagnostics consistants et mauvais fonctionnements

Comme nous l'avons dit au paragraphe 1.5, une méthode pour départager les candidats est d'introduire des modèles du mauvais fonctionnement des composants. En effet si l'on possède de tels modèles on peut expliquer des observations issues du mauvais fonctionnement. Ainsi on ne considèrera plus uniquement deux modes de comportement pour chaque composant AB et $\neg AB$ mais n modes de comportement. Le premier de ces modes est bien évidemment celui correspondant au fonctionnement normal du composant : $OK(C)$, mais il y aura ensuite autant de modes de fonctionnement que de comportements anormaux connus.

Nous avons ici une approche permettant la prise en compte de différents modèles d'un système au niveau comportemental. Ces modèles peuvent décrire les différents comportements du système suivant les conditions dans lesquelles il se trouve ou en fonction des différents domaines physiques que l'on veut représenter. Néanmoins, tous ces modèles restent liés à l'approche structure et comportement du raisonnement à base de modèles.

On peut donc maintenant définir un état comme l'assignation d'un mode de comportement (mod_i) à chaque composant ($C_j \in COMPS$). Ainsi un état sera représenté par :

$$\Delta = \{\wedge_{j=1,n} mod_i(C_j)\}, n \text{ étant le nombre de composants}$$

Δ sera un diagnostic pour $(SD, COMPS, OBS)$ ssi Δ est consistant avec $SD \cup OBS$.

Néanmoins cet ajout de connaissances n'a pas réduit la tâche de recherche de diagnostic, bien au contraire puisqu'il a augmenté le volume de données à traiter. Il en facilite seulement l'interprétation. En fait, l'introduction de préférences entre les modes de comportement d'un composant donné permettra d'améliorer le traitement.

Ces préférences entre les modes de comportement peuvent correspondre à des probabilités a priori, des probabilités conditionnelles [De Kleer et Williams(1989)], des taux de défaillances, des criticités etc... Ces connaissances sont typiquement des connaissances d'expert. Ces préférences permettent à leur tour de classer les diagnostics suivant un ordre partiel. Il ne restera plus qu'à utiliser des stratégies pour calculer les diagnostics préférés en premier.

L'ajout de connaissances de mauvais fonctionnements permet de faire apparaître de nouvelles méthodes de représentation des diagnostics.

3.1 Représentation : les diagnostics noyaux

Pour représenter efficacement les diagnostics, on utilise la notion de diagnostics noyaux qui dérive de celle de diagnostic partiel (voir [De Kleer et al.(1992)]). Dans le cas où les modes possibles pour un composant sont $\neg AB$ ou AB , un diagnostic partiel sera une assignation partielle de modes telle que :

$$\Delta_p = \{\wedge_{j \in J} AB(C_j)\}, J \subseteq \{1, \dots, n\}$$

et $SD \cup OBS \cup \Delta_p \cup \Delta'$ est consistant.

quel que soit Δ' une AB-conjonction arbitraire de modes pour tous les composants qui ne sont pas dans J.

Tout sur ensemble d'un diagnostic partiel est un diagnostic consistant.

Les diagnostics partiels les plus intéressants sont donc les plus « petits » (ceux où le nombre de composants ayant une assignation est minimal), ce sont les diagnostics noyaux, ils sont suffisants pour représenter toute la famille.

Un diagnostic noyau Δ_k est un diagnostic partiel tel qu'aucun sous-ensemble de Δ_k ne soit aussi un diagnostic partiel. Les diagnostics noyaux ont comme propriété fondamentale qu'ils représentent tous les diagnostics : Δ est un diagnostic si et seulement si Δ contient un diagnostic noyau.

Un moyen de calculer les diagnostics noyaux est d'utiliser l'algorithme de Reiter [Reiter(1987), Greiner et al.(1989)] permettant le calcul des hitting-sets minimaux à partir des conflits minimaux positifs. Ces ensembles hitting correspondent aux diagnostics noyaux dans le cas où tous les conflits sont positifs. Néanmoins, ici aussi il n'y a pas de possibilité de départager deux diagnostics noyaux. Aussi dans [Dressler et Struss(1994)] Struss et Dressler proposent d'introduire un ordre entre les modes de fonctionnements des composants qui permettra d'induire un ordre entre les diagnostics.

3.2 Préférences et diagnostics préférés

Dans [Dressler et al.(1993), Dressler et Struss(1994)], les auteurs supposent que l'on peut définir un ordre partiel entre les modes de fonctionnement de chaque

composant, un ordre de préférences (taux de défaillances, retour d'expérience, issu d'une AMDE, etc...). Cet ordre résulte d'une connaissance extérieure au comportement des composants, il peut être représenté par le treillis de la figure 3.1. Pour chaque composant le mode OK est le mode préféré, le mode inconnu est le dernier dans l'ordre de préférence :

$$\begin{aligned} \forall m_j(C_i) \in \text{modes}(C_i) \setminus \{OK(C_i)\} : OK(C_i) > m_j(C_i)^8 \\ \forall m_j(C_i) \in \text{modes}(C_i) \setminus \{Inconnu(C_i)\} : m_j(C_i) > Inconnu(C_i) \end{aligned}$$

Pour représenter l'ordre de préférences entre les modes, Dressler est amené à utiliser des défauts. Un mode m_i sera supposé être le mode de comportement préféré d'un composant C si, tous les modes qui lui sont préférés ont été réfutés et s'il est consistant de supposer $m_i(C)$. Ceci est codé grâce à la justification non-monotone :

$$\frac{\neg OK(C), \neg m_1(C), \dots, \neg m_{i-1}(C) : M(m_i(C))}{m_i(C)}$$

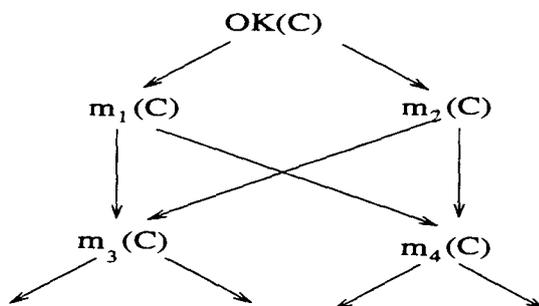


FIG. 3.1 - Treillis des préférences entre les modes

3.2.1 Diagnostics préférés

Dans un candidat un mode et un seul est assigné à chaque composant du système.

L'ordre de préférence entre les modes induit un ordre de préférence entre les candidats. Un candidat Π sera dit strictement préféré s'il n'existe pas d'autre candidat Π' tel que au moins un des composants soit, dans Π' , dans un mode

8. $m_1 < m_2$ signifie que m_2 est strictement préféré à m_1 ; $m_1 \leq m_2$ signifie que m_2 est préféré à m_1 ou est qu'il du même niveau de préférences

strictement préféré à celui qu'il a dans Π , tous les autres composants étant dans Π' , dans un mode préféré ou égal à celui qu'ils ont dans Π .

Pour $\Pi = \{m(C_i)\}$ et $\Pi' = \{m'(C_i)\}$:

$$\Pi \geq \Pi' \Leftrightarrow \forall i m(C_i) \geq m'(C_i)$$

A partir de la définition d'un candidat préféré on va pouvoir construire la définition d'un diagnostic préféré. Un candidat Π est un diagnostic ssi: $SD \cup OBS \cup \Pi$ est consistant. Π est un diagnostic préféré s'il n'existe pas d'autre diagnostic Π' qui lui soit strictement préféré.

$$\forall \Pi' : \Pi' \geq \Pi \Rightarrow \Pi' = \Pi \text{ (}\Pi \text{ et } \Pi' \text{ sont également « préférés »)}$$

Comme dans l'approche de base, contenant uniquement des AB-littéraux, on retrouve des diagnostics respectant la minimalité pour l'inclusion des ensemble de composants défectueux (puisque le mode le « plus » préféré est le mode OK). De plus, on assigne le mode de défaillances « préféré » aux composants défectueux. Ce mode préféré est le premier dans l'ordre de préférences (pour un composant donné) ne créant plus d'inconsistance. Pour pouvoir toujours assigner un mode de défaillances à tous les composants on a un mode inconnu qui, n'ayant pas de modèle, ne peut créer d'inconsistance. On peut voir que la résolution du problème est séparée en deux :

- Tout d'abord *localisation* des composants défectueux : lorsque l'on ne prend en compte que le mode de fonctionnement *OK* pour chaque composant.
 - Puis *diagnostic* à proprement parler lorsque l'on va chercher à affecter un mode de comportement, en suivant l'ordre des préférences, à chacun des composants détectés comme n'étant pas dans le mode *OK*. La détermination de ce mode permettra d'expliquer le comportement global du système.
- Pour calculer les diagnostics préférés deux méthodes ont été proposées jusqu'à maintenant. L'une est basée sur l'utilisation d'un ATMS particulier auquel ont été ajoutées des fonctionnalités qui lui permettent de gérer la non monotonie du raisonnement par défaut⁹. Pour calculer les diagnostic préférés Dressler utilise un NM-ATMS c.à.d. un ATMS dans lequel peuvent être codés des défauts [Dressler(1990)]. Grâce à ce NM-ATMS Dressler peut calculer toutes les extensions consistances d'une théorie avec défauts. Comme les défauts utilisés pour construire ces extensions le sont par ordre de préférences ces extensions correspondent à des diagnostics préférés. Dans [Dressler et Struss(1994)] cette stratégie pour calculer tous les diagnostics préférés en utilisant un NM-ATMS est présentée.

9. Ce type de raisonnement est défini formellement dans [Reiter(1980)]

L'autre est basée sur l'utilisation d'un ATMS focalisable [Dumas et al.(1996)]. En effet cet ATMS permet le calcul rapide des impliqués premiers de SD ayant des formes particulières, lesquelles formes sont définies dans le focus. Ce focus est composé d'un ensemble d'hypothèses positives et négatives (littéraux typés) et d'un sous ensemble de non-hypothèses (littéraux non typés). Les impliqués premiers contenant uniquement des sous ensembles de ces trois ensembles de données sont ceux recherchés (G-nogoods contenant des hypothèses précises, label de certaines données particulières). Grâce à cet ATMS une stratégie présentée dans [Yacoub et al.(1996)] permet de calculer les diagnostics préférés. Cette stratégie peut être mise en place grâce à une réécriture des préférences. L'idée est de construire des candidats qui servent ensuite de focus, ainsi on vérifie plus rapidement la consistance de ces candidats. En cas d'inconsistances, le mode de chacun des composants contenus dans le G-nogood, est tour à tour remplacé par son successeur dans l'ordre de préférences. Au final, les candidats consistants construits par cette méthode sont des diagnostics préférés.

3.3 Gestion des modèles

Une utilisation en parallèle de ces modèles conduit à augmenter encore la combinatoire du calcul des diagnostics. Dans [Struss(1992)], Struss propose une description comportementale des composants d'un système suivant différents modèles, chacun de ces modèles étant défini à partir des variables locales qu'il prend en compte, du domaine de variation de ces variables et du mode de comportement du composant. Pour un composant donné, deux modèles peuvent différer par les variables qu'ils mettent en oeuvre, par le domaine qu'ils peuvent atteindre ou par le mode de comportement qu'ils représentent. A partir de cette description, Struss peut donc ensuite définir plusieurs relations entre les modèles :

- *abstraction*: lorsque les modèles diffèrent par leurs variables ou leur domaine.
- *simplification*: lorsque les modèles diffèrent par leur mode de comportement.
- *vue*: M sera une vue de M' si $M \rightarrow M'$, M' représente l'un des aspects du comportement décrit dans M .
- *raffinement*: un ensemble de modèles $\{M', \dots, M^n\}$ sera un raffinement du modèle M si $M' \wedge \dots \wedge M^n \rightarrow M$, on peut ainsi décrire séparément les différents comportements (M', \dots, M^n) pris en compte par un modèle M .
- *choix*: un ensemble de modèles $\{M', \dots, M^n\}$ sera un choix du modèle M si $M' \vee \dots \vee M^n \rightarrow M$, on peut ainsi décrire les différents modes de comportement (M', \dots, M^n) couverts par un modèle M .

Ces différents liens permettent de construire un graphe dans lequel les noeuds correspondent aux modèles.

Lors de la recherche de diagnostics, l'arborescence permet de tester les modèles permettant de rétablir la consistance en utilisant en priorité les feuilles qui correspondent aux vues et les simplifications. Quand une hypothèse de modélisation est remise en cause, on remonte dans le graphe en choisissant un modèle plus fin ou en faisant un autre choix de modélisation.

Cette approche permet avant tout de contrôler la combinatoire en n'utilisant les modèles que lorsque cela devient nécessaire, mais elle ne prend en compte que l'aspect comportemental du système.

3.4 Conclusions

Quelle que soit la méthode choisie, le diagnostic à base de modèles (au sens large) bute sur plusieurs problèmes. Si, sur un système complexe, on veut prendre en compte toutes les observations avec un modèle complet contenant la structure du système et le comportement des composants, on se heurte à la complexité combinatoire des calculs (avec les problèmes de coût qui en découlent) et du nombre de solutions. Il semble donc évident qu'il faut pouvoir ajouter des informations de « plus haut niveau » et gérer l'ensemble des connaissances à partir d'une structure représentant le système entier. On pourra ainsi faire intervenir le maximum de connaissances pour restreindre l'espace de recherche, c.à.d. le volume de justifications sur lequel se fera le raisonnement final. Cette structure devrait permettre de prendre en compte les informations de différents types, de faire coopérer les différents modèles disponibles suivant les points de vues, les niveaux d'agrégation, etc... Il semble en particulier intéressant d'utiliser les connaissances fonctionnelles pour guider la résolution. On ne s'intéresserait ainsi qu'à des sous-systèmes ne réalisant pas leur fonction, la recherche de diagnostic serait focalisée.

4

Les approches fonctionnelles

Les approches fonctionnelles considèrent qu'il n'est pas forcément intéressant de décrire le fonctionnement d'un système à partir des « principes premiers » pour effectuer un diagnostic. Cet argumentaire repose principalement sur l'observation que des experts effectuant une recherche de diagnostic ont plutôt tendance à raisonner en terme des fonctions réalisées ou non pour déterminer quelles parties d'un système peuvent être défaillantes. Nous allons voir, dans ce chapitre, plusieurs approches s'appuyant sur des modélisations fonctionnelles pour effectuer un diagnostic. Ces approches utilisent une modélisation verticale du système qui est décrit suivant les points de vue téléologique et fonctionnel.

4.1 L'approche de Sticklen

Dans la modélisation fonctionnelle proposée dans [Hawkins et al.(1994)] et [Sticklen et Chandrasekaran(1989)], on considère que tout système physique est conçu dans un but précis. Ce but est réalisé grâce à l'utilisation de différent sous-systèmes ayant eux-mêmes des objectifs fonctionnels définis. Ainsi, le système fonctionne normalement si son but est réalisé ce qui implique que chacun de ses sous-systèmes réalise son (ses) objectif(s).

Dans ce cadre, le modèle du système est constitué de trois parties. La première concerne la description de la structure du système (on décompose le système en sous-systèmes). La seconde concerne la description des fonctions (on spécifie les fonctions de chacun des sous-systèmes). Enfin la troisième correspond à la spécification des comportements permettant la réalisation de chacune de ces fonctions : on précise la précondition, qui caractérisera les conditions d'occurrence de la fonction, la postcondition, qui décrira les effets obtenus une fois la fonction réalisée, et l'implémentation de la fonction qui représentera en terme de comportement comment la fonction est réalisée (voir figure 4.1).

La précondition et la postcondition se rapportent aux valeurs des variables du système. La description du comportement est réalisée par un graphe orienté

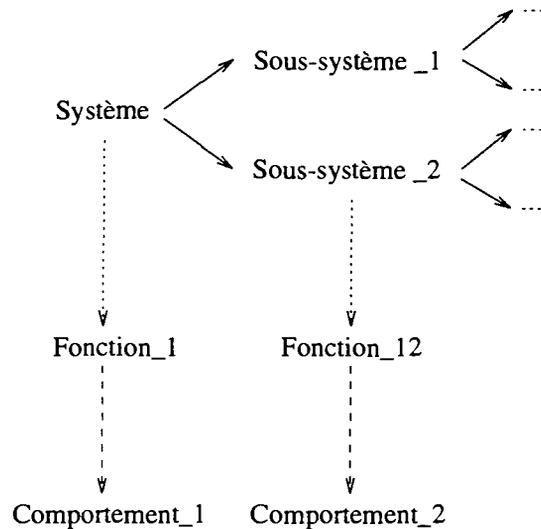


FIG. 4.1 – Organisation de l'approche de [Sticklen et Chandrasekaran(1989)]

reliant les différents états partiels du système et dont les arcs sont étiquetés par des fonctions ou des lois physiques exprimant la transition entre deux états. Le comportement d'une fonction représente un fragment du réseau causal qui code le comportement global du système.

Cette méthode de représentation a été appliquée aux problèmes de diagnostic. Pour cela on construit deux types de relations entre fonctions et variables :

- R_{evokes} : correspond à un lien entre une variable et les fonctions qui l'influencent (directement ou indirectement).
- $R_{accounts-for}$: correspond à un lien entre une fonction et les variables qu'elle influence (directement ou indirectement).

A partir de l'ensemble des variables ayant une valeur anormale on obtient, grâce aux R_{evokes} associés à ces variables, un ensemble de fonctions suspectes. On construit ensuite les combinaisons de une à n fonctions (n correspond au nombre maximal de pannes autorisées simultanément) qui seront les candidats. A partir des liens $R_{accounts-for}$ décrits pour les fonctions contenues dans le candidat on peut générer l'ensemble des variables influencées par ce candidat. Si l'ensemble des variables ayant une valeur anormale est inclus dans cet ensemble de variables influencées alors le candidat est considéré comme un diagnostic potentiel.

L'intérêt de cette approche est d'utiliser une précompilation des connaissances nécessaires au diagnostic ; en effet, les ensembles R_{evokes} et $R_{accounts-for}$ peuvent être construits hors ligne. Cette méthode est très proche des méthodes basées sur le respect de la consistance. On peut noter de plus que la notion de R_{evokes} , pour une variable donnée, est très proche de la notion de label et que la notion

de *R_{accounts-for}* correspondrait à la notion de « signature de pannes » si l'on ne tient compte que des pannes uniques (voir [Cassar et al.(1994)]).

4.2 L'approche de Steels

La représentation fonctionnelle proposée par [Steels(1989)] est composée de deux parties: dans la première il décrit le fonctionnement normal du système, dans la seconde il décrit ses dysfonctionnements (voir figure 4.2).

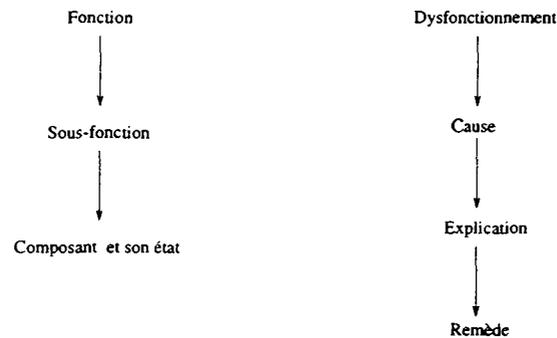


FIG. 4.2 – La description fonctionnelle de [Steels(1989)]

Le fonctionnement normal est décrit en terme de *fonctions* qui décrivent la tâche à effectuer, de *composants* qui permettent la réalisation des fonctions et d'*état du composant* pour spécifier dans quel état doit se trouver un composant pour réaliser une fonction.

Une vanne serait donc décrite de la façon suivante :

fonction	conduit d'un flux hydraulique
composant	vanne
état	vanne ouverte

La modélisation des dysfonctionnements est symétrique de celle du fonctionnement normal. Pour chaque fonction décrite on définit un ou plusieurs dysfonctionnements. A chacun de ces dysfonctionnements est associé un ensemble de causes, d'explications pour ces causes et de remèdes. Dans le cas de notre vanne cela donne :

dysfonctionnement	pas de conduit du flux hydraulique
cause	la vanne est fermée
explication	un objet a fermé la vanne
remède	...

Il faut noter que les fonctions normales et anormales du système sont entière-

ment définies par les experts, [Steels(1989)] néglige la façon dont les composants réalisent les fonctions du système.

Cette modélisation fonctionnelle a été utilisée pour résoudre un problème de diagnostic. L'idée est principalement de construire des liens entre les dysfonctionnements et les fonctions qu'ils influencent. Un dysfonctionnement au sens propre du terme, i.e. une fonction non remplie, pourra donc être expliqué par les défaillances associées. Par exemple, la fonction stockage de fuel dans un réservoir a comme dysfonctionnement fuel non stocké, ce qui peut être expliqué par le fait que le fuel a été consommé ou parce qu'il y a une fuite dans le réservoir.

Cette approche est finalement assez proche d'un graphe causal classique ; la différence est qu'ici, le symptôme est associé à la perte de la fonction puis à sa cause. De plus, on peut noter l'ajout d'une notion d'explication et de remède. A la différence d'un modèle de pannes classique on peut noter que cette méthode permet de détecter tous les dysfonctionnements qui affectent le fonctionnement attendu : même si l'explication n'est pas connue, la détection est effectuée.

4.3 L'approche de Larsson

Larsson [Larsson(1996)] propose des méthodes de diagnostic basées sur une représentation fonctionnelle et téléologique appelée "Multilevel Flow Models" (MFM). Dans ce cadre, un système est décrit en fonction de ses buts, des fonctions nécessaires pour les atteindre et des composants permettant la réalisation des fonctions.

Les relations entre ces trois descriptions sont représentées dans la figure 4.3, un but peut être atteint en utilisant plusieurs fonctions, et une fonction est réalisée par un ou plusieurs composants.

Les buts peuvent être de trois types : but de production, but de sécurité ou but économique.

Les fonctions peuvent être de trois types : Les fonctions de transfert de flux (masse ou énergie) qui comprennent des sources, des transports, des barrières, des stockages, des bilans et des puits. Les fonctions de flux d'informations qui sont des observateurs (capteurs), des acteurs (moteur, valves) et des éléments de prise de décisions (boucle de contrôle). Des fonctions organisationnelles qui sont soit des réseaux (groupes de fonctions de flux), soit des managers (boucle de commande).

Cette approche propose un langage graphique pour représenter les différents buts, fonctions et composants. Néanmoins, elle ne propose pas de méthodes permettant de générer de telles fonctions, toute la construction du modèle est faite par un expert. Le comportement des composants n'est pas décrit. [Larsson(1996)] ne s'intéresse pas à la façon dont une fonction est réalisée mais aux composants nécessaires à sa réalisation.

La tâche de diagnostic est séparée en deux parties, la première correspondant

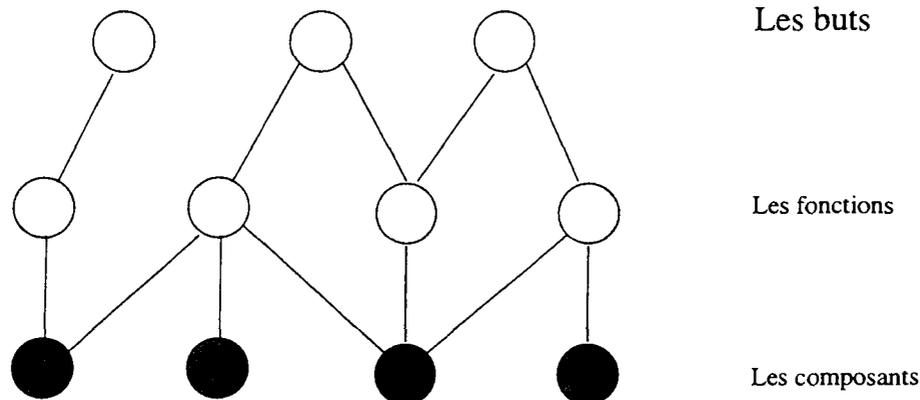


FIG. 4.3 – *Les relations entre les buts, les fonctions et les composants.*

à une analyse des alarmes, la seconde à la recherche de diagnostic à proprement parler.

Pour effectuer une recherche de diagnostic, Larsson s'intéresse aux buts non atteints et aux alarmes obtenues sur le système. La phase d'analyse des alarmes consiste à rechercher les alarmes primaires : parmi l'ensemble des alarmes, certaines ne sont que des conséquences engendrées par la structure du système, par exemple un niveau d'eau trop faible dans un réservoir implique que le débit dans le conduit suivant sera trop faible. Cette étape permet de séparer les observations, symptômes de la défaillance, de celles qui ne sont que des conséquences. Ensuite, pour chaque but non réalisé, on vérifie les différentes fonctions nécessaires à sa réalisation à partir des mesures directes ou en posant des questions à l'opérateur. Cette étape permet de localiser les éléments défectueux. Enfin, pour chaque élément défectueux on propose une explication.

4.4 Conclusions

Les approches du diagnostic basé sur des connaissances fonctionnelles ont comme première qualité de ne proposer que des diagnostics ayant un sens physique puisque liés uniquement aux fonctions non réalisées. Plus précisément, chaque fonction non réalisée permet d'obtenir un conflit basé sur le fonctionnement des composants dans la structure du système. Néanmoins, ces approches manquent de modélisations physiques du comportement des composants qui permettraient de valider les hypothèses de défaillances. Enfin, ces approches reposent sur l'hypothèse de non-compensation des pannes. En effet, on suppose toujours implicitement que si un but/fonction est réalisé c'est que tous les composants qui participent à sa réalisation sont corrects ; deux pannes ne peuvent pas se combiner pour produire un fonctionnement normal. Dans notre procédure de diagnostic nous serons nous aussi amené à utiliser cette hypothèse.

5

L'approche multi-modèles

L'approche multi-modèles a été développée dans [Chittaro et al.(1993)]. Elle est liée à l'utilisation de différents types de connaissances pour modéliser le comportement d'un système. Ces connaissances sont découpées en deux grandes classes: les *connaissances fondamentales* et les *connaissances d'interprétation*. Les différents modèles sont organisés dans une architecture comprenant plusieurs niveaux d'abstraction (cf figure 5.1).

Les *connaissances fondamentales* décrivent les différents composants du système, leurs relations et leurs comportements. A partir des relations entre les composants on construit le **modèle structurel**; à partir des comportements des composants on construit le **modèle comportemental**.

Le modèle comportemental est basé sur le concept de variables généralisées [Rosenberg et Karnopp(1983)]. On distingue les variables d'effort e (tension électrique, pression), de flux f (courant électrique, débit volumique), de déplacement q (charge électrique, volume) et d'impulsion p (flux magnétique, impulsion pression).

Les *connaissances d'interprétation* permettent de donner des interprétations subjectives des connaissances fondamentales en terme de fonctions et de buts pour le système. Ces connaissances sont découpées en connaissances fonctionnelles qui permettent de décrire comment le comportement individuel des composants contribue à la réalisation des fonctions prévues par le concepteur du système (**modèles fonctionnels**) et en connaissances téléologiques qui spécifient les buts assignés au système sans a priori sur la façon dont ils seront réalisés (**modèle téléologique**). Les connaissances fonctionnelles sont représentées par trois modèles différents ayant chacun un niveau d'abstraction particulier. La structure de modélisation est verticale et prend en compte le comportement des composants du système.

Le **modèle des rôles fonctionnels** est construit à partir des comportements attribués à chaque composant (ontologie à base d'objets). Plusieurs comportements types ont été définis: le rôle fonctionnel Générateur, le rôle fonctionnel Conduit, le rôle fonctionnel Réservoir et le rôle fonctionnel Barrière.

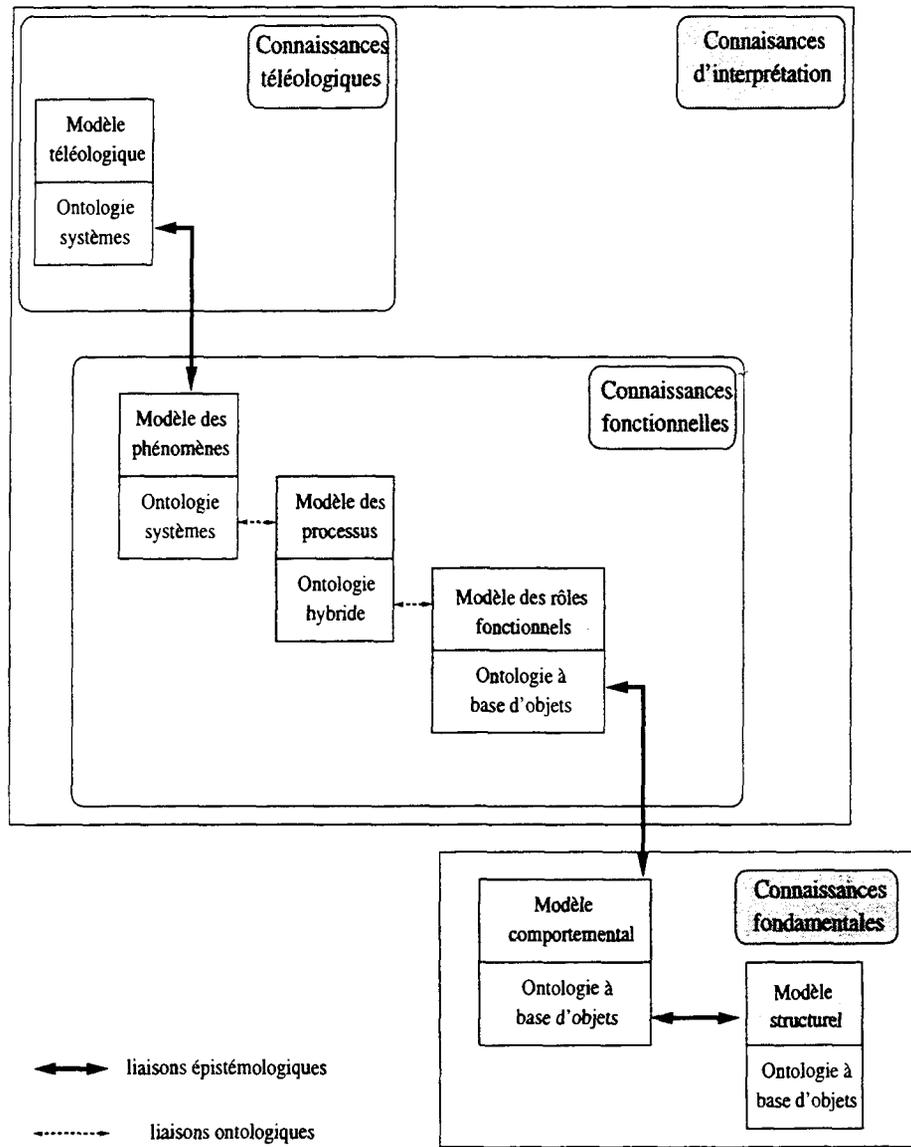


FIG. 5.1 – L'architecture Multi-Modèles

Les rôles fonctionnels peuvent être reliés grâce à deux types de liaisons : des liaisons de *dépendance mutuelle* et des liaisons d'*influence*. A partir de ce modèle des rôles fonctionnels on peut construire un **modèle des processus** en rassemblant les rôles fonctionnels de certains composants (ayant un lien de *dépendance mutuelle*) suivant un ordre précis définissant une cofonction. Un processus est représenté par un quadruplet $\langle \text{cofonction, précondition, effet, post-effet} \rangle$. Plusieurs processus type ont été identifiés par Chittaro et al.

A partir du modèle des processus ainsi construit on crée un **modèle des phénomènes**. Dans un phénomène, les processus sont associés de façon à réaliser un phénomène. Dans cette succession de modèles, les informations et les modèles (rôles fonctionnels, processus,...) sont définis suivant le domaine physique auxquels ils appartiennent (mécanique, électrique, etc...). Ces phénomènes seront reliés aux buts du **modèle téléologique**.

Dans la deuxième partie nous présenterons plus en détail les différents modèles de cette approche.

5.1 L'approche multi-modèles et le diagnostic

L'approche multi-modèles apparaît donc, a priori, comme un outil synthétique permettant de représenter toutes les connaissances liées au bon fonctionnement d'un système. Ces qualités en font donc un outil cohérent pour le diagnostic et l'aide à la conduite. C'est d'ailleurs dans ce but que la démarche a été développée par Chittaro et al.

Chittaro et al. proposent plusieurs méthodes pour exploiter l'approche multi-modèles dans le cadre du diagnostic. Dans [Chittaro et al.(1993)], ils décrivent les points intéressants de leur approche dans ce cadre.

1. *Discrimination des « comportements » de l'opérateur* : L'utilisation du modèle téléologique détermine les fautes dues à un usage impropre du système : une combinaison d'actions différentes de celles nécessaires pour atteindre l'état souhaité amène à un état différent de celui attendu. Cet état sera cohérent par rapport au comportement global du système mais incohérent par rapport à celui recherché par l'opérateur.
2. *Focalisation de la tâche de diagnostic* : Les liens entre les différents niveaux dus aux connaissances d'interprétation permettent de focaliser la recherche des conflits sur les parties des modèles structurels et comportementaux liés à des buts du modèle téléologique qui n'auront pas été atteints.
3. *Suppression des diagnostics non physiques* : Les conflits sont construits à partir des cofonctions des processus. Ces processus correspondent à des comportements identifiés du système (physiquement corrects). Donc les conflits seront eux aussi liés à des dysfonctionnements possibles d'un point de vue physique.

4. *Représentation des symptômes et des fautes aux différents niveaux d'abstraction*: Une variable représentant un flux ou un effort garde la même sémantique dans toute la modélisation.

5.2 Diagnostic grâce aux variables d'effort et de flux

Dans [Chittaro(1995)], Chittaro propose d'utiliser l'approche multi-modèles pour effectuer du diagnostic fonctionnel en utilisant les variables d'effort et de flux. Pour cela il va caractériser les rôles fonctionnels en terme d'effort et de flux. Plus précisément chaque rôle fonctionnel r sera caractérisé grâce aux valeurs des variables de flux ($flux_r$) et d'effort ($effort_r$) qui lui sont associées.

1. Le rôle fonctionnel r est dit franchi $\iff flux_r \neq 0$
2. Le rôle fonctionnel r est dit non-franchi $\iff flux_r = 0$
3. Le rôle fonctionnel r est dit atteint $\iff effort_r \neq 0$
4. Le rôle fonctionnel r est dit non-atteint $\iff effort_r = 0$

En terme de flux, un rôle fonctionnel sera franchi (non-franchi) si une substance est (n'est pas) en train de le traverser. En terme d'effort, un rôle fonctionnel sera atteint (non-atteint) si la force responsable du flux a (n'a pas) atteint le rôle. Prenons l'exemple de la pompe, on considèrera que la pompe est franchie ($obs(pompe, franchi)$) si un débit est observé au travers de la pompe. On considèrera que la pompe est atteinte ($obs(pompe, atteint)$) si une pression est observée en entrée de la pompe. Une distinction est ensuite faite entre les rôles fonctionnels: les rôles fonctionnels actifs (les générateurs) sont associés à un prédicat *générateur*(X). Ceci permet de signifier que certains rôles fonctionnels sont (en bon fonctionnement) toujours atteints par un effort (générateur d'effort).

A partir des observations, en terme de flux et d'effort, et de l'ensemble des confonctions des processus, Chittaro propose de construire des « enabling sets » (ensembles exonérants) qui représentent les états corrects du système, et des « disabling sets » (ensembles accusants) qui représentent les états anormaux du système. Par comparaison de ces deux ensembles on peut ensuite représenter les conflits d'où l'on pourra tirer les diagnostics. Ces ensembles sont construits sur la base des hypothèses suivantes (dont certaines sont discutables):

En fonctionnement normal, les conduits permettent le passage de l'effort et du flux, les barrières empêchent le passage d'effort et de flux, les générateurs produisent de l'effort et, s'ils sont dans une cofonction où rien ne l'empêche, ils produisent du flux. Dans le cas d'un fonctionnement anormal les conduits empêchent le passage d'effort et de flux, les barrières permettent le passage de l'effort

et du flux, les générateurs ne produisent ni effort ni flux et se conduisent comme des barrières normales. Ici les générateurs sont considérés aussi bien comme des générateurs d'effort que de flux. On voit bien que Chittaro fait intervenir une représentation du mauvais fonctionnement du système qui est partielle, car elle ne prend pas en compte tous les types de rôles fonctionnels possibles, et partielle, car elle préjuge du dysfonctionnement des éléments en appliquant un dysfonctionnement type.

Techniquement, la construction des « enabling sets » est basée sur les postulats suivants (axiomes E1, E2, E3 et E4 dans [Chittaro(1995)]):

1. Si l'on observe qu'un rôle fonctionnel est franchi et que l'on n'a pas d'informations négatives (non-franchi ou non-atteint) sur les autres rôles fonctionnels de la cofonction à laquelle il appartient, alors on peut conclure que tous les rôles fonctionnels de cette cofonction sont corrects : ils permettent la circulation du flux. Cof est un « enabling set ». (Axiome E1).
2. L'axiome E2 est plus délicat à interpréter. Si un rôle fonctionnel X (qui n'est pas un générateur) est observé comme étant atteint, alors les autres éléments de la cofonction contenant X peuvent être considérés comme exonérés : ils ont permis l'arrivée de l'effort jusqu'à X. Cof-{X}¹⁰ est un « enabling set ».
3. Si un générateur X est observé comme étant atteint alors le rôle fonctionnel associé à ce générateur peut être considéré comme normal. {X} est un « enabling set ». (Axiome E3)
4. Mais il peut y avoir un autre cas. En effet, un générateur peut être atteint par un effort sans être lui-même la source de cet effort. Il suffit pour cela qu'il existe un autre générateur Y dans la cofonction et qu'il n'existe pas d'observation montrant que ce générateur Y est non-atteint. Cof-{X} est un « enabling set ». (Axiome E4)

Les axiomes E3 et E4 sont disjonctifs, c.à.d. qu'ils ne peuvent pas s'appliquer simultanément.

Regardons maintenant la construction des « disabling sets ». Elle est basée sur l'utilisation des postulats suivants (axiomes D1, D2, D3 et D4 dans [Chittaro(1995)]):

1. Si X, l'un des rôles fonctionnels d'une cofonction (Cof), n'est plus traversé par un flux, alors soit un rôle fonctionnel (y compris X) ne laisse plus passer le flux, soit un générateur ne délivre plus d'effort. En l'absence d'autres informations négatives (rôles fonctionnels non-franchis ou non-atteints) alors l'un des rôles fonctionnels de Cof est anormal. Cof est un « disabling set ». (Axiome D1)

10. Cof correspond à la cofonction contenant le rôle fonctionnel X, Cof-{X} correspond au reste des éléments de cette cofonction.

2. Si, dans une cofonction (Cof), un rôle fonctionnel X n'étant pas un générateur est observé comme étant non-atteint, alors c'est que l'un des autres rôles fonctionnels de cette même cofonction est anormal : l'effort n'a pas été transporté jusqu'à X . $\text{Cof}-\{X\}$ est un « disabling set ». (Axiome D2)
3. Si un générateur X est observé comme non-atteint, alors c'est qu'il est anormal (par hypothèse). $\{X\}$ est un « disabling set ». (Axiome D3)
4. Enfin, si un générateur X (de la cofonction Cof) est observé comme étant non-atteint et que pourtant il existe un autre générateur dans cette cofonction qui ne soit pas observé comme étant non-atteint, alors il y a forcément un rôle fonctionnel anormal dans le reste de la cofonction : le flux n'atteint pas X alors qu'un autre générateur semble produire de l'effort, donc un rôle fonctionnel est anormal. $\text{Cof}-\{X\}$ est un « disabling set ». (Axiome D4)

Les axiomes D3 et D4, comme E3 et E4, sont disjonctifs, c.à.d. qu'ils ne peuvent pas s'appliquer simultanément.

Une fois les « enabling sets »¹¹ et les « disabling sets »¹² construits, on peut construire les conflits de la façon suivante :

- Tout d'abord on construit des scénarios. Pour Chittaro ces scénarios sont l'union de plusieurs « enabling sets » et sont eux mêmes des « enabling sets » ; de plus, ces scénarios doivent supporter l'ensemble des observations sur les rôles franchis ou atteints. On maintient cet ensemble de scénarios minimal pour l'inclusion.
- Puis on utilisera les informations des scénarios pour filtrer les « disabling sets ». Pour cela on se repose sur l'idée qu'un rôle fonctionnel faisant partie d'un scénario peut être éliminé de chacun des disabling sets.
- A partir des conflits ainsi construits on peut construire les diagnostics par une méthode classique, voir paragraphe 1.2.

Enfin dans [Chittaro et Ranon(1996)] les auteurs proposent d'utiliser les relations d'influences entre les rôles fonctionnels appartenant à divers domaines pour calculer les conflits. Ces relations d'influences sont de deux types : les *influences de « transduction »* et les *influences de régulation*. Dans une *influence de transduction* le rôle influencé est un générateur et l'état du rôle influençant détermine l'état actif ou inactif du générateur. Dans une *influence de régulation* le rôle influencé n'est pas un générateur et le rôle influençant régule l'état du rôle influencé. Ils définissent ensuite les comportements des rôles influencés en terme de rôle fonctionnel : un générateur influencé positivement (le rôle fonctionnel influençant est franchi) reste un générateur mais s'il est influencé négativement

11. sous forme normale conjonctive

12. sous forme normale disjonctive

(le rôle fonctionnel influençant est non-franchi) alors il se comporte comme un rôle fonctionnel barrière. Ceci permet de propager les observations d'un domaine à l'autre et donc d'avoir plus d'information pour la recherche d'un diagnostic. On retrouve ici une représentation des mauvais fonctionnements pour les rôles influencés qui correspond toujours aux mêmes hypothèses ([Chittaro(1995)]).

Néanmoins, comme on peut ne pas avoir toujours les informations nécessaires pour déterminer l'état du rôle influençant, les auteurs définissent le concept de transmetteur d'influence (Influence Assigner). Un IA est un ensemble d'observations à partir duquel il est possible de définir (d'une façon univoque) le statut de chaque rôle influençant. Dans le cas où l'ensemble d'observations n'est pas un IA on construit tous les différents IA possibles à partir des observations de départ. Chaque IA correspond donc à une assignation de mode de comportement (nouveaux rôles dans le cas d'une influence négative) pour le modèle des rôles fonctionnels. Cette assignation sera consistante avec les observations exprimées en terme de flux et d'effort.

Globalement le processus de construction des candidats pour chaque IA est le suivant :

- Génération des candidats locaux minimaux pour chaque domaine effort/flux.
- Construction des candidats globaux grâce au produit cartésien des candidats locaux.

Au final l'ensemble des diagnostics pour le système est l'union des candidats globaux obtenus pour chaque IA.

L' introduction d'influences entre les rôles fonctionnels de différents domaines correspond à la prise en compte de certaines connaissances du mauvais fonctionnement. En particulier les conséquences d'un dysfonctionnement d'un domaine dans un autre, et le mode de fonctionnement induit par ce dysfonctionnement.

5.3 Conclusions

Cette représentation semble tout de même avoir une lacune majeure : c'est qu'elle ne permet pas, en l'état, de prendre en compte toutes les connaissances de type mauvais fonctionnement. En effet, tous les processus sont construits à partir des rôles fonctionnels tirés d'une modélisation du comportement nominal des composants et les seuls mauvais fonctionnements pris en compte le sont via les hypothèses sur lesquelles reposent les axiomes E_i et D_i ainsi que sur l'utilisation des relations d'influences. En fait, dans cette vision du diagnostic, c'est quasiment une modélisation implicite du fonctionnement normal des différents éléments (axiomes E_i) ou du fonctionnement dégradé (axiomes D_i) qui est réalisée. L'approche choisie par Chittaro exploite peu, à la différence

de [Steels(1989), Sticklen et Chandrasekaran(1989)] l'aspect téléologique et fonctionnel de la modélisation. Il semblerait donc intéressant d'étudier plus précisément l'utilisation potentielle de tous les modèles pour résoudre un problème de diagnostic.

Enfin, cette approche du diagnostic est basée sur l'idée que la représentation des processus et des phénomènes permet que les rôles fonctionnels soient contenus dans suffisamment de cofonctions pour que l'exonération d'un processus ou d'un rôle fonctionnel assure un élagage important dans l'ensemble des conflits. Néanmoins ce critère n'est pas indiqué clairement et la construction des processus et des phénomènes est laissée trop libre pour que cette approche permette, à coup sûr, de résoudre aisément des problèmes de diagnostic. En effet, ces processus ne sont a priori construits que s'ils participent à l'élaboration d'un phénomène lié à la téléologie du système.

Pour pouvoir utiliser au mieux cette approche multi-modèles dans le cadre du diagnostic il faut porter notre attention sur deux points.

1. Le premier concerne la modélisation : Il est nécessaire de définir plus précisément les modalités de construction des processus à partir du modèle des rôles fonctionnels et d'étudier la possibilité de décrire les fonctionnements anormaux dans les différents modèles.
2. Le second concerne le diagnostic : Il faut étudier les possibilités d'utilisation des différents modèles disponibles. En particulier, il faut définir les possibilités de coopération de ces modèles pour déterminer l'état du système.

Si ces deux points peuvent être éclaircis, on disposera alors d'une représentation plus complète et plus précise des outils nécessaires à la modélisation de l'organisation des modèles pour la résolution de problèmes de diagnostic.

6

Conclusions

Les méthodes de raisonnement des approches basées sur la consistance et sur l'abduction permettent, avec des modèles prenant en compte les mêmes connaissances (mais interprétées avec des formalismes différents), d'obtenir des résultats sensiblement identiques. La différence entre ces méthodes porte en fait sur la sémantique des modèles. En effet, l'approche par consistance s'attache à utiliser des modèles représentant le fonctionnement nominal des composants et, à partir des comportements nominaux et de leur association au sein de la structure du système, définit les comportements possibles du système. Ces approches souffrent en particulier de la perte du sens physique attaché à des dysfonctionnements. L'approche abductive utilise des modèles associant le comportement d'un composant (ou d'un sous-système) à des symptômes (valeurs identifiées préalablement et caractéristiques de ce comportement). Le comportement du composant est identifié grâce à l'observation de ces symptômes. L'approche abductive ne permet pas de décrire le comportement normal des composants.

Les approches fonctionnelles pour leur part, même si elles éliminent le problème de la perte du sens physique, souffrent de la rigidité des hypothèses de diagnostic (non compensation) et de l'impossibilité de simuler le comportement physique pour valider les diagnostics (vérifier la consistance entre prévisions et observations).

La dernière approche, le diagnostic basé sur les variables d'effort et de flux dans la Multi-Modélisation, évite le piège de l'impossibilité physique et cherche à utiliser la consistance entre observation et comportement modélisé. Néanmoins, elle utilise peu les connaissances fonctionnelles de plus haut niveau (processus et phénomènes). Pourtant, cette démarche de modélisation permet de prendre en compte tous les aspects d'un système, elle est donc potentiellement un outil important pour le diagnostic. C'est sur cette approche de modélisation que vont reposer nos travaux de modélisation et de diagnostic. Nous allons dans un premier temps spécifier plus précisément les modalités de construction des différents modèles puis nous verrons comment utiliser la structure de l'approche multi-modèles dans le cadre du diagnostic.

Deuxième partie

Représentation du fonctionnement dans l'approche multi-modèles

1

Généralités sur l'approche multi-modèles

L'approche multi-modèles proposée dans [Chittaro et al.(1993)] est basée sur la description de plusieurs modèles à des niveaux d'abstraction différents (figure 1.1). Nous allons voir dans cette partie comment ces modèles peuvent être construits à partir de la description du comportement et des informations fonctionnelles relatives à un système.

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous allons décrire le cadre général de la multimodélisation telle qu'elle a été proposée dans [Chittaro et al.(1993)]. En particulier, nous allons préciser les notions d'ontologie, les types de connaissances manipulées dans chacun des modèles et les liens entre ces modèles. Nous verrons ensuite quels apports nous avons introduits pour faciliter la construction des différents modèles. Le chapitre 2 présente les bond-graphs, qui sont à la base de nos modèles comportementaux, et leur utilisation pour construire le modèle des rôles fonctionnels. Dans le chapitre 3 nous décrivons les méthodes permettant de construire directement le modèle des processus à partir du bond-graph. Enfin, le chapitre 4 présente les améliorations que nous avons introduites pour améliorer la description dans le modèle des phénomènes.

1.1 Notion d'ontologie d'un modèle

La construction d'un modèle est basée sur l'utilisation d'une ou de plusieurs ontologies. La définition d'une ontologie consiste à spécifier le type des entités à partir desquelles on va modéliser le système. Les trois principaux types identifiés sont les suivants :

1. *Ontologie à base d'objets*: Dans ce type d'ontologie le système est modélisé à partir d'objets individuels dont les caractéristiques sont définies indépendamment du contexte dans lequel ils sont utilisés.

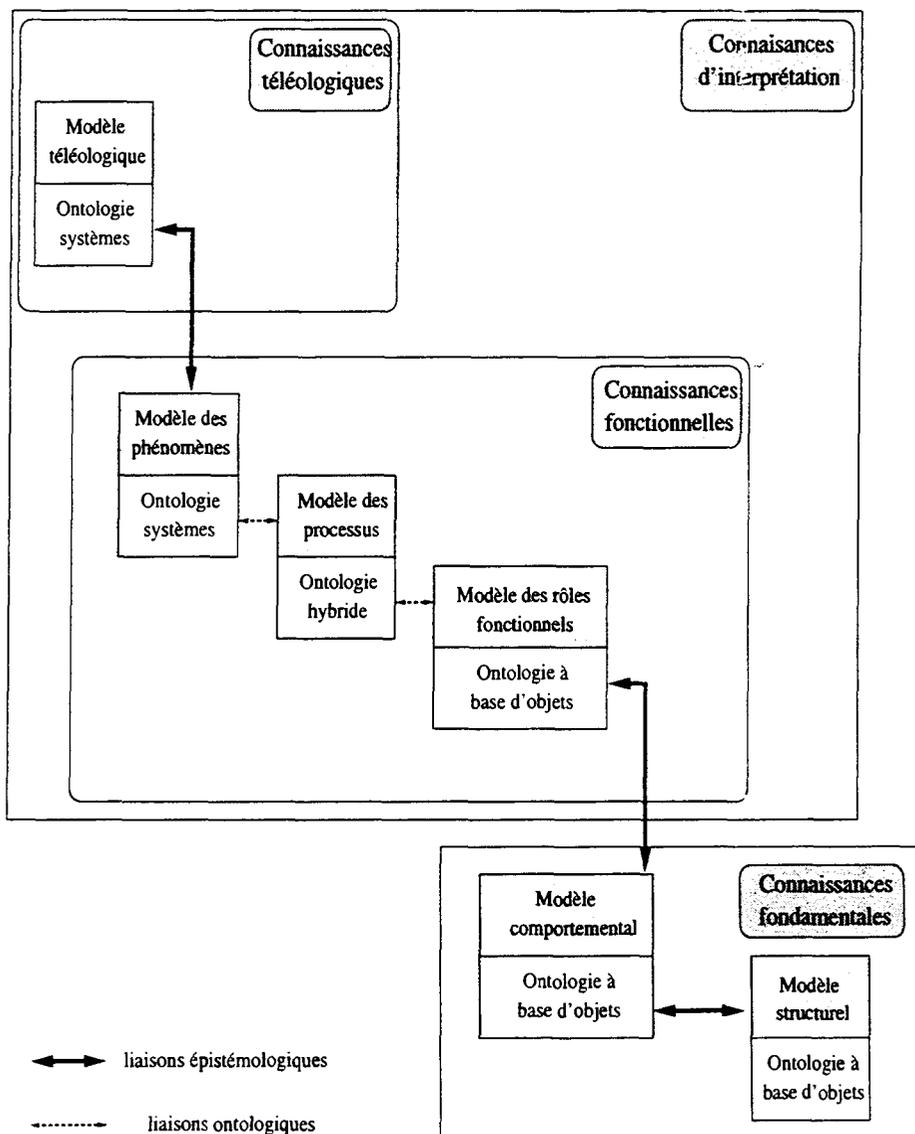


FIG. 1.1 – L'architecture Multi-Modèles

2. *Ontologie à base de système*: Dans ce type d'ontologie le système est modélisé dans sa globalité, les différents éléments qui le composent ne peuvent être décrits isolément. Dans ce cas, le système est défini à partir de ses propriétés globales dépendantes du contexte.
3. *Ontologie hybride*: Dans ce type d'ontologie le système est modélisé sous les deux aspects précédents. Ce type d'ontologie permet le passage entre une ontologie objets et une ontologie systèmes.

Les différents modèles du système basés sur des ontologies identiques seront reliés par des liaisons épistémologiques. Les différents modèles du système basés sur des ontologies différentes seront reliés par des liaisons ontologiques.

1.2 Les connaissances fondamentales

Ce type de connaissances correspond aux informations qui resteront vraies quel que soit le contexte dans lequel est placé le système. Ces connaissances sont décrites dans deux modèles [Chittaro et al.(1993)]: le modèle structurel et le modèle comportemental.

1.2.1 Modèle structurel

Il permet de définir la topologie du système. Il est basé sur une ontologie à base d'objets, et est défini à partir des trois éléments suivants :

- *Les composants*: Ce sont les éléments constitutifs du système. Chaque composant comprend plusieurs terminaux permettant sa connexion avec d'autres éléments du système.
- *Les noeuds*: Ces éléments contiennent plusieurs terminaux du même type et permettent la connexion des composants.
- *Les connexions*: Ces éléments décrivent les relations entre composants. Chaque connexion associe un terminal de composant à un terminal d'un noeud.

1.2.2 Modèle comportemental

Ce modèle permet de décrire les comportements potentiels des différents composants à partir de relations entre grandeurs physiques. Il est basé sur une ontologie à base d'objets, et est défini à partir des trois éléments suivants :

- *Les grandeurs physiques*: Elles peuvent être des constantes (indépendantes du temps et du système), des paramètres (spécifiques du composant) et des

variables (caractérisant l'état d'un composant pour un domaine physique donné). Ces variables sont définies en terme de variable d'effort de flux, de déplacement et d'impulsion. Ces différentes notions sont étudiées plus précisément dans le chapitre 2.

- *Les équations physiques*: Elles caractérisent le comportement d'un composant ou d'un noeud. Elles peuvent être structurelles si elles ne contiennent pas de paramètres (équations de bilan $\sum x_i = 0$, équations de définition $v = \frac{dx}{dt}$) ou constitutives si elles mettent en jeu des paramètres.
- *Les modes opérationnels*: ils sont décrits à partir d'une condition d'occurrence, ils spécifient un ensemble d'équations représentant le comportement du composant dans ce mode.

Les modèles structurel et comportemental sont reliés par des liaisons épistémologiques. Ces liaisons associent les éléments du modèle comportemental aux éléments du modèle structurel (par exemple les grandeurs physiques aux terminaux, les équations aux noeuds et aux composants, les modes opérationnels aux composants).

1.3 Les connaissances interprétatives

Ce type de connaissances va permettre d'exprimer le comportement du système d'une façon subjective. Ces connaissances se répartissent entre connaissances fonctionnelles, qui vont décrire comment les composants du système interagissent pour remplir les fonctions définies par le concepteur, et connaissances téléologiques, décrivant les buts que doit atteindre le système.

1.3.1 Les connaissances fonctionnelles

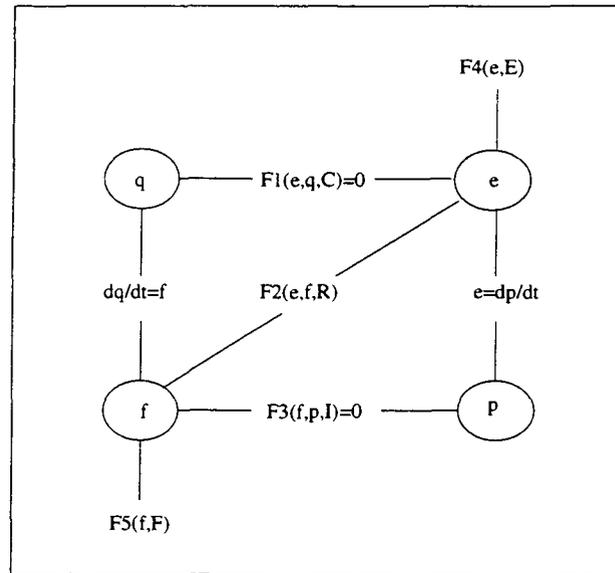
Ces connaissances sont décrites dans trois modèles, le modèle des rôles fonctionnels, le modèle des processus et le modèle des phénomènes.

Modèle des rôles fonctionnels

Il est basé sur une ontologie objets. Dans ce modèle, le comportement de chaque composant est interprété en terme de rôle fonctionnel. Les équations physiques décrivant ce comportement sont interprétées grâce au concept du TOS (Tetrahedron Of State, voir figure 1.2). Ces équations du TOS et leurs relations avec les rôles fonctionnels seront décrites plus précisément dans la section 2.4.

Ces rôles fonctionnels sont ensuite reliés grâce à deux types de liaisons: les liaisons de dépendance mutuelle et les liaisons d'influence:

- *dépendance mutuelle*: Deux rôles fonctionnels RF_i et RF_j , associés aux équations physiques EP_i et EP_j , sont mutuellement dépendants si EP_i et

FIG. 1.2 – *Le Tetrahedron Of State*

EP_j partagent une variable (dépendance mutuelle directe) ou s'il existe une équation structurelle qui relie une variable physique de EP_i à une variable physique de EP_j (dépendance mutuelle indirecte).

- *influence* : Un rôle fonctionnel RF_i associé à l'équation physique EP_i influence un rôle fonctionnel RF_j associé à l'équation physique EP_j si une variable physique de EP_i est un paramètre de EP_j .

Ces liaisons entre rôles fonctionnels permettent de décrire le modèle des rôles fonctionnels. Le modèle des rôles fonctionnels est relié aux modèles structurel et comportemental par des liaisons épistémologiques. Elles associent une équation constitutive à chaque rôle fonctionnel et une équation structurelle à chaque relation de dépendance mutuelle.

Le chapitre 2.4 présente plus en détail ces différents concepts.

Modèle des processus

Le modèle des processus est basé sur une ontologie hybride. Il est construit en associant les rôles fonctionnels possédant une relation de dépendance mutuelle.

Un processus est composé des éléments suivants :

- *cofonction* : c'est un réseau de rôles fonctionnels qui spécifie quels sont les rôles fonctionnels nécessaires pour permettre l'occurrence du processus.
- *condition* : c'est une formule logique qui caractérise la situation qui permettra l'occurrence du processus.

- *effet* : c'est une formule logique qui caractérise la situation durant l'occurrence du processus.
- *post-effet* : c'est une formule logique qui caractérise la situation après la fin du processus.

Un processus est donc représenté par un quadruplet \langle cofonction, precondition, effet, post-effet \rangle .

Chittaro a identifié plusieurs processus type :

1. Un processus de transport (TRANS) ayant pour cofonction *générateur - conduit*, ou *générateur - conduit - générateur* dans le cas du transport généralisé (TRANSG).
2. Un processus de chargement de réservoir (RESC) ayant pour cofonction *générateur - conduit - réservoir*.
3. Un processus de déchargement de réservoir (RESA) ayant pour cofonction *réservoir - conduit*, ou *réservoir - conduit - générateur* dans le cas du déchargement généralisé (RESAG).

Les processus peuvent ensuite être reliés par trois types de lien :

- *causalité directe* : Un processus P_i cause directement un processus P_j si les effets ou les post-effets du processus P_i sont identiques aux conditions de P_j .
- *régulation* : Un processus P_i régule un processus P_j s'il existe une relation d'influence entre un rôle fonctionnel de la cofonction de P_i et un rôle fonctionnel de la cofonction de P_j dont le paramètre est une résistance généralisée.
- *support* : Un processus P_i supporte un processus P_j s'il existe une relation d'influence entre un rôle fonctionnel de la cofonction de P_i et un rôle fonctionnel de la cofonction de P_j dont le paramètre est une capacité ou une inductance généralisée.

Modèle des phénomènes

A partir du modèle des processus, on peut construire un **modèle des phénomènes**. Il est basé sur une ontologie systèmes. Il correspond à une interprétation du modèle des processus : les processus sont associés de façon à réaliser un phénomène. Un phénomène peut être associé à un seul processus ou représenter la conjonction de plusieurs processus ; plusieurs conjonctions différentes de processus peuvent réaliser le même phénomène. Chaque phénomène est décrit à partir

d'un ensemble de processus qui sont nécessaires à sa réalisation et d'un ensemble d'effets conséquence de sa réalisation.

Ce modèle des phénomènes a un rôle central dans l'approche multi-modèles. En effet, le modèle des processus traduit en terme fonctionnel les connaissances fondamentales décrites dans les modèles structurel et comportemental. Le modèle des phénomènes permet donc l'interface entre ces connaissances fonctionnelles (décrivant les échanges d'énergie dans le système) et les connaissances téléologiques (décrivant les buts du système). Il réalise l'interface entre les buts assignés au système par le concepteur et les processus dont la combinaison va permettre, au travers du modèle des phénomènes, de réaliser ces buts.

Chaque phénomène est défini par un réseau de processus, appelé organisation, une condition, portant sur les états fonctionnels des processus, un effet, décrivant la situation durant l'occurrence du phénomène et un post-effet décrivant la situation à la fin du phénomène. L'effet et le post-effet sont relatifs aux variables physiques associées aux rôles fonctionnels des processus décrits dans l'organisation. Deux phénomènes peuvent être reliés dans le modèle des phénomènes si :

- Un même processus appartient à l'organisation de chacun des phénomènes.
- Il existe une relation de causalité directe, de régulation ou de support entre deux processus appartenant chacun à l'organisation de l'un des phénomènes.

1.3.2 Les connaissances téléologiques

Enfin on peut définir un **modèle téléologique du système**. Ce modèle représente les buts assignés au système par le concepteur. Chaque but est défini à partir des conditions opérationnelles nécessaires à sa réalisation et des effets résultant de l'accomplissement de ce but. Ils peuvent être décomposés en sous-buts. Ces buts et ces sous-buts sont associés à un ou plusieurs phénomènes. Ce modèle décrit les objectifs pour lesquels a été conçu le système, il ne préjuge pas de la façon dont ces buts vont être atteints. Le modèle des phénomènes représente les solutions permettant d'atteindre ces buts en associant buts et processus grâce à la description des phénomènes.

L'intérêt de l'approche multi-modèles est de permettre la représentation des connaissances interprétatives, en particulier fonctionnelles, et surtout de représenter de façon simple et efficace les liens entre ces connaissances et les connaissances fondamentales ce qui permet d'assurer une bonne continuité dans la modélisation et le raisonnement.

2

Modèle comportemental et modèle des rôles fonctionnels

2.1 Généralités

Dans [Chittaro et al.(1993)] le modèle comportemental est construit à partir des équations de la physique du système. Dans des applications portant sur des systèmes industriels, un tel ensemble d'équations est difficile à construire en raison de la complexité de ces systèmes, des différents domaines de la physique entrant en jeu et du nombre important de lois physiques à respecter. Nous avons donc choisi (voir [Zouaoui et al.(1997a), Zouaoui et al.(1997b)]) d'utiliser une modélisation à base de bond-graph [Rosenberg et Karnopp(1983)] pour notre modèle comportemental. En effet, cette approche de modélisation permet de dériver facilement des équations physiques (sous forme algèbro-différentielle) à partir d'un langage graphique représentant les transferts de puissance et permettant d'exprimer les liens de causalité entre les variables. De plus, il est possible de modifier facilement le modèle bond-graph d'un système en fonction des hypothèses de modélisation en particulier en fonction des phénomènes physiques que l'on désire décrire ou négliger.

La modélisation à base de bond-graph repose avant tout sur le concept de variables généralisées d'effort et de flux qui permettent la représentation des bilans et des échanges d'énergie entre les différents éléments d'un système. Dans cette approche, un échange d'énergie entre deux éléments est représenté par un lien en forme de demi-flèche indiquant le sens du transfert. Ces demi-flèches s'appellent des « bonds » ; chacune est étiquetée par une variable d'effort e et une variable de flux f . Le produit de ces deux variables correspond à la puissance P « portée » par le bond, $P = e * f$. Cette puissance est comptée positivement dans le sens de la demi-flèche. L'intérêt de cette modélisation est que le choix de e et de f dépend uniquement du domaine physique du système à représenter. Tous les éléments

utilisés dans le modèle correspondent à des généralisations du concept de résistance, de capacité, de source d'effort, etc... Ainsi, dans le domaine hydraulique l'effort correspond à la pression, le flux au débit volumique, dans le domaine mécanique l'effort correspond à la force, le flux à la vitesse, etc... Il existe deux autres variables généralisées : l'impulsion et le déplacement. L'impulsion correspond à l'intégrale de l'effort ($p = \int e \cdot dt$), le déplacement correspond à l'intégrale du flux ($q = \int f \cdot dt$). Dans le domaine hydraulique l'impulsion correspond à l'impulsion de pression, le déplacement au volume. Le tableau 2.1 synthétise ces correspondances pour les domaines les plus courants de la physique et la figure 2.1 présente les conventions de notations des variables d'effort et de flux sur les bonds.

	Effort e	Flux f	Impulsion p	Déplacement q
Hydraulique	Pression P	débit volumique Q	Impulsion pression τ	Volume V
Electrique	Tension U	Courant I	Flux ϕ	Charge q
Thermique^a	Température T	Flux de chaleur \dot{Q}	-	Energie thermique Q
Translation	Force F	Vitesse V	Impulsion P	Déplacement x
Rotation	Couple C	Vitesse angulaire ω	Impulsion angulaire h	Angle θ

TAB. 2.1 – Les variables généralisées des principaux domaines physiques.

^a Ici, la variable de flux aurait du être le flux d'entropie ($dU = TdS$), comme l'entropie est une grandeur difficile à apprécier et à manipuler, on utilise le flux de chaleur à la place, le produit $e * f$ n'est plus homogène à une puissance (on parle de pseudo bond-graphs). Les bond-graphs dans le domaine thermique sont plus délicats à utiliser que dans les autres domaines.

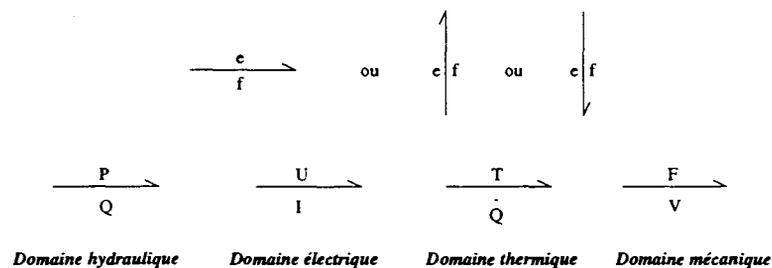


FIG. 2.1 – Convention de notation sur les bonds

2.2 Les éléments de base

Les bond-graphs sont construits à partir de deux types d'éléments. Le premier type permet de représenter les éléments délivrant ou consommant de l'énergie.

Dans le modèle ce sont des éléments de type résistif, notés R , de type capacitifs, notés C , de type inertiels, notés I , des sources, notées SE ou SF (suivant qu'elles sont source d'effort ou de flux) et des éléments de transformation de l'énergie, notés TF et GY . Ces différents éléments sont présentés dans la figure 2.2.

Élément du bond-graph	Représentation
Résistif	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xleftarrow{f} \end{array} R$
Capacitif	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xleftarrow{f} \end{array} C$
Inertiel	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e} \\ \xleftarrow{f} \end{array} I$
Source d'effort	SE
Source de flux	SF
Gyrateur	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e_1} \quad \xrightarrow{e_2} \\ \xleftarrow{f_1} \quad \xleftarrow{f_2} \end{array} GY$
Transformateur	$\begin{array}{c} \xrightarrow{e_1} \quad \xrightarrow{e_2} \\ \xleftarrow{f_1} \quad \xleftarrow{f_2} \end{array} TF$

FIG. 2.2 – Les éléments de bond-graph

- Les éléments résistifs R : Ils permettent d'associer directement un effort et un flux $e = R.f$ sous la forme d'une loi d'Ohm généralisée.
- Les éléments capacitifs C et inertiels I : Ils permettent d'associer l'effort au déplacement via un élément capacitif $e = \frac{1}{C}.q = \frac{1}{C} \cdot \int f.dt$ ou le flux à l'impulsion via un élément inertiels $f = \frac{1}{I}.p = \frac{1}{I} \cdot \int e.dt$
- Les sources d'énergie SE et SF : Elles permettent de représenter les éléments délivrant ou consommant de l'énergie.
- Les transformateurs et les gyrateurs TF et GY : Ils permettent de représenter une transformation de puissance sans dissipation. Le transformateur relie l'effort en sortie à l'effort en entrée $e_1 = m.e_2$ et le flux en sortie au flux en entrée $f_2 = m.f_1$, m correspond au coefficient du transformateur. Le gyrateur relie l'effort en sortie au flux en entrée $e_2 = r.f_1$ et le flux en sortie

à l'effort en entrée $e_1 = r.f_2$, r correspond au coefficient du gyrateur. On peut noter que dans les deux cas on vérifie toujours $e_1.f_1 = e_2.f_2$. Ce type d'éléments est plus particulièrement utilisé pour représenter les échanges d'énergie entre deux domaines physiques différents.

Le deuxième type d'éléments est constitué des jonctions qui permettent la réalisation des bilans de puissance entre éléments du premier type :

- Si l'on prend une jonction connectant trois branches différentes (figure 2.3), le bilan de puissance serait $P_1 + P_2 + P_3 = 0$ soit $e_1.f_1 + e_2.f_2 + e_3.f_3 = 0$. Dans un bond-graph, ce type d'équation de conservation de la puissance est écrit en supposant soit l'effort constant, sur les jonctions 0, soit le flux constant, sur les jonctions 1. Pour les jonctions 0 on a donc un bilan du type $e * f_1 + e * f_2 + e * f_3 = 0$ qui se réécrit sous la forme $f_1 + f_2 + f_3 = 0$. Sur les jonctions 1 on a un bilan du type $e_1 * f + e_2 * f + e_3 * f = 0$ qui s'écrit sous la forme $e_1 + e_2 + e_3 = 0$.

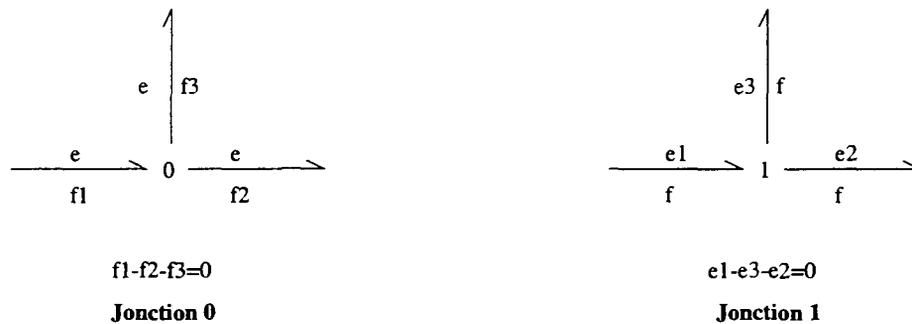


FIG. 2.3 – Les jonctions dans un bond-graph

Il existe enfin un dernier type d'éléments que l'on peut trouver dans les bond-graphs : ce sont les liaisons d'information. Elles permettent de transférer une information concernant un flux ou un effort dans le bond-graph. Ce type de lien est particulièrement utile pour représenter l'influence d'un élément sur un autre. Par exemple, une liaison d'information peut être utilisée pour représenter dans le domaine thermique l'effet Joule d'une résistance électrique : la résistance électrique transmet l'information concernant la température à une source d'effort du domaine thermique.

2.3 Représentation de la causalité

La causalité dans les bond-graphs est basée sur l'impossibilité d'imposer ou de contrôler à la fois l'effort et le flux. Cette causalité est représentée par un trait vertical à une des extrémités d'une demi-flèche. Ce trait permet de montrer la

direction vers laquelle est imposé l'effort. Ainsi, si l'on impose un effort (ou un flux) à un élément de type R , C ou I , par réaction cet élément causera un flux (respectivement un effort). Par exemple, pour une résistance électrique, si l'on impose la tension U à ses bornes il en résulte un courant I ($I = U/R$); à l'inverse si l'on impose I on obtient une tension U ($U = R * I$) (voir figure 2.4).

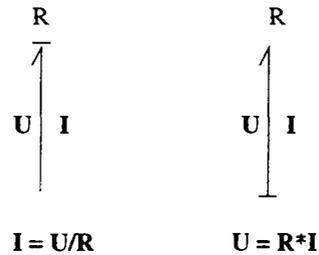


FIG. 2.4 - Exemple de causalité sur une résistance

L'attribution de la causalité dans un bond-graph n'est pas arbitraire, elle repose sur des règles d'assignation de la causalité aux éléments et de la propagation de ces causalités dans le bond-graph [Rosenberg et Karnopp(1983)].

Les sources ont une causalité fixe puisqu'elles imposent soit un flux, soit un effort. Les éléments de stockage ont une causalité préférentielle que l'on appelle causalité intégrale. Une capacité préfère produire un effort (intégrale du flux, $e = \frac{1}{C} \cdot \int f \cdot dt$) alors qu'une inductance préfère produire un flux (intégrale de l'effort, $f = \frac{1}{L} \cdot \int e \cdot dt$). Les résistances n'ont pas de causalité préférentielle. Les éléments de types transformateur gardent la causalité, c'est à dire que si on leur impose un effort en entrée (ou un flux), ils imposent un effort en sortie (respectivement un flux). Les éléments de type gyrateur inversent la causalité, c'est-à-dire que si on leur impose un effort en entrée (ou un flux), ils imposent un flux en sortie (respectivement un effort). Sur les jonctions 0 on ne peut imposer qu'un seul effort (ce sont des bilans à effort constant); parallèlement, sur les jonctions 1, on ne peut imposer qu'un flux (ce sont des bilans à flux constant). Ainsi sur une jonction 0 seule une branche porte une barre de causalité, alors que sur les jonctions 1 seule une branche ne porte pas de barre de causalité.

Pour affecter la causalité dans un bond-graph (en utilisant la procédure définie dans [Rosenberg et Karnopp(1983)]), on commence par imposer les causalités obligatoires: celles des sources. Si c'est possible, on propage ensuite ces causalités dans le bond graph en respectant les règles sur les jonctions, les transformateurs et les gyrateurs. Si un conflit apparaît durant cette étape c'est que le problème est mal posé. La deuxième étape consiste à assigner la causalité préférentielle (intégrale) sur les éléments de stockage (C et I); on propage ensuite cette causalité dans le bond-graph. Si un conflit de causalité apparaît durant cette étape on

le résout en changeant la causalité des éléments de stockage. La dernière étape consiste à propager la causalité sur les éléments résistifs (ils peuvent accepter n'importe quelle causalité).

La causalité ainsi affectée permet de construire un graphe d'influence entre les différentes variables décrites dans le bond-graph. En effet, pour chaque élément, on peut définir et orienter le lien entre la variable d'effort et de flux. L'effort (ou le flux) imposé à l'élément « causera » le flux (respectivement l'effort) que l'élément imposera sur la jonction.

Sur les jonctions 0, c'est le flux dans la branche portant l'effort sur la jonction qui sera causé par le bilan des flux des autres branches, c'est le seul flux « libre » de la jonction. Parallèlement, sur une jonction 1, c'est l'effort sur la branche fixant le flux sur la jonction qui sera causé par le bilan des efforts des autres branches, c'est le seul effort « libre » de la jonction.

Sur les éléments de type transformateur, le sens de la demi-flèche impose le sens d'utilisation de l'équation. Si l'on impose un effort en entrée, il influence l'effort en sortie et le flux en sortie influence le flux en entrée. Si l'on impose le flux en entrée, il influence le flux en sortie et l'effort en sortie influence l'effort en entrée.

De même sur les gyrateurs, si l'on impose l'effort en entrée, il influence le flux de sortie et l'effort en sortie influence le flux en entrée. Si l'on impose le flux en entrée, il influence l'effort en sortie et le flux en sortie influence l'effort en entrée.

La figure 2.5 présente les différentes influences que l'on peut extraire des liens de causalité entre les variables du bond-graph.

L'intérêt des bond-graphs est donc double : il nous permet d'un côté d'obtenir les équations qualitatives et donc de pouvoir générer un graphe d'influence et de l'autre il va nous permettre de construire une partie des modèles décrits dans l'approche multi-modèles. Tout cela sans disposer des paramètres précis des équations décrivant le système.

2.4 Construction du modèle des rôles fonctionnels

Dans [Chittaro et al.(1993)], les rôles fonctionnels sont des interprétations des équations physiques du composant, construites en utilisant le concept de TOS (Tetrahedron Of Space figure 1.2). Dans le TOS on retrouve cinq équations constitutives : $f_1(e, q, C) = 0$, $f_2(e, f, R) = 0$, $f_3(f, p, I) = 0$, $f_4(e, E)$ et $f_5(f, F)$ et deux équations structurelles : $\dot{q} = f$ et $\dot{p} = e$. Les équations constitutives sont interprétées en terme de rôles fonctionnels :

- $f_1(e, q, C) = 0$ est interprétée comme un rôle fonctionnel « réservoir de déplacement » R^q .
- $f_2(e, f, R) = 0$ est interprétée comme un rôle fonctionnel de conduit d'énergie, qui peut être un « conduit de flux avec dissipation d'effort » C^f , un

	Représentation	équations	relations d'influences
Résistif		$f=(1/R)*e$	$e \xrightarrow{+} f$
		$e=R*f$	$f \xrightarrow{+} e$
Capacitif		$e=(1/C) \int f dt$ $f=dq/dt$	$f \xrightarrow{+} q \xrightarrow{+} e$
Inertiel		$f=(1/L) \int e dt$ $e=dp/dt$	$e \xrightarrow{+} p \xrightarrow{+} f$
Source d'effort			
Source de flux			
Gyrateur		$f2=(1/r)*e1$ $f1=(1/r)*e2$	$e1 \xrightarrow{+} f2$ $e2 \xrightarrow{+} f1$
		$e1=r*f2$ $e2=r*f1$	$f2 \xrightarrow{+} e1$ $f1 \xrightarrow{+} e2$
Transformateur		$e2=(1/m)*e1$ $f1=(1/m)*f2$	$e1 \xrightarrow{+} e2$ $f2 \xrightarrow{+} f1$
		$e1=m*e2$ $f2=m*f1$	$e2 \xrightarrow{+} e1$ $f1 \xrightarrow{+} f2$
Jonction 0		$f2=f1-f3$	$f1 \xrightarrow{+} f2 \xleftarrow{-} f3$
Jonction 1		$e2=e1-e3$	$e1 \xrightarrow{+} e2 \xleftarrow{-} e3$

FIG. 2.5 – Représentation des éléments du bond-graph, leurs équations et leurs causalités.

« conduit d'effort avec dissipation de flux » C^e , un « conduit purement conductif » CC , une « barrière de flux » B^f ou une « barrière d'effort » B^e .

- $f_3(f, p, I) = 0$ est interprétée comme un rôle fonctionnel « réservoir d'impulsion » R^p .
- $f_4(e, E)$ est interprétée comme un rôle fonctionnel « générateur d'effort » G^e .
- $f_5(f, F)$ est interprétée comme un rôle fonctionnel « générateur de flux » G^f .

A partir de ce modèle des rôles fonctionnels on peut construire un **modèle des processus** en rassemblant les rôles fonctionnels de certains composants (ayant un lien de *dépendance mutuelle*) suivant un ordre précis (comme nous le verrons dans la section suivante). Dans [Zouaoui et al.(1997a), Zouaoui et al.(1997b)] nous avons

Rôles fonctionnels	Eléments de Bond Graph
G^e	$S_e \longrightarrow 1$ $S_e \longrightarrow 0$
G^f	$S_f \longleftarrow 1$ $S_f \longleftarrow 0$
C^f	$R \longleftarrow 1$ $R \longleftarrow 1$
C^e	$R \longleftarrow 0$ $R \longleftarrow 0$
R^q	$C \longleftarrow 1$ $C \longleftarrow 1$ $C \longleftarrow 0$ $C \longleftarrow 0$
R^p	$I \longleftarrow 1$ $I \longleftarrow 1$ $I \longleftarrow 0$ $I \longleftarrow 0$
CC	$\longrightarrow GY \longleftarrow$ $\longleftarrow GY \longrightarrow$ $\longrightarrow TF \longleftarrow$ $\longleftarrow TF \longrightarrow$

FIG. 2.6 - Rôles fonctionnels et éléments de bond-graph

proposé de construire directement le modèle des rôles fonctionnels à partir du

bond graph. En effet, les équations du TOS et les différents éléments d'un bond-graph reposent sur des concepts identiques. Les éléments de bond-graph peuvent donc servir de base pour la construction du modèle des rôles fonctionnels. La figure 2.6 présente les équivalences entre éléments de bond-graph et rôle fonctionnels. Seul le rôle fonctionnel barrière n'est pas explicitement associé à un élément de bond graph, il correspond en fait à un élément résistif ayant une valeur de résistance infinie. Nous verrons aussi par la suite que les éléments de type transformateur et gyrateur peuvent être interprétés comme une combinaison de source et de puits.

2.5 Exemple

Nous allons voir, sur un exemple classique (tiré de [Zouaoui(1998)]), comment le bond-graph nous permet de construire le graphe d'influence et le modèle des rôles fonctionnels. Le système physique (figure 2.7(1)) étudié dans cet exemple est constitué de deux réservoirs a et b reliés par une tuyauterie. Le réservoir a est alimenté par un débit Q_1 . L'évacuation de l'eau est effectuée respectivement sur les réservoirs a et b par les débits Q_2 et Q_4 . Les variables utilisées sont :

- Q_1 : le débit d'entrée d'eau au réservoir a .
- Q_2 : le débit de sortie d'eau du réservoir a .
- Q_3 : le débit de sortie d'eau du réservoir a vers le réservoir b .
- V_a : le volume du réservoir a .
- Q_a : le débit dans le réservoir a (variation de volume : $Q_a = \frac{dV_a}{dt}$).
- P_a : la pression dans le réservoir a .
- V_b : le volume du réservoir b .
- Q_b : le débit dans le réservoir b (variation de volume : $Q_b = \frac{dV_b}{dt}$).
- P_b : la pression dans le réservoir b .
- Q_4 : le débit de sortie d'eau du réservoir b .

Dans le bond-graph correspondant à ce système (figure 2.7(2)), nous avons considéré trois paramètres : C_a , C_b et R . C_a et C_b représentent respectivement les capacités d'accumulation de volume dans les réservoirs a et b . R correspond à la perte de charge le long de la tuyauterie (dissipation de pression).

Le graphe d'influence que l'on peut construire à partir du bond-graph est présenté en figure 2.7(3). Il est construit comme décrit dans la figure 2.5. Enfin,

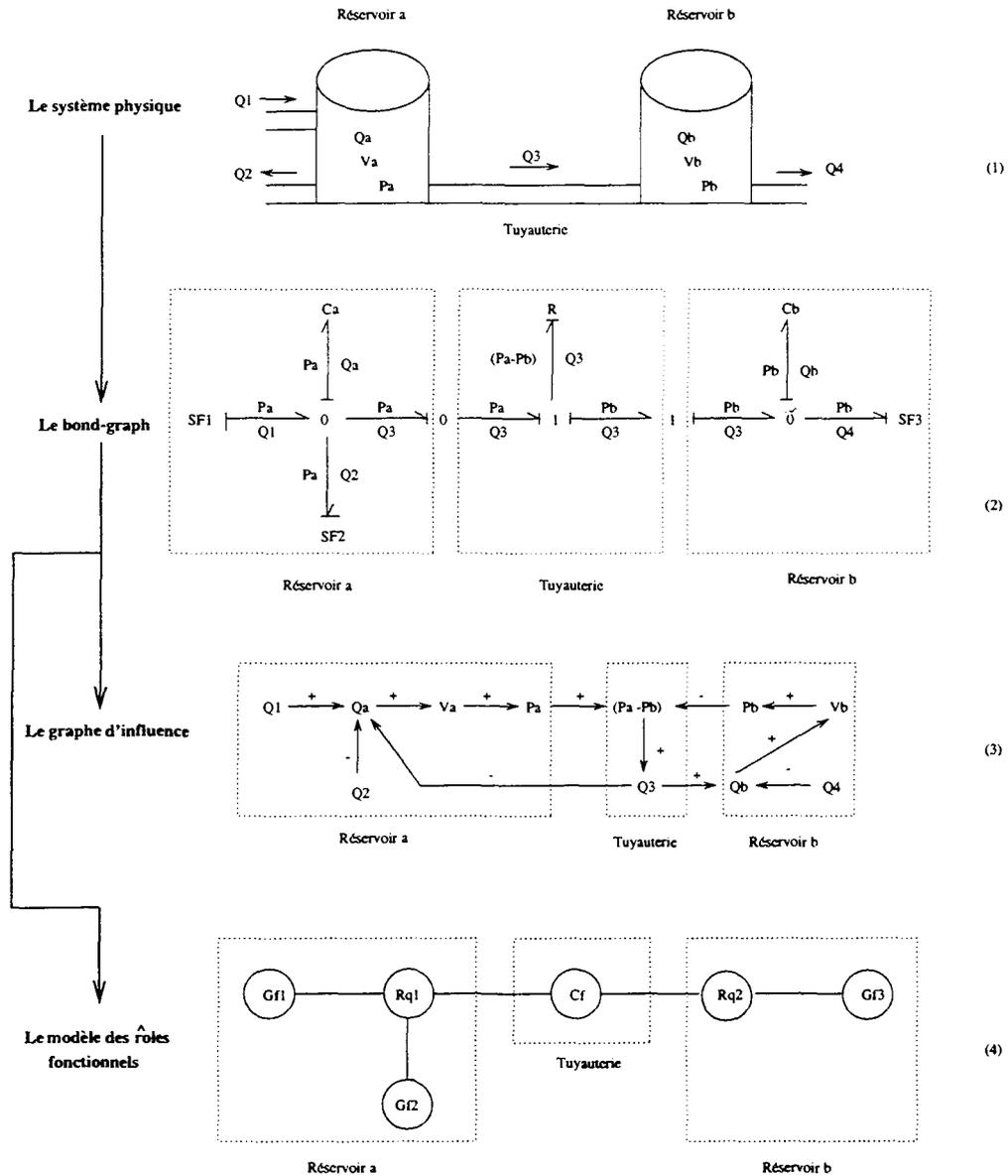


FIG. 2.7 – Exemple de correspondances entre système physique, bond-graph, graphe d'influences et modèle des rôles fonctionnels.

le modèle des rôles fonctionnels est décrit en figure 2.7(4). Pour cela on utilise le tableau de correspondance décrit dans la figure 2.6.

Tous ces modèles sont construits dans le cadre d'une ontologie à base d'objets.

3

Construction du modèle des processus

Dans [Chittaro et al.(1993)] aucune méthode permettant une construction systématique des processus n'est proposée : les processus sont construits à partir du modèle des rôles fonctionnels grâce à des connaissances d'experts déterminant les processus « pertinents ». Si l'on construit systématiquement les processus en combinant tous les générateurs (ou les réservoirs) connectés par un conduit on obtient un ensemble de processus dont un grand nombre n'a aucun sens physique : ils ne peuvent pas être interprétés comme des transferts d'énergie dans le système. Dans les sections suivantes nous allons voir quelles sont les raisons pour lesquelles certains processus n'ont pas de sens physique et comment l'on peut construire uniquement les cofonctions des processus « pertinents » (ceux qui ont une interprétation physique). Nous verrons ensuite comment l'on peut caractériser les conditions d'activation et les effets de ces processus à partir de l'étude de la partie de bond-graph à laquelle ils correspondent.

3.1 Le problème

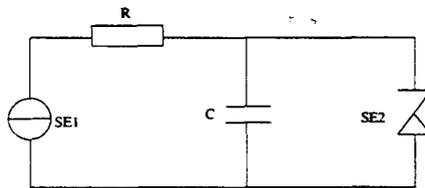


FIG. 3.1 - *Exemple*

Prenons l'exemple décrit par la figure 3.1. Il comprend une source de tension, une résistance, une capacité et une diode Zener. Dans cet exemple, la tension V de la source est au dessus du seuil V_0 de la diode Zener, la diode peut donc

accepter n'importe quelle valeur de courant. A partir de cet exemple on peut construire le bond-graph de la figure 3.2 où la diode Zener joue le rôle d'une source d'effort $SE2$ imposant V_0 . Grâce aux correspondances données dans la figure 2.6, le bond-graph correspondant à cet exemple (figure 3.2 haut) peut être transformé en un modèle des rôles fonctionnels (figure 3.2 bas).

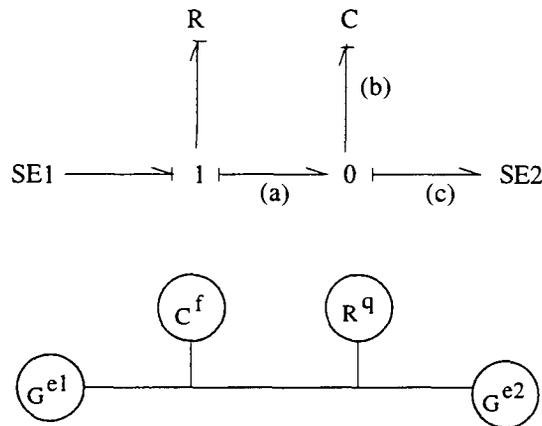


FIG. 3.2 - Bond-graph de l'exemple

A partir de ce modèle des rôles fonctionnels, on peut construire deux processus respectant les principes définis dans [Chittaro et al.(1993)]. Le premier P_1 est un chargement, il a pour cofonction $G^{e1} - C^f - R^q$. Le second P_2 est un transport, il a pour cofonction $G^{e1} - C^f - G^{e2}$.

Examinons la jonction 0 de ce bond-graph: Le flux de puissance dans la branche (a) est $P_a = e * f_a$, dans la branche (b) c'est $P_b = e * f_b$ et dans la branche (c) $P_c = e * f_c$. Le bilan de puissance sur la jonction-0 est donc $P_a - P_b - P_c = 0$. Comme l'effort est le même sur chacune des branches le bilan de puissance ce ramène à un bilan de flux: $f_a - f_b - f_c = 0$. Les flux f_a et f_b sont totalement indépendants compte tenu de la causalité sur la jonction-0. En effet, f_b est imposé par C en réponse à l'effort de $SE2$ et f_a est imposé par R en réponse à la différence d'effort entre $SE1$ et $SE2$. On voit donc qu'un processus P_1 représentant un flux de puissance entre la source $SE1$ et la capacité C ne peut exister puisque les flux sur chacun de ces éléments sont indépendants. Ainsi, sur cet exemple, on peut voir qu'il est impossible de charger la capacité à partir de la source de tension. Pour une variation de tension entre V_0 et V tout le courant passe par la diode, aucun courant ne passe dans la capacité.

Sur la figure 3.3 on peut voir les trois bond-graphs que l'on peut construire en supprimant successivement l'une des branches (a), (b) et (c) de la jonction-0. Le premier bond-graph correspond au processus P_1 , dans ce cas, les règles d'assignation de la causalité sur la jonction-0 ne sont pas respectées. Le processus

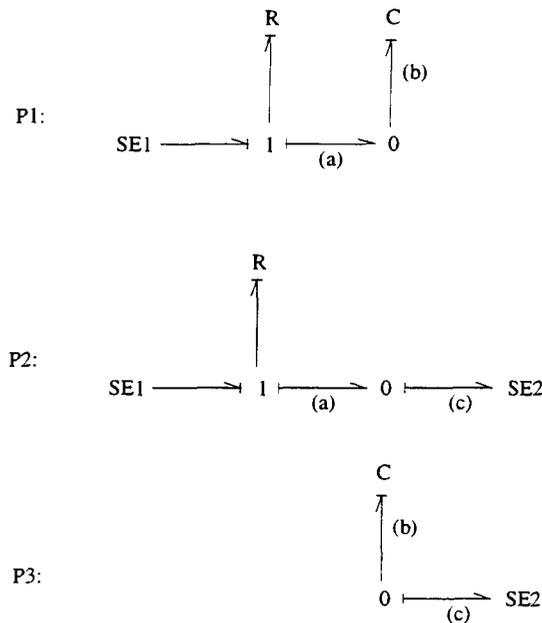


FIG. 3.3 - Isolation des processus

de transport P_2 respecte ces règles. De même, on peut construire un processus P_3 comprenant $R^q - G^{e2}$. Il correspond à un processus de déchargement. Cet exemple montre bien qu'il faut prendre en compte la causalité assignée sur chaque jonction pour construire un processus à partir d'un bond-graph. La cofonction d'un processus ne peut être construite indépendamment de la causalité imposée par chaque élément de bond-graph.

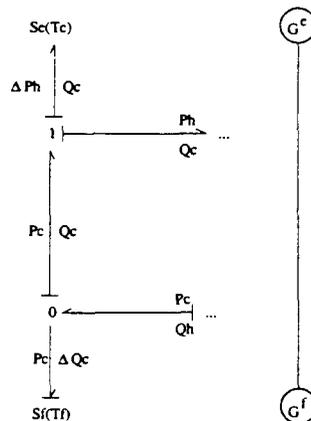


FIG. 3.4 - Partie du bond-graph de la boucle primaire d'un REP et modèle des rôles fonctionnels correspondants

Le second problème que l'on rencontre lors de la construction des cofonctions est lié au sens des transferts d'énergie. Dans la figure 3.4, on peut voir un bond-

graph correspondant à une partie de la boucle primaire d'un REP. A partir de ce bond-graph on construit le modèle des rôles fonctionnels (figure 3.4). Ce modèle des rôles fonctionnels nous permet de décrire une cofonction respectant la causalité: $G_{T_c}^f - G_{T_h}^e$. Néanmoins, on peut aussi voir sur le bond-graph que :

- La puissance absorbée par $S_{T_f}^f$ est $P_c * \Delta Q_c > 0$
- La puissance absorbée par $S_{T_c}^e$ est $\Delta P_h * Q_c > 0$

Un flux d'énergie entre $S_{T_f}^f$ et $S_{T_c}^e$ impose qu'une source fournisse de la puissance et que l'autre l'absorbe. Dans ce cas les conventions du bond-graph seraient rompues puisque les deux sources absorbent de l'énergie (cf. sens des demi flèches). Cette cofonction ne peut donc correspondre à un processus interprétable, il n'y a pas de transfert entre ces deux sources.

3.2 Construction des cofonctions

Il ya donc deux problèmes indépendants à régler pour construire une cofonction correcte: celui de la causalité et celui du sens du transfert. Pour construire une cofonction à partir d'un bond-graph il nous faudra donc :

1. respecter la causalité,
2. vérifier qu'une source fournit de l'énergie (la flèche pointe de la source vers la jonction) et que l'autre source consomme de l'énergie (la flèche pointe de la jonction vers la source).

Les bond-graphs décrivent explicitement la causalité et le sens des transferts d'énergie, ils contiennent donc les informations nécessaires à la construction des cofonctions en respectant ces deux contraintes. Pour construire un tel processus on doit suivre un chemin dans le bond-graph respectant les causalités imposées par les éléments et les jonctions [Thétiot et al.(1998)].

La construction systématique de ces cofonctions est réalisée de la manière suivante :

1. La première étape consiste à retrouver dans le graphe les sources et les éléments de stockage qui sont des sources potentielles.
2. La seconde étape consiste à suivre dans le graphe la variable généralisée imposée par un élément source jusqu'à ce que l'on rencontre un élément faisant office de puits. Ce chemin ainsi parcouru définit un transfert d'énergie possible et les éléments de bond-graph appartenant à ce chemin correspondent aux rôles fonctionnels de la cofonction.

Nous allons voir maintenant la structure de données retenue puis l'algorithme de suivi de l'effort (ou du flux) dans le bond-graph permettant de construire en parallèle les cofonctions des processus.

3.2.1 Structure des données

Pour pouvoir réaliser cette construction nous décrivons chaque bond grâce à un quintuplet $(Id1, Id2, Tv1, Tv2, Ide)$ dans lequel $Id1$ correspond à l'identificateur de l'élément de bond-graph délivrant l'énergie, $Id2$ correspond à celui de l'élément de bond-graph recevant l'énergie, $Tv1$ et $Tv2$ au type respectif de $Id1$ et de $Id2$ (source, résistance, capacité, inertie, gyrateur ou transformateur) et Ide correspond à l'identificateur ($Id1$ ou $Id2$) de l'élément recevant l'effort c'est-à-dire celui qui porte la barre de causalité du bond décrit. A partir de cette structure, on décrit donc le sens de l'échange (positif de $Id1$ vers $Id2$) et la causalité (grâce à la variable Ide). La figure 3.5 présente quelques exemples de bond et les quintuplets associés.

Bonds	Quintuplets
S1 \longrightarrow J1	(S1,J1,source,jonction,J1)
J2 \longleftarrow R	(J2,R,jonction,résistance,J2)
I \longleftarrow J3	(J3,I,jonction,inertie,I)
C \longleftarrow J4	(J4,C,jonction,capacité,J4)

FIG. 3.5 – Exemple de quintuplets décrivant des bonds

3.2.2 Sélection des points de départ des cofonctions

Les points de départ des cofonctions sont des sources apportant de l'énergie dans le bond-graph ou des éléments de stockage. Nous construisons donc deux ensembles, le premier contenant les éléments de type source (ens_source) et le second contenant l'ensemble des éléments de stockage ($ens_stockage$). Si l'on appelle $ensemble_bonds$ l'ensemble des quintuplets décrivant le bond-graph alors on peut construire ens_source et $ens_stockage$ de la façon suivante :

Pour tout $(Id1, Id2, Tv1, Tv2, Ide)$ appartenant à $ensemble_bonds$

- si $Tv1$ est du type source alors $ens_source = ens_source \cup \{(Id1, Id2, Tv1, Tv2, Ide)\}$
- si $Tv2$ est du type capacité ou inertie alors $ens_stockage = ens_stockage \cup \{(Id1, Id2, Tv1, Tv2, Ide)\}$

Une source apporte de l'énergie dans le bond graph. Le bond représentant la connexion d'une source à une jonction aura toujours l'identificateur de cette source en première position (dans le cas contraire ce serait un puits). Le type de $Tv1$ est donc source.

Par convention les éléments de stockage sont toujours représentés comme recevant de l'énergie. Le bond représentant la connexion d'un élément de stockage à une jonction aura toujours l'identificateur de cet élément de stockage en seconde position. Le type de $Tv2$ est donc capacité ou inertie.

3.2.3 Suivi de l'effort dans un bond-graph

Pour suivre un chemin imposant un effort on va partir d'un élément, jouant le rôle d'une source, imposant un effort. Nous allons décrire la procédure de suivi de l'effort en partant d'un élément de l'ensemble ens_source . Cette source d'effort est décrite par un quintuplet de la forme $(Id1, Id2, Tv1, Tv2, Ide)$ ¹³. Dans ce cas le quintuplet est de la forme : $(Id1, Id2, source, jonction, Id2)$, et $Id1$ est le premier élément de la cofonction (cofonction_courante = $\{Id1\}$). Ce quintuplet définit le bond entre la source et une jonction, nous allons ensuite chercher à partir de la jonction quels sont les successeurs (chemins) possibles sur lesquels on impose un effort. Ces successeurs seront de la forme $(Id2, Idx, jonction, Tv x, Idx)$.

Suivant le type de Idx on poursuivra l'exploration du graphe, on ajoutera des éléments dans la cofonction et/ou on terminera un chemin.

D'une façon générale on cherchera les successeurs d'un élément Id sur lesquels Id impose un effort.

Tant qu'il existe un successeur Idx de Id :

- Si Tvx est du type jonction :
 - on recherchera les successeurs de Idx sur lesquels Idx impose un effort.
- Si Tvx est du type capacité ou inertie :
 - Idx est ajouté à la cofonction en cours de construction :
cofonction_courante = cofonction_courante \cup $\{Idx\}$.
 - Comme les éléments de stockage définissent des puits, ils sont les derniers éléments de la cofonction, celle-ci doit donc être enregistrée :
ens_cofonction = ens_cofonction \cup $\{cofonction_courante\}$.
 - On retourne au précédent point de choix pour explorer d'autres successeurs.
- Si Tvx est du type source :
 - Idx est ajouté à la cofonction en cours de construction :
cofonction_courante = cofonction_courante \cup $\{Idx\}$.

13. Si l'on part d'un élément de stockage imposant l'effort alors le quintuplet est de la forme $(Id1, Id2, jonction, capacite\ ou\ inertie, Id1)$

- Comme nous cherchons des successeurs en suivant le sens positif des bonds Idx est donc en seconde position : il définit un puits, il est le dernier élément de la cofonction, celle-ci doit donc être enregistrée : $ens_cofonction = ens_cofonction \cup \{cofonction_courante\}$.
- On retourne au précédent point de choix pour explorer d'autres successeurs.
- Si Tvx est du type résistance :
 - Idx est ajouté à la cofonction en cours de construction : $cofonction_courante = cofonction_courante \cup \{Idx\}$.
 - On repart ensuite de la résistance en recherchant les successeurs sur lesquels la résistance impose le flux.

S'il n'existe pas (ou plus) de successeur on retourne au précédent point de choix pour explorer d'autres successeurs.

Cette procédure n'est valable que si l'on suit des chemins sur lesquels le transfert d'énergie est positif. Si l'on recherche aussi les chemins négatifs (en particulier pour les éléments de stockages) alors les "successeurs" sont du type : $(Idx, Id2, Tvx, Tv2, Idx)$. Dans ce cas, si Tvx est du type source, Idx ne définit plus un puits, il ne peut donc pas terminer une cofonction valide. On doit donc ajouter un test pour vérifier que le « successeur » ne contient pas un élément source en première position. Dans le cas contraire, on continue la procédure.

Le cas où Idx est une résistance est en réalité un peu plus compliqué. Dans [Borne et al.(1992)] on peut voir que construire des cofonctions à partir d'un bond-graph correspond en fait à rechercher des chemins causaux et des boucles causales. Une boucle causale du type *source - resistance* correspond à une dissipation d'énergie vers un puits infini implicite en aval de la résistance. Un chemin causal du type *source1 - resistance - source2* correspond à un transfert d'énergie de *source1* vers *source2* traversant *resistance*. Si l'on peut construire parallèlement une boucle *source1 - resistance* alors cette boucle correspond à une dissipation d'énergie lors du transfert d'énergie de *source1* vers *source2*. Dans une cofonction, cette dissipation est décrite implicitement puisque les rôles fonctionnels associés aux éléments du type résistance sont des conduits de flux ou d'effort avec dissipation. Il n'est donc pas nécessaire de décrire une boucle causale explicitement si la cofonction qu'elle définit est incluse dans une cofonction décrivant un chemin causal.

Pour éviter de décrire deux fois cette dissipation (une fois dans la boucle causale et une fois dans le chemin) il faudra vérifier si les cofonctions se terminant par une résistance sont des boucles causales contenues par ailleurs dans d'autres cofonctions (dans ce cas il est inutile de les conserver), ou si elles définissent des dissipations indépendantes de tout transfert (dans ce cas, on veut les conserver).

3.2.4 Suivi du flux dans un bond-graph

Pour la construction des cofonctions en partant d'une source de flux, la procédure est globalement la même. Les deux types de points de départ seront des quintuplets de la forme :

- $(Id1, Id2, source, jonction, Id1)$ pour un élément de `ens_source`.
- $(Id1, Id2, jonction, capaciteouinertie, Id2)$ pour un élément de `ens_stockage`.

Les successeurs recherchés en suivant le flux seront :

- $(Id2, Idx, Tv2, Tvx, Id2)$ pour le sens positif.
- $(Idx, Id2, Tvx, Tv2, Id2)$ pour le sens négatif.

Dans la procédure définie dans la section 3.2.3 la seule modification concerne le cas où Tvx correspond au type résistance. Dans ce cas, les successeurs recherchés seront ceux sur lesquels l'élément résistif impose un effort.

3.2.5 Cas des transformateurs et des gyrateurs

Les éléments de type transformateur ou gyrateur peuvent être vus comme des conduits sans dissipation d'énergie (ce sont des éléments conservatifs d'énergie).

Ces éléments sont surtout utilisés dans nos applications pour permettre le passage de l'énergie d'un domaine physique à un autre. Par exemple, on peut utiliser un transformateur pour représenter la transformation de l'énergie électrique en énergie thermique par effet Joule. Nous avons donc pris le parti de les décrire comme une combinaison de sources. L'une spécifie la consommation d'énergie dans le domaine délivrant cette énergie, l'autre représente l'apport d'énergie dans le domaine recevant cette énergie. Le sens de transfert à travers un transformateur ou un gyrateur peut, suivant le cas, ne pas être unique. Ces deux sources peuvent donc être considérées comme des sources, elles sont alors des points de départ de cofonctions, ou comme des puits, elles permettent alors de terminer les cofonctions.

3.2.6 Implémentation

Cette méthode de construction des cofonctions à partir d'un bond-graph a été programmée en C. Nous avons testé ce programme sur notre application (qui est présentée dans la dernière partie de ce rapport) ainsi que sur le bond-graph du pressuriseur d'un réacteur à eau pressurisée. Les cofonctions obtenues dans le cas du pressuriseur correspondent à celles construites à la main dans [Zouaoui(1998)], elles ont permis de construire des processus qui ont été à la base d'une méthode d'interprétation du comportement du pressuriseur. Dans le cas de notre application, les cofonctions obtenues ont toutes pu être interprétées (voir quatrième partie).

3.3 Construction des conditions et des effets

Un processus décrit un transfert d'énergie, partant d'une source, se terminant par un puits, et se déroulant à travers une succession de rôles fonctionnels. Ce transfert est effectif lorsque les conditions d'activation du processus sont vérifiées. Ces conditions d'activation sont donc les conditions qui permettent à la source de fournir de l'énergie au système et au puits de la recevoir. Elles sont donc liées principalement au rôle fonctionnel tenant lieu de source, c'est à dire soit un générateur (d'effort ou de flux) soit un réservoir (d'impulsion ou de déplacement), et à celui tenant lieu de puits. Par conséquent ces conditions dépendent de l'élément de bond-graph associé à ce rôle fonctionnel (tenant lieu de source ou de puits) et à la jonction sur laquelle est connecté cet élément.

En effet, lors de l'activation d'une source, le transfert s'effectue vers la jonction, pour un puits ce transfert s'effectue depuis la jonction, ce sont donc les bilans sur ces deux jonctions qui vont définir les conditions nécessaires à la réalisation du transfert d'énergie. Il nous faut donc nous intéresser au type de la source (source ou élément de stockage), à la causalité imposée sur la jonction (effort ou flux) et au type de la jonction (0 ou 1).

3.3.1 Conditions de déchargement

Dans le cas d'un élément de stockage (C ou I), la variable (effort ou flux) imposée par cet élément à la jonction n'a pas de valeur fixe.

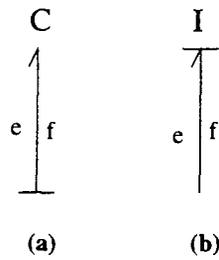
En régime stationnaire, les éléments de stockage n'échangent pas d'énergie avec le système, il n'y a pas de variation susceptible de faire évoluer la variable (effort ou flux) qu'ils imposent sur la jonction à laquelle ils sont connectés.

Si l'on se place en régime transitoire, on constate un déséquilibre du bilan d'effort ou de flux sur la jonction. Dans ce cas, un élément de stockage délivrera ou consommera de l'énergie pour revenir à un point d'équilibre, pour rétablir un bilan de flux ou d'effort nul.

Les conditions de déchargement lorsque les éléments sont en causalité intégrale (figure 3.6) sont les suivantes :

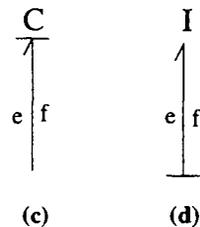
- *Cas (a)* : Pour une capacité en causalité intégrale, l'équation constitutive s'écrit : $e = \frac{1}{C} \cdot \int f \cdot dt$. Dans ce cas, un déchargement aura lieu lorsque $f < 0$, l'effet sera une diminution de l'effort (e diminue).
- *Cas (b)* : Pour une inertie en causalité intégrale, l'équation constitutive s'écrit : $f = \frac{1}{I} \cdot \int e \cdot dt$. Dans ce cas, un déchargement aura lieu lorsque $e < 0$, l'effet sera une diminution du flux (f diminue).

Les conditions de déchargement lorsque les éléments sont en causalité dérivée

FIG. 3.6 – *Eléments de stockage en causalité intégrale*

(figure 3.7) sont les suivantes :

- *Cas (c)* : Pour une capacité en causalité dérivée, l'équation constitutive s'écrit : $f = C \cdot \frac{de}{dt}$. Dans ce cas, un déchargement aura lieu lorsque e diminue, l'effet sera un flux négatif ($f < 0$).
- *Cas (d)* : Pour une inertie en causalité dérivée, l'équation constitutive s'écrit : $e = I \cdot \frac{df}{dt}$. Dans ce cas, un déchargement aura lieu lorsque f diminue, l'effet sera un effort négatif ($e < 0$).

FIG. 3.7 – *Eléments de stockage en causalité dérivée*

3.3.2 Conditions de chargement

De la même manière que l'on s'est intéressé aux conditions de déchargement on peut s'intéresser aux conditions de chargement. Un élément de stockage se chargera quand la puissance apportée à cet élément sera positive ($e * f > 0$). Lorsque les éléments sont en causalité intégrale, cas (a) et (b) figure 3.6, on peut déterminer les conditions et les effets à partir de l'équation constitutive des éléments correspondants.

- Pour une capacité en causalité intégrale, cas (a), l'équation constitutive s'écrit : $e = \frac{1}{C} \cdot \int f \cdot dt$. Dans ce cas, un chargement aura lieu lorsque $f > 0$, l'effet sera une augmentation de l'effort (e augmente).

- Pour une inertie en causalité intégrale, cas (b), l'équation constitutive s'écrit : $f = \frac{1}{T} \cdot \int e \cdot dt$. Dans ce cas, un chargement aura lieu lorsque $e > 0$, l'effet sera une augmentation du flux (f augmente).

Lorsque les éléments sont en causalité dérivée, cas (c) et (d) figure 3.7, on peut aussi déterminer les conditions et les effets à partir de l'équation constitutive des éléments correspondants.

- Pour une capacité en causalité dérivée, cas (c), l'équation constitutive s'écrit : $f = C \cdot \frac{de}{dt}$. Dans ce cas, un chargement aura lieu lorsque e augmente, l'effet sera un flux positif ($f > 0$).
- Pour une inertie en causalité dérivée, cas (d), l'équation constitutive s'écrit : $e = I \cdot \frac{df}{dt}$. Dans ce cas, un chargement aura lieu lorsque f augmente, l'effet sera un effort positif ($e > 0$).

3.3.3 Conditions de transfert

A partir des conditions de chargement et de déchargement décrites dans les sections précédentes on peut déduire les conditions de transfert correspondant aux conditions d'activation des processus. Les liens entre les différentes variables associées aux éléments d'une cofonction peuvent être de quatre types :

1. a AGIT(+) b : L'expression AGIT permet de relier les sens de variation des variables a et b . Le signe entre parenthèses correspond au sens de l'influence, a AGIT(+) b signifie que si a augmente, b aura tendance à augmenter. a AGIT(-) b signifie que si a augmente, b aura tendance à diminuer. a peut ne pas être la seule variable influençant le sens de variation de b , le sens de variation de b ne peut être connu qu'à partir de l'étude de toutes les variables l'influencent.
2. a CONTRIBUE(+) b : L'expression CONTRIBUE permet de relier les signes des variables a et b . Le signe entre parenthèses correspond au sens de l'influence, ainsi, a CONTRIBUE(+) b signifie que si $a > 0$ alors b a tendance à le devenir. a CONTRIBUE(-) b signifie que si $a > 0$ alors b a tendance à devenir négatif. Comme précédemment, le signe de b ne peut être connu qu'à partir de l'étude de toutes les variables l'influencent.
3. a PRODUIT(+) b : L'expression PRODUIT permet de relier le signe de la variable a au sens de variation de b . Le signe entre parenthèses correspond au sens de l'influence. Ainsi, a PRODUIT(+) b signifie que si $a > 0$ alors b a tendance à augmenter. a PRODUIT(-) b signifie que si $a > 0$ alors b a tendance à diminuer. Le sens de variation de b ne peut être connu qu'à partir de l'étude de toutes les variables l'influencent.

4. a DERIVE(+) b : L'expression DERIVE permet de relier le sens de variation de la variable a au signe de b . Le signe entre parenthèses correspond au sens de l'influence. Ainsi, a DERIVE(+) b signifie que si a augmente alors b a tendance à devenir positif. a DERIVE(-) b signifie que si a diminue alors b a tendance à devenir négatif. Comme précédemment, le signe de b ne peut être connu qu'à partir de l'étude de toutes les variables l'influençant.

Toute cofonction peut s'écrire sous la forme $S1 - R - S2$, $S1 - S2$ ou $S1 - R$. $S1$ et $S2$ correspondent à des éléments tenant lieu de sources ou de puits et R correspond à un élément de type résistif. En effet, toutes les cofonctions commencent toujours par une source et se terminent par un puits, le seul type d'élément susceptible de s'insérer dans une cofonction entre deux sources est un élément résistif. Si plusieurs éléments résistifs font partie du chemin causal définissant une cofonction on peut toujours les regrouper sous la forme d'une résistance globale (combinaison de résistances en série et en parallèle).

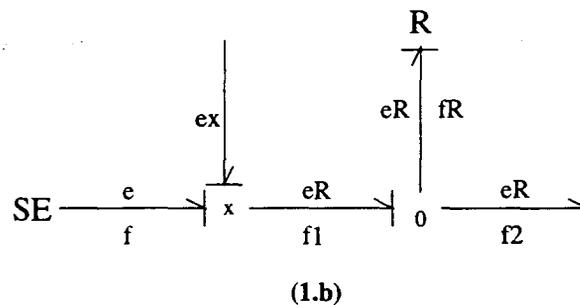
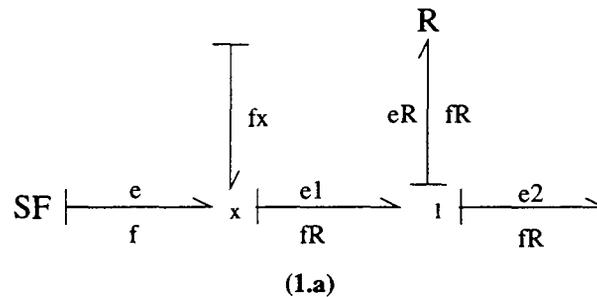


FIG. 3.8 – Transfert entre source et résistance (dissipation d'énergie)

Si l'on examine les cofonctions du type $S1 - R$, elles correspondent à des bond-graphs décrits dans les figures 3.8 et 3.9. Dans ces bond-graphs, f_x symbolise la somme des flux rencontrés sur le chemin causal et e_x la somme des efforts rencontrés.

- Dans le cas (1.a), la source est une source de flux ce qui impose que la

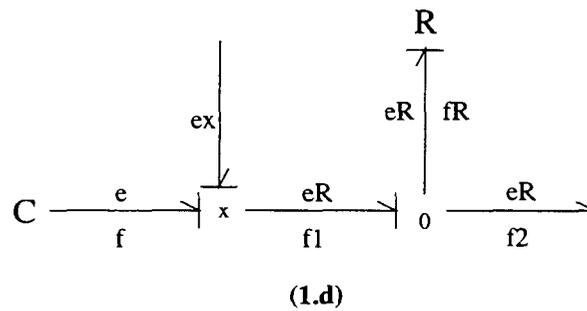
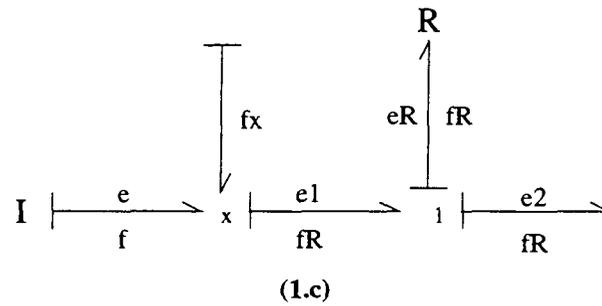


FIG. 3.9 – Transfert entre élément de stockage et résistance (dissipation d'énergie)

résistance fixe l'effort. La condition d'activation est $f + f_x > 0$, l'équation constitutive de R ($e_R = R.f_R$) nous permet de déduire l'effet qui est $e_R > 0$.

- Dans le cas (1.b), la source est une source d'effort ce qui impose que la résistance impose le flux. La condition d'activation est $e + e_x > 0$, l'équation constitutive de R ($f_R = \frac{e_R}{R}$) nous permet de déduire l'effet qui est $f_R > 0$.
- Dans le cas (1.c), la « source » est un élément inertiel, qui fixe le flux, ce qui impose que la résistance fixe l'effort. La condition d'activation est $f + f_x > 0$, l'équation constitutive de R ($e_R = R.f_R$) nous permet de déduire l'effet qui est $e_R > 0$.
- Dans le cas (1.d), la « source » est un élément capacitif, qui fixe l'effort, ce qui impose que la résistance impose le flux. La condition d'activation est $e + e_x > 0$, l'équation constitutive de R ($f_R = \frac{e_R}{R}$) nous permet de déduire l'effet qui est $f_R > 0$.

Lorsque les éléments de stockage sont en causalité dérivée, les cas (1.c) et (1.d) deviennent :

- Dans le cas (1.e), la « source » est un élément inertiel qui fixe l'effort, ce qui impose que la résistance fixe le flux. La condition d'activation est $e + e_x > 0$,

l'équation constitutive de R ($f_R = \frac{e_R}{R}$) nous permet de déduire l'effet qui est $f_R > 0$.

- Dans le cas (1.f), la « source » est un élément capacitif qui fixe le flux, ce qui impose que la résistance impose l'effort. La condition d'activation est $f + f_x > 0$, l'équation constitutive de R ($e_R = R.f_R$) nous permet de déduire l'effet qui est $e_R > 0$.

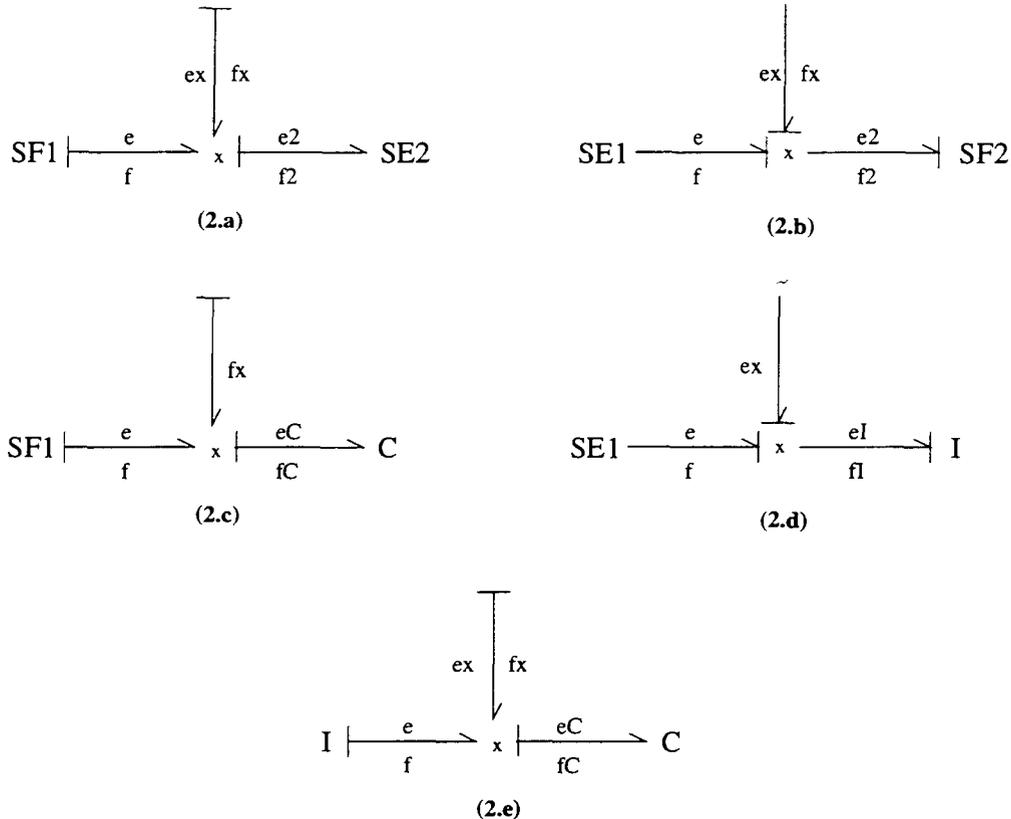


FIG. 3.10 - Transfert entre deux sources

Si l'on examine les cofonctions du type $S1 - S2$, elles correspondent aux bond-graph décrits dans la figure 3.10.

- Dans le cas (2.a), la première source est une source de flux ce qui impose que la seconde soit un puits d'effort (ici un élément de type source). La condition d'activation est $f > 0$, elle nous permet de déduire l'effet qui est $e_2 > 0$.
- Dans le cas (2.b), la première source est une source d'effort ce qui impose que la seconde soit un puits de flux (ici un élément de type source). La condition d'activation est $e > 0$, elle nous permet de déduire l'effet qui est $f_2 > 0$.

- Dans le cas (2.c), la première source est une source de flux ce qui impose que la seconde soit un puits d'effort (ici une capacité). La condition d'activation devrait être $f + f_x > 0$, l'équation constitutive de la capacité en causalité intégrale ($e_C = \frac{1}{C} \cdot \int f_C \cdot dt$) nous permettrait de déduire l'effet qui est e_C augmente. En pratique, un élément de stockage peut être chargé ou déchargé via plusieurs chemins causaux. Grâce aux processus, on cherche à identifier les transferts ayant effectivement lieu. Si l'on conserve cette condition, on ne pourra visualiser les transferts couplés à une accumulation d'énergie. La condition effective de transfert vers C se réduit à $f > 0$ ($f + f_x > 0$ est la condition d'accumulation), l'effet est f CONTRIBUE(+) f_C et f_C PRODUIT(+) e_C . Si les rôles de puits et de source étaient échangés entre la source et la capacité, la condition serait $f < 0$, l'effet f CONTRIBUE(+) f_C et f_C PRODUIT(+) e_C . Si l'on remplace l'élément capacitif par un élément inertiel en causalité dérivée, les conditions d'activation deviennent f augmente ou f diminue, l'effet sera f AGIT(+) f_I et f_I DERIVE(+) e_I (l'équation constitutive est dans ce cas $e_I = I \cdot \frac{df_I}{dt}$).
- Dans le cas (2.d), la première source est une source d'effort ce qui impose que la seconde soit un puits de flux (ici une inertie). La condition d'activation du transfert est $e > 0$ (la condition d'accumulation est $e + e_x > 0$), l'équation de bilan et l'équation constitutive de l'inertie en causalité intégrale ($f_I = \frac{1}{I} \cdot \int e_I \cdot dt$) nous permettent de déduire l'effet e CONTRIBUE(+) e_I et e_I PRODUIT(+) f_I . Si les rôles de puits et de source étaient échangés entre la source et l'inertie, la condition de transfert serait $e < 0$, les effets sont inchangés. Si l'on remplace l'élément inertiel par un élément capacitif en causalité dérivée, les conditions d'activation deviennent e augmente ou e diminue, l'effet sera e AGIT(+) e_C et e_C DERIVE(+) f_C (l'équation constitutive est dans ce cas $f_C = C \cdot \frac{de_C}{dt}$).
- Dans le cas (2.e), la première source est une source de flux (ici une inertie) ce qui impose que la seconde soit un puits d'effort (ici une capacité). La condition de transfert vers C est $f > 0$ ($f + f_x > 0$ est la condition d'accumulation), l'effet est f CONTRIBUE(+) f_C et f_C PRODUIT(+) e_C . Si les rôles de source et de puits étaient échangés entre l'inertie et la capacité, la condition serait $e > 0$ (la condition d'accumulation serait $e + e_x > 0$), l'effet e CONTRIBUE(+) e_I et e_I PRODUIT(+) f_I .

Si l'on examine les cofonctions du type $S1 - R - S2$, elles correspondent aux bond-graphs décrits dans les figures 3.11, 3.12 et 3.13.

- Le cas (3.a) correspond à un processus de transfert. Ce transfert s'effectue si $f_1 - f_2 > 0$, son effet est $e_R > 0$.

- Le cas (3.b) correspond à un processus de transfert. Ce transfert s'effectue si $e_1 - e_2 > 0$, son effet est $f_R > 0$.
- Le cas (3.c) correspond à un processus de chargement. Pour charger I il faut que $e_I > 0$ donc $e_R + e_y > 0$, le transfert s'effectue de SF vers I si $f_1 - f_2 > 0$ (pour que $e_R = R.(f_1 - f_2) > 0$). Les effets de ce transfert sont $e_R > 0$, e_R CONTRIBUE(+) e_I et e_I PRODUIT(+) f_I .
- Le cas (3.d) correspond à un processus de chargement. Pour charger C il faut que $f_C > 0$ donc $f_R - f_y > 0$, le transfert s'effectue de SE vers C si $e_1 - e_2 > 0$ (pour que $f_R = 1/R.(e_1 - e_2) > 0$). Les effets de ce transfert sont $f_R > 0$, f_R CONTRIBUE(+) f_C et f_C PRODUIT(+) e_C .
- Le cas (3.e) correspond à un processus de chargement / déchargement. Pour charger I_2 il faut que $e_I > 0$ donc $e_R + e_y > 0$, le transfert s'effectue de I_1 vers I_2 si $f_1 - f_2 > 0$ (pour que $e_R = R.(f_1 - f_2) > 0$). Les effets de ce transfert sont $e_R > 0$, e_R CONTRIBUE(+) e_I et e_I PRODUIT(+) f_I .
- Le cas (3.f) correspond à un processus de chargement / déchargement. Pour charger $C2$ il faut que $f_C > 0$ donc $f_R + f_y > 0$, le transfert s'effectue de $C1$ vers $C2$ si $e_1 - e_2 > 0$ (pour que $f_R = 1/R.(e_1 - e_2) > 0$). Les effets de ce transfert sont $f_R > 0$, f_R CONTRIBUE(+) f_C et f_C PRODUIT(+) e_C .

En pratique, on voit que l'on a pu construire d'autres cofonctions que celles proposées par Chittaro. En effet, certaines cofonctions du type *source1-resistance* correspondent à des dissipations lors d'un transfert de type *source1 - source2*. Pour Chittaro ces deux processus seraient regroupés sous la forme *source1 - R - source2*. Néanmoins, comme cette nouvelle cofonction ne définit plus un chemin causal à proprement parler nous ne les regroupons pas.

3.3.4 Conditions de fonctionnement

Enfin, un dernier type de condition d'activation entrant en jeu dans la définition d'un processus est la condition de fonctionnement. Ce type de condition permet de décrire les évolutions discrètes du système, qui sont indépendantes de la physique décrite par le modèle et sont dues à des interventions extérieures (actions de contrôle / commande). Grâce à ces conditions on peut décrire que l'état d'une vanne (ouverte/fermée) influence l'état du processus indépendamment de la possibilité physique d'actionner ce processus (différence de pression aux bornes de la vanne).

3.4 Liens entre processus

Les liens entre processus définis par Chittaro sont de trois types: *causalité directe*, *régulation* et *support*. Dans certains cas il est nécessaire de spécifier que

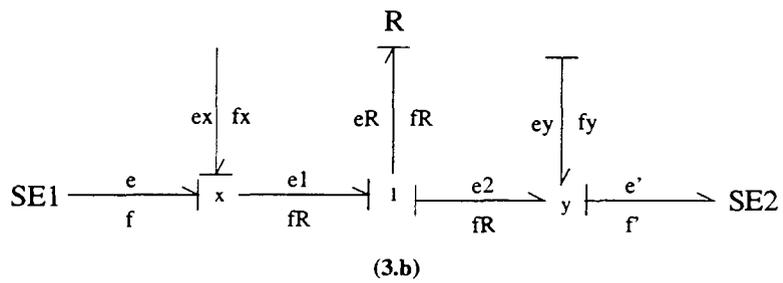
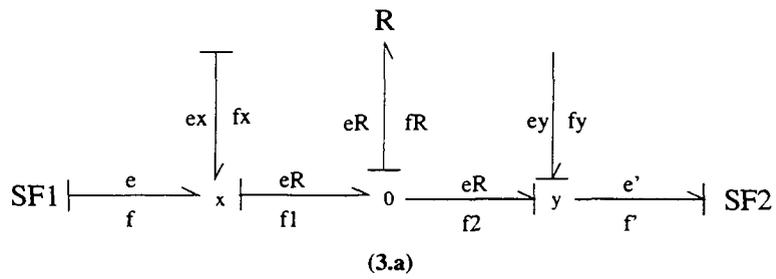


FIG. 3.11 - Transfert entre deux sources cas (3.a) et (3.b)

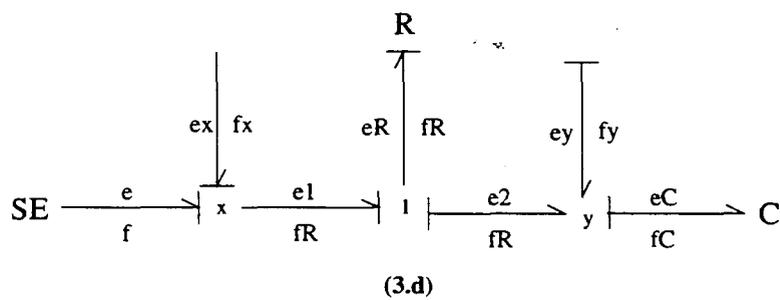
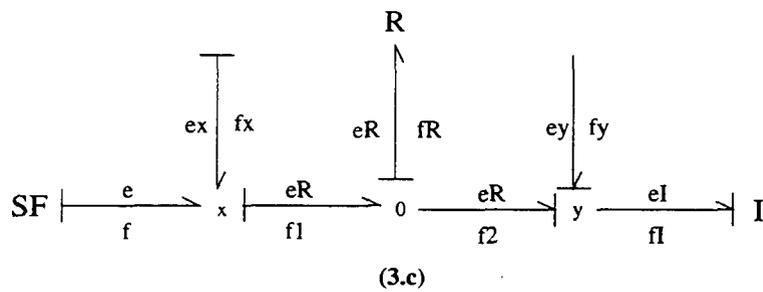


FIG. 3.12 - Transfert entre deux sources cas (3.c) et (3.d)

certaines processus ne peuvent pas et ne pourront jamais avoir lieu en même temps. Pour cela on introduit un lien d'exclusivité entre processus.

3.4.1 Lien d'exclusivité mutuelle

Ce type de lien est utile lors de l'utilisation du modèle des processus pour spécifier que l'activité d'un processus empêche l'activité d'un autre. Cette exclusivité peut être due à trois causes différentes : les conditions d'activation des processus sont incompatibles, leurs effets sont incompatibles ou les hypothèses de fonctionnement des composants sont incompatibles.

– *Exclusivité mutuelle par les conditions :*

Deux processus P_i et P_j seront dit mutuellement exclusifs par leurs conditions s'il existe une condition c_k du processus P_i et une condition c_l du processus P_j telles que c_k et c_l soient contradictoires.

Deux processus qui nécessitent que le système soit dans deux états incompatibles ne peuvent avoir lieu en même temps.

– *Exclusivité mutuelle par les effets :*

Deux processus P_i et P_j seront dit mutuellement exclusifs par leurs effets s'il existe un effet e_k du processus P_i et un effet e_l du processus P_j tels que e_k et e_l sont contradictoires.

L'utilisation d'une telle définition peut poser un problème en ce qui concerne les variables d'impulsion et de déplacement qui correspondent à des « intégrations » des variables d'effort et de flux (dans un élément de stockage). Ainsi, si deux processus ont des effets différents sur une variable d'impulsion ou de déplacement, ils ne sont pas forcément incompatibles. Car, lorsque l'on décrit l'influence d'un processus sur une variable de déplacement on ne décrit qu'une influence *partielle* et en aucun cas la somme des influences de tous les processus. Ainsi, deux processus peuvent avoir une influence différente sur une variable de déplacement sans être incompatibles : on peut charger un réservoir par un conduit et le décharger par un autre les deux influences sur le niveau sont opposées mais elles ne sont pas contradictoires. A l'inverse si l'on charge un réservoir par un conduit et qu'on le décharge par ce même conduit, alors les deux processus sont exclusifs car ils imposent un signe différent pour la variable de flux dans le conduit.

– *Exclusivité mutuelle par les rôles fonctionnels :*

A un composant possédant deux modes opérationnels différents seront associés deux rôles fonctionnels qui ne peuvent coexister simultanément. Tout processus contenant dans sa fonction un de ces rôles fonctionnel sera donc exclusif de tout processus contenant dans sa fonction l'autre rôle fonctionnel.

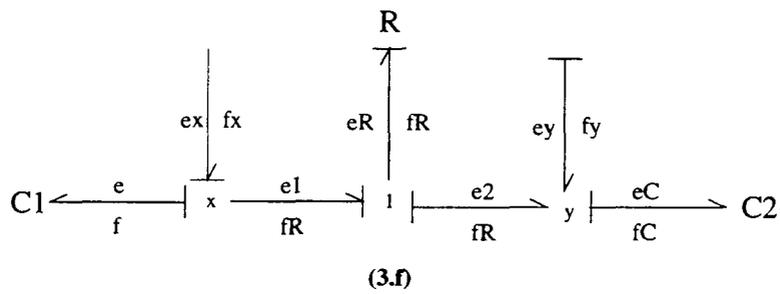
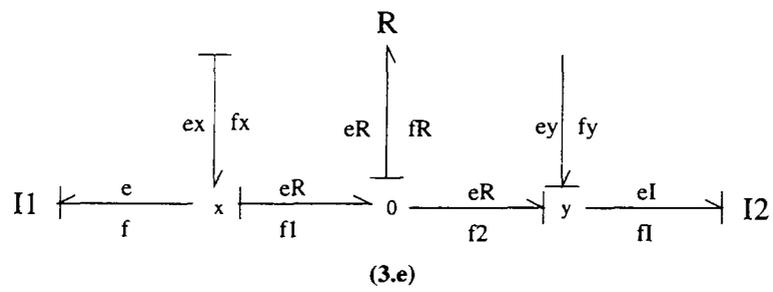


FIG. 3.13 - Transfert entre deux sources cas (3.e) et (3.f)

4

Modèle des phénomènes et modèle téléologique

A partir du modèle des processus, on peut construire un **modèle des phénomènes** (ontologie à base de systèmes). Dans ce modèle, les processus sont associés de façon à réaliser un phénomène. Un phénomène peut être associé à un seul processus ou représenter la conjonction de plusieurs processus, plusieurs conjonctions différentes de processus peuvent réaliser le même phénomène. Chaque phénomène est décrit à partir d'un ensemble de processus et de conditions qui sont nécessaires à sa réalisation et d'un ensemble d'effets qui sont les conséquences de sa réalisation.

Nous décrivons les phénomènes sous la forme suivante :

- *Organisation*: décrit la ou les conjonctions de processus nécessaire(s) à la réalisation du phénomène.
- *Conditions*: décrit le contexte nécessaire à la réalisation du phénomène.
- *Effets*: décrit les effets de la réalisation du phénomène.
- *Support*: définit les phénomènes dont la **réalisation** supporte la réalisation du phénomène décrit (cette notion de support est précisée dans le paragraphe suivant).

La réalisation d'un phénomène repose sur l'activité des processus de son organisation dans un contexte défini par ses conditions. Ses conditions sont définies par des variables qui possèdent chacune un domaine de définition. On peut donc définir, pour une organisation donnée, plusieurs phénomènes décrivant chacun le comportement des processus de l'organisation dans un contexte différent. De même, on peut, dans un contexte donné, représenter les différents comportements d'un phénomène, ces comportements sont alors associés chacun à une organisation différente. Ces idées nous ont conduit à définir la notion de phénomène alternatif qui sera étudiée en détail dans le chapitre 3 de la troisième partie de ce rapport.

4.1 Liens entre phénomènes

Le modèle des phénomènes est construit en utilisant les différents liens qui permettent d'associer les phénomènes. Deux phénomènes peuvent être reliés dans le modèle des phénomènes si :

- Un même processus appartient à l'organisation de chacun des phénomènes.
- Il existe une relation de causalité directe, de régulation ou de support entre deux processus appartenant chacun à l'organisation de l'un des phénomènes.

Nous avons introduit un autre lien au niveau des phénomènes : le lien support. Ce lien va nous permettre de spécifier que la perte d'une fonction support (représentée par un phénomène) entraînera, à terme, la perte de la (ou des) fonction(s) dont la réalisation nécessite l'existence de ce support.

4.1.1 Lien de support

Un support d'un phénomène est une condition explicite ou implicite à sa réalisation (ou éventuellement à l'activation d'un des processus de son organisation). Un phénomène PH_i sera un phénomène support d'un phénomène PH_j si un des effets de PH_i correspond à une condition implicite ou explicite de PH_j ou si l'effet de PH_i correspond à une condition implicite ou explicite d'un des processus de l'organisation de PH_j . La réalisation d'un phénomène PH peut demander la satisfaction conjointe de plusieurs supports. Un ou plusieurs phénomènes peuvent satisfaire séparément l'une de ces conditions implicites ou explicites. Ce lien ne doit pas être confondu avec le lien de causalité directe. Il est utile justement lorsque c'est l'effet d'un phénomène PH_i qui correspond aux conditions d'un autre phénomène PH_j ou aux conditions d'un des processus de l'organisation de PH_j . Eventuellement, ces liens de supports peuvent être définis par expertise. En particulier les conditions implicites sont liées aux choix de modélisation effectués lors de la description des phénomènes.

4.2 Modèle téléologique

Nous n'avons pas introduit de nouveau concept dans la description du modèle téléologique. Nous décrivons le modèle téléologique à partir de buts principaux du système, des sous-buts qui permettent de préciser les buts principaux et des phénomènes qui sont associés aux buts ou sous buts et dont la réalisation est nécessaire pour les atteindre (voir section 1.3.2).

5

Exemple récapitulatif

Nous allons dans ce chapitre présenter un exemple didactique de construction de processus et de phénomènes. Dans la dernière partie de ce rapport nous présentons, sur une application industrielle, les méthodes de construction du modèle comportemental (à base de bond-graph) et des différents modèles de l'approche multi-modèles.

5.1 Construction des processus

Si l'on reprend l'exemple décrit dans la figure 2.7 en section 2.5 alors, à partir du bond-graph on peut identifier les quatre cofonctions suivantes :

1. $SF_1 - C_a$ qui en terme de rôles fonctionnels donne : $Gf_1 - R_1^q$
2. $C_a - SF_2$ qui en terme de rôles fonctionnels donne : $R_1^q - Gf_2$
3. $C_a - R - C_b$ qui en terme de rôles fonctionnels donne : $R_1^q - C^f - R_2^q$
4. $C_b - SF_3$ qui en terme de rôles fonctionnels donne : $R_2^q - Gf_3$

La cofonction 1 définit un transfert de type 2.c, sa condition porte sur le flux imposé par la source 1 : $Q_1 > 0$, l'effet est Q_1 CONTRIBUE(+) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a .

La cofonction 2 définit un transfert de type 2.c, sa condition porte sur le flux imposé par la source 2 : $Q_2 > 0$, l'effet est Q_2 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a .

La cofonction 3 définit un transfert de type 3.f, sa condition porte sur le bilan d'effort sur la résistance : $P_a - P_b \geq 0$ pour un transfert du réservoir a vers le réservoir b , l'effet est $Q_3 \geq 0$, Q_3 CONTRIBUE(+) Q_b , Q_b PRODUIT(+) P_b , Q_3 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a . Pour cette cofonction on peut aussi décrire un autre processus représentant un transfert de b vers a et ayant

pour condition $P_a - P_b < 0$. Dans ce cas l'effet est $Q_3 < 0$, Q_3 CONTRIBUE(+) Q_b , Q_b PRODUIT(+) P_b , Q_3 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a .

La cofonction 3 définit un transfert de type 2.c, sa condition porte sur le flux imposé par la source 2: $Q_4 > 0$, l'effet est Q_4 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a .

On peut donc construire les cinq processus suivants :

Processus P1 :

Cofonction: $SF_1 - C_a$

Condition d'activation: $Q_1 > 0$

Effets: Q_1 CONTRIBUE(+) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a

Processus P2 :

Cofonction: $C_a - SF_2$

Condition d'activation: $Q_2 > 0$

Effets: Q_2 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a

Processus P3 :

Cofonction: $C_a - R - C_b$

Condition d'activation: $P_a - P_b \geq 0$

Effets: $Q_3 \geq 0$, Q_3 CONTRIBUE(+) Q_b , Q_b PRODUIT(+) P_b , Q_3 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a

Processus P3' :

Cofonction: $C_a - R - C_b$

Condition d'activation: $P_a - P_b < 0$

Effets: $Q_3 < 0$, Q_3 CONTRIBUE(+) Q_b , Q_b PRODUIT(+) P_b , Q_3 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a

Processus P4 :

Cofonction: $C_b - SF_3$

Condition d'activation: $Q_4 > 0$

Effets: Q_4 CONTRIBUE(-) Q_a et Q_a PRODUIT(+) P_a

Les processus 3 et 3' définissent une famille puisque le domaine de définition de la condition d'activation est complètement décrit, ils sont mutuellement exclusifs par leur condition (et leur effet).

A partir de ces processus on va s'attacher à décrire des phénomènes.

5.2 Construction des phénomènes

On peut définir quatre phénomènes principaux :

1. PH_1 qui va décrire l'accumulation d'eau dans le réservoir 1.
2. PH_2 qui va décrire l'évacuation de l'eau du réservoir 1.

3. PH_3 qui va décrire l'accumulation d'eau dans le réservoir 2.
4. PH_4 qui va décrire l'évacuation de l'eau du réservoir 2.

Phénomène PH_1 :Organisation : $P1, P2, P3$ Conditions : $Q_1 - Q_2 - Q_3 > 0$ et $Q_3 > 0$ Effets : $Q_a > 0$ et P_a augmentePhénomène PH_2 :Organisation : $P1, P2, P3$ Conditions : $Q_1 - Q_2 - Q_3 < 0$ et $Q_3 > 0$ Effets : $Q_a < 0$ et P_a diminuePhénomène PH_3 :Organisation : $P3, P4$ Conditions : $Q_3 - Q_4 > 0$ Effets : $Q_b > 0$ et P_b augmentePhénomène PH_4 :Organisation : $P3, P4$ Conditions : $Q_3 - Q_4 < 0$ Effets : $Q_b < 0$ et P_b diminue

Dans cette description on a supposé que le processus nominal de la famille 3 était le processus P3. L'utilisation du processus P3' à la place du processus P3 permet la définition de phénomènes « alternatifs » permettant de décrire les accumulations et les évacuations d'eau :

Phénomène PH'_1 :Organisation : $P1, P2, P3'$ Conditions : $Q_1 - Q_2 - Q_3 > 0$ et $Q_3 < 0$ Effets : $Q_a > 0$ et P_a augmentePhénomène PH'_2 :Organisation : $P1, P2, P3'$ Conditions : $Q_1 - Q_2 - Q_3 < 0$ et $Q_3 < 0$ Effets : $Q_a < 0$ et P_a diminuePhénomène PH'_4 :Organisation : $P3', P4$ Conditions : $Q_3 < 0$ Effets : $Q_b < 0$ et P_b diminue

Cet exemple ne décrit pas un système réel (mis en oeuvre dans un but précis), aussi un modèle téléologique est difficile à déterminer ; tout au plus peut-on supposer que son but pourrait être de maintenir le niveau dans le réservoir b

constant. Dans ce cas la description conjointe du modèle téléologique et du modèle des phénomènes est décrite dans la figure 5.1.

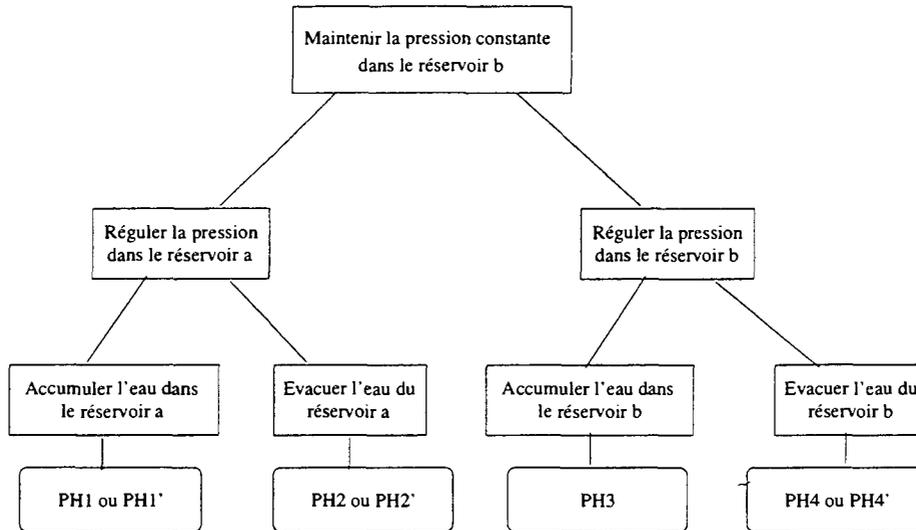


FIG. 5.1 – Exemple des réservoirs : modèle téléologique et phénomènes associé

On peut noter que PH_1 et PH_1' ne peuvent coexister puisqu'ils contiennent chacun un des processus de la famille 3 (ces deux processus sont mutuellement exclusifs). Pour les mêmes raisons, les phénomènes PH_2 et PH_2' d'une part et PH_4 et PH_4' d'autre part ne peuvent être réalisés simultanément.

6

Conclusion

Dans cette deuxième partie nous avons vu comment, à partir d'un modèle comportemental basé sur l'utilisation des bond-graphs, on facilite la construction des modèles fonctionnels de l'approche multi-modèles. Notre apport est double :

- Nous proposons une méthode pour construire automatiquement les cofonctions des processus correspondant à des transferts d'énergie. La mise en œuvre informatique de cette méthode permet d'identifier, à partir de son bond-graph, l'ensemble des processus d'un système.
- Nous proposons un guide qui permet la définition des conditions d'activation en fonction de la cofonction du processus. La description précise de ces conditions doit néanmoins passer par une phase d'expertise pour particulariser ces conditions en fonction de l'application. Par exemple, lorsqu'une source est influencée par une variable externe au processus, c'est directement cette influence que l'on introduira dans les conditions.

De plus, nous avons introduit de nouveaux liens entre processus et entre phénomènes. Le lien de support entre phénomènes nous permet de traduire les liens physiques entre phénomènes qui ne peuvent pas être explicités autrement. Le lien d'exclusivité mutuelle entre processus nous sera utile pour décrire les alternatives entre processus que nous définirons dans le chapitre 3 de la troisième partie de ce rapport. Dans ce chapitre nous introduirons également une extension de la représentation à certains des « dysfonctionnements » du système qui s'exprimeront en terme de phénomènes, de processus et de rôles fonctionnels.

Enfin, la construction systématique du modèle des phénomènes ne peut pas être envisagée. Le modèle des phénomènes correspond au dernier degré de liberté de cette approche de modélisation, il permet d'effectuer les ajustements nécessaires pour relier le modèle des processus (issu de différentes interprétations du comportement en terme fonctionnels) et le modèle téléologique (dans lequel les buts sont définis indépendamment de la façon dont ils seront atteints). La construction du modèle des phénomènes ne peut donc être effectuée que d'une

manière « experte » pour garantir la cohérence entre la téléologie du système et son fonctionnement.

Troisième partie
Effectuer un diagnostic

1

Introduction

Dans la première partie, nous avons présenté les différentes approches de diagnostic. Parmi celles-ci, les approches par consistance, utilisant uniquement des modèles du bon fonctionnement, permettent de toujours obtenir des diagnostics. Ces diagnostics correspondent à la localisation possible de la panne. Néanmoins, ce type d'approches propose certains diagnostics qui peuvent ne pas avoir de sens physique [Struss et Dressler(1989)]. Si on les complète en utilisant des modèles du fonctionnement défaillant des composants, ces approches évitent cet écueil mais la complexité combinatoire du problème de recherche de diagnostics augmente. On obtient, dans ce cas, des diagnostics qui expliquent la défaillance.

Les approches abductives, permettent, elles aussi, d'obtenir des explications mais elles nécessitent une connaissance approfondie des défaillances possibles du système. Leur utilisation pratique suppose que l'on dispose d'un important retour d'expérience pour construire un modèle de pannes le plus complet possible. Dans ce cas, la taille de la base de connaissances peut entraîner des coûts de calcul élevés, en particulier si les noeuds du graphe causal sont très interconnectés [Porcheron et Ricard(1996)].

Les approches fonctionnelles évitent l'écueil de la combinatoire des fonctionnements possibles puisque le nombre d'états du système est réduit à la description des états fonctionnels normaux (les buts/fonctions désirés sont les seuls pris en compte initialement). De plus, la description du comportement en termes de fonctions propose, a priori, une base de raisonnement plus naturelle, plus compréhensible, ce qui peut être intéressant pour permettre une description des comportements par un non-spécialiste du diagnostic à base de modèles.

L'approche multi-modèles fournit un cadre qui s'est déjà révélé intéressant pour des applications portant sur l'interprétation du comportement d'un système, comme l'a montré Fakher Zouaoui [Zouaoui(1998), Zouaoui et al.(1998)]. Dans sa thèse, Zouaoui montre que l'on peut, à partir des sens de variations de variables mesurées, interpréter le comportement d'un système en terme de phénomènes réalisés et de processus actifs ou inactifs. Cette méthode, si elle ne permet pas de prendre en compte directement les dysfonctionnements du système, a néanmoins

permis de vérifier que l'approche était utilisable sur des cas réels. Elle offre un outil permettant d'appréhender plus facilement le comportement d'un système en extrayant des données brutes le comportement fonctionnel du système. On peut donc envisager d'étendre cette approche en incluant la possibilité de gérer des hypothèses sur l'état des processus. En particulier, on veut pouvoir décrire qu'un processus peut avoir des conditions d'activation valides et des effets inconsistants avec les observations si l'un de ses rôles fonctionnels est anormal.

Notre idée est d'utiliser les connaissances décrites dans le modèle téléologique, le modèle des phénomènes et le modèle des processus pour localiser la défaillance. Un comportement/fonctionnement sera défini comme anormal si une (des) fonction(s) que doit remplir le système ne peut(peuvent) être réalisée(s). En effet, plutôt que de gérer un ensemble d'observations anormales, dont beaucoup ne sont que des conséquences de causes primaires, nous allons nous intéresser aux effets attendus des fonctions nécessaires à la réalisation des buts du système.

Nous allons, à chaque niveau de modélisation, interpréter le comportement du système pour déterminer quelles sont les fonctions réalisées et quelles sont celles qui sont défaillantes. Ces fonctions défaillantes nous donneront une base de départ pour exploiter les connaissances décrites au niveau inférieur.

Dans le chapitre 2 nous décrivons comment l'on utilise les connaissances à chaque niveau de modélisation pour identifier l'état du système. Le chapitre 3 montre comment les informations décrivant les fonctionnements anormaux des composants peuvent être introduites dans les différents modèles. Enfin, dans le chapitre 4, nous décrivons la procédure de recherche que nous utilisons pour explorer les différents niveaux de modélisation et retrouver l'état du système.

2

Identification de l'état fonctionnel du système

Un système peut avoir un comportement différent de celui attendu dans deux cas [Allouche et al.(1997)]:

- Le premier correspond à l'existence d'une cause interne due à la défaillance de l'un de ses composants.
- Le deuxième correspond à une réponse normale à une sollicitation anormale d'au moins un de ses composants.

Dans le premier cas, le comportement anormal du système est dû à une (ou plusieurs) panne(s) interne(s) que l'on cherchera à identifier et à expliquer. Dans le deuxième cas, il est dû à une "panne externe" à la partie observée du système dont il faudra chercher ailleurs une explication.

Dans notre approche, nous serons conduits à rechercher ces deux types de pannes (internes ou externes). Cette recherche est effectuée à chaque niveau de modélisation (phénomènes et processus). Nous allons donc préciser, dans chacun des modèles utilisés, ces notions de pannes internes et externes. Pour le modèle des phénomènes, nous définirons des phénomènes consistants, réalisés, défaillants et hors contexte. Pour les processus, nous allons définir les notions de processus consistants, actifs, défaillants et hors contexte. Enfin, nous verrons comment on peut obtenir des conflits à partir des cofonctions des processus inactifs.

Dans cette deuxième partie, nous ne ferons plus la distinction entre effets et post-effets, ce choix, bien que limitant l'expression de la dynamique du système, permet de simplifier les définitions relatives aux états fonctionnels des phénomènes et des processus que nous proposons. Cette limitation, qui devra être levée dans le cas d'une utilisation de cette approche sur un système dynamique, s'est néanmoins avérée cohérente avec l'application que nous avons traitée.

2.1 Sélection des phénomènes

Nous supposons que l'on peut construire l'ensemble des buts que l'opérateur¹⁴ désire atteindre. Ces buts nous permettent de construire, en exploitant le modèle téléologique, un ensemble de phénomènes qu'il faut réaliser pour les atteindre. Si, pour un but donné, plusieurs combinaisons de phénomènes permettent d'atteindre ce but, nous supposons que la configuration désirée par l'opérateur est connue. C'est à dire que l'opérateur sait quels sont les phénomènes à réaliser pour atteindre ce but. Les phénomènes sont à l'interface entre la description du « quoi » (modèle téléologique) et du « comment » (modèle des processus). L'opérateur en configurant le système qu'il supervise gère à la fois le quoi et le comment.

On peut donc définir un ensemble de phénomènes que l'on veut réaliser PHAR. Un phénomène appartiendra à PHAR : *s'il est parmi les phénomènes nécessaires à la satisfaction d'un but (ou sous-but) de l'objectif et si c'est celui qui est choisi pour le réaliser.*

Parmi les phénomènes ainsi introduits dans PHAR certains nécessitent l'occurrence de phénomènes support pour pouvoir être réalisés. Dans le cas où plusieurs phénomènes peuvent satisfaire un même support nous en choisirons un et un seul que nous introduirons dans PHAR.

2.2 Identification des phénomènes

Un phénomène participe à la satisfaction d'un but si, lorsque les conditions nécessaires à sa réalisation sont remplies, les effets attendus de sa réalisation sont effectivement obtenus. On peut donc dire, si l'une au moins de ses conditions n'est pas remplie ou si l'un de ses effets n'est pas obtenu, que ce phénomène n'est pas réalisé. De même, l'obtention des effets désirés, lorsque les conditions sont présentes, est un gage de réalisation du phénomène.

2.2.1 Phénomènes non réalisés

Un phénomène sera considéré comme non réalisé : *si l'une de ses conditions ou si l'un de ses effets est en contradiction avec les observations.* L'ensemble de ces phénomènes qui ne sont pas réalisés est appelé PHN. Parmi les phénomènes non réalisés, on peut distinguer :

- Les phénomènes dont les conditions sont en contradiction avec les observations, ces phénomènes ne peuvent pas être réalisés car le contexte ne le permet pas.

14. Par opérateur on entend un opérateur humain gérant l'installation ou un système de contrôle/commande supervisant le processus industriel.

- Les phénomènes dont les conditions nécessaires à leur réalisation ne sont pas en contradiction avec les observations mais dont les effets le sont.

Phénomènes non réalisés hors contexte

Un phénomène sera considéré comme hors contexte si : *Ses conditions sont inconsistantes avec les observations.*

L'ensemble des phénomènes hors contexte est appelé PHH. PHH est un sous ensemble de PHN ($PHH \subset PHN$).

Si la configuration désirée pour le système nécessite la réalisation de ce phénomène, alors il est anormal que ses conditions ne soient pas remplies. On peut dire que sa non réalisation est le symptôme d'une panne externe. Si la configuration désirée ne nécessite pas la réalisation de ce phénomène, alors il n'est pas anormal que ses conditions ne soient pas remplies.

Phénomènes non réalisés défailants

Un phénomène sera considéré comme défailant si : *Ses conditions sont consistantes avec les observations et si au moins l'un de ses effets est en contradiction avec les observations.*

L'ensemble des phénomènes défailants est appelé PHD, c'est un sous ensemble de PHN disjoint de PHH ($PHD \subset PHN$ et $PHH \cap PHD = \emptyset$). Si ses conditions ne sont pas observées (elles sont donc consistantes), un phénomène défailant peut correspondre à un phénomène hors contexte qui n'a pas été détecté (panne externe ou non).

Si ses conditions sont observées (ou déduites) alors ce phénomène définit une panne interne parmi les processus mis en oeuvre pour sa réalisation (ceux décrits dans son organisation). Cet ensemble de phénomènes de PHD dont les conditions sont vérifiées est appelé PHPI. Le complémentaire de PHPI dans PHD définira l'ensemble PH?D des phénomènes pouvant être en panne interne ou hors contexte.

2.2.2 Phénomènes réalisés

Un phénomène ne pourra être supposé réalisé que si au moins : *ses conditions et ses effets ne sont pas en contradiction avec les observations.* En effet, si les conditions permettant son occurrence ne sont pas remplies, il ne peut pas être réalisé. Si ses effets attendus sont en contradiction avec les observations, c'est qu'il n'est pas réalisé.

Ceci nous conduit à la définition d'un phénomène consistant :

Phénomènes consistants

Un phénomène sera considéré comme consistant avec l'état du système si : *Ses conditions et ses effets sont consistants avec les observations disponibles.* Cette

définition correspond à la négation de celle d'un phénomène non réalisé.

L'ensemble des phénomènes consistants est appelé PHC. Cet ensemble correspond à l'ensemble des phénomènes qui peuvent être réalisés. Chaque phénomène consistant n'est pas forcément réalisé, on peut en effet ne pas disposer d'informations suffisantes pour déterminer son état. C'est pourquoi on définit un nouveau type de phénomènes, ceux dont la réalisation est observée.

Phénomènes réalisés

Un phénomène sera considéré comme réalisé si l'on peut observer une partie des effets qu'entraîne sa réalisation. Comme plusieurs phénomènes peuvent, a priori, avoir une partie de leurs effets respectifs identiques, nous dirons qu'un phénomène est observé : *Si c'est un phénomène consistant et si l'un au moins de ses effets est observé et qu'il est le seul à produire cet effet.*

L'ensemble des phénomènes réalisés est appelé PHR ($PHR \subset PHC$).

Phénomènes juste consistants

Le complémentaire de PHR dans PHC définit l'ensemble PHJC des phénomènes juste consistants. Les observations ne permettent pas de décider si un phénomène de PHJC est réalisé ou non (ses effets peuvent ne pas être observés, ou il peut ne pas être le seul à les produire). En réalité, ce phénomène peut être réalisé, défaillant ou hors contexte. En étendant les observations, on pourra éventuellement préciser son état.

2.2.3 Phénomènes déduits

A partir des liaisons de support entre phénomènes, on peut affiner la construction de l'ensemble de phénomènes hors contexte et de phénomènes réalisés. Si tous les phénomènes susceptibles de satisfaire un des supports d'un phénomène PH sont non réalisés (ils appartiennent à PHN) alors PH sera hors contexte. En effet, une des conditions explicites ou implicites de PH n'est pas satisfaite. Réciproquement, si PH est réalisé alors, tous ses supports sont satisfaits (un au moins des phénomènes qui les satisfont séparément est réalisé). PH appartient donc à PHR. Dans la pratique PHAR ne contient qu'un seul phénomène par support. Soit $\{PH_j\}_{j=1,n}$ l'ensemble des phénomènes support d'un phénomène PH. Tous les PH_j doivent donc être réalisés pour que PH le soit. On peut donc conclure que :

- Si $PH \in PHR$ alors $\forall_j PH_j \in PHR$
- Si $\exists PH_j \in PHN$ alors $PH \in PHH$

2.2.4 Synthèse des ensembles de phénomènes

La figure 2.1 permet de synthétiser les définitions précédentes sous forme graphique. *PHC* est le complémentaire de *PHN* dans l'ensemble initial des phénomènes. *PHD* est le complémentaire de *PHH* dans *PHN*. *PH?D* est le complémentaire de *PHPI* dans *PHD*. Enfin, *PHJC* est le complémentaire de *PHR* dans *PHC*.

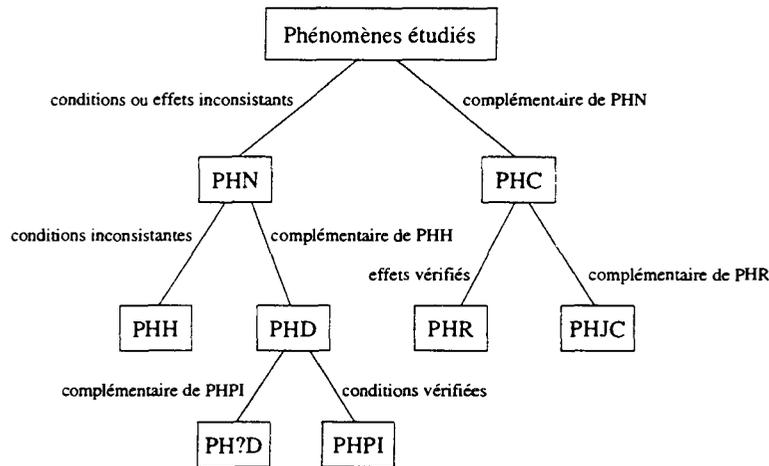


FIG. 2.1 – Synthèse des ensembles de phénomènes

2.3 Identification des processus

Un processus permet la réalisation d'un phénomène si, lorsque ses conditions d'activation sont remplies, les effets attendus de ce processus sont effectivement obtenus. Si au moins une de ses conditions ou un de ses effets est en contradiction avec l'observation alors le processus est forcément inactif. De même, l'obtention des effets désirés, lorsque les conditions sont présentes, est un gage de l'activité du processus.

2.3.1 Processus inactifs

Un processus sera considéré comme inactif : *si l'une de ses conditions ou l'un de ses effets est en contradiction avec les observations disponibles*. L'ensemble des processus inactifs est appelé PRI. Parmi les processus inactifs deux cas peuvent apparaître :

- Les conditions d'activation d'un processus sont en contradiction avec les observations, alors ce processus ne peut pas être actif car le contexte ne le permet pas.

- Les conditions nécessaires à l'activité d'un processus ne sont pas en contradiction avec les observations mais ses effets le sont.

Processus inactifs hors contexte

Un processus sera considéré comme hors contexte si : *Ses conditions sont inconsistentes avec les observations.*

L'ensemble des processus hors contexte est appelé PRH, c'est un sous ensemble de PRI ($PRH \subset PRI$).

Si la configuration désirée pour le système nécessite l'activité de ce processus, alors il est anormal que ses conditions ne soient pas remplies et son inactivité est le symptôme d'une panne externe. Par contre, si la configuration désirée ne nécessite pas l'activité de ce processus, alors il n'est pas anormal que ses conditions ne soient pas remplies.

Processus inactifs défailants

Un processus sera considéré comme défailant si : *Ses conditions sont consistantes avec les observations et si au moins l'un de ses effets est en contradiction avec les observations.*

L'ensemble des processus défailants est appelé PRD, c'est un sous ensemble de PRI disjoint de PRH ($PRD \subset PRI$ et $PRH \cap PRD = \emptyset$). Si ses conditions ne sont pas observées (elles sont donc consistantes), un processus défailant peut correspondre à un processus hors contexte qui n'a pas été détecté. Si ses conditions sont observées (ou déduites) alors ce processus définit une panne interne parmi les rôles fonctionnels nécessaires à son activité. L'ensemble de processus de PRD dont les conditions sont vérifiées est appelé PRPI. Le complémentaire de PRPI dans PRD définira l'ensemble PR?D des processus pouvant être en panne interne ou hors contexte.

2.3.2 Processus actifs

La construction de l'ensemble des processus actifs dérive de celle proposée dans [Zouaoui(1998)] et l'étend pour gérer la possibilité d'une défaillance d'un processus. Dans [Zouaoui(1998)] un processus était considéré comme actif si :

- Ses conditions sont observées (*vérification*).

ou si :

- La propagation des observations dans le graphe d'influence permet de déduire ses conditions (*propagation / déduction*).

ou si :

- Ses effets sont observés et il est le seul à influencer au moins une des variables décrites dans ses effets (*vérification*).

ou si :

- Ses conditions correspondent aux effets d'autres processus actifs (*comparaison*).

Pour gérer la possibilité d'une défaillance d'un processus on ne peut plus se contenter de vérifier uniquement les conditions ou les effets, on doit vérifier la présence simultanée des conditions et des effets. Nous avons donc adopté une nouvelle définition des états possibles des processus, ils pourront être consistants (actifs ou juste consistants) ou inactifs (hors contexte ou défaillants).

Processus consistants

Un processus sera considéré comme consistant avec l'état du système si : *Ses conditions et ses effets sont consistants avec les observations disponibles.*

L'ensemble des processus consistants est appelé PRC. Cet ensemble correspond à l'ensemble des processus qui peuvent être actifs. Chaque processus consistant n'est pas forcément actif. Nous distinguerons ceux qui le sont, en définissant le sous ensemble des processus dont l'activité peut être observée, de ceux qui sont juste consistants.

Processus actifs observés

Un processus sera considéré comme actif si l'on peut observer une partie des effets qu'entraîne sa réalisation. Comme plusieurs processus peuvent, a priori, avoir une partie de leurs effets respectifs identiques, nous dirons qu'un processus est observé actif :

Si c'est un processus consistant et si l'un au moins de ses effets est observé et qu'il est le seul à produire cet effet.

L'ensemble des processus actifs est appelé PRA ($PRA \subset PRC$).

Processus juste consistants

Le complémentaire de PRA dans PRC définit l'ensemble PRJC des processus juste consistants. Pour un processus de PRJC, les observations ne permettent pas de décider s'il est actif ou non (ses effets peuvent ne pas être observés, ou il peut ne pas être le seul à les produire). Si les conditions sont observées, alors ce processus peut être, en fait, réalisé ou défaillant, sinon il peut être réalisé, défaillant ou hors contexte.

2.3.3 Processus déduits

A partir des liens de régulation, de support, d'exclusivité mutuelle et de causalité directe entre processus on peut affiner la construction de l'ensemble de processus inactifs hors contexte.

Utilisation du lien de régulation

Si un processus P_i est actif, alors les processus qui le régulent sont actifs. P_i ne peut être actif que si toutes ses régulations sont présentes. De même, si un des processus qui régule P_i est inactif alors P_i l'est aussi. Plus exactement P_i est un processus de PRH, la liaison de régulation est une condition nécessaire implicite de l'activité de P_i .

Utilisation du lien de support

Si un processus P_i est actif, alors les processus qui ont une relation de support vers P_i sont actifs. P_i ne peut être actif que si tous ses supports sont présents. De même, si un des processus qui supporte P_i est inactif alors P_i l'est aussi. Plus précisément P_i est hors contexte (il appartient à PRH), la liaison de support est une condition nécessaire implicite de l'activité de P_i .

Utilisation du lien d'exclusivité mutuelle

Si un processus est actif alors tous les processus qui lui sont exclusifs sont inactifs. En particulier, si ce sont des processus qui lui sont alternatifs, ils sont hors contexte.

Utilisation du lien de causalité directe

La relation de causalité directe relie les effets ou les post-effets d'un processus P_j aux conditions de P_i . Si cette relation associe les effets aux conditions alors lorsque P_i est actif, P_j est actif. Si cette relation associe les post-effets aux conditions alors lorsque P_i est actif, P_j a été actif mais ne l'est plus. De même, si cette relation associe les effets aux conditions, alors lorsque P_j est inactif P_i est inactif. Comme nous ne distinguons pas les effets des post-effets, nous dirons donc que :

- Si P_i est actif alors P_j l'est aussi (toutes les conditions de P_i sont vérifiées et en particulier celles fournies par l'effet de P_j).
- Si P_j est inactif alors P_i l'est aussi (une des conditions de P_i n'est pas vérifiée, celle fournie par l'effet de P_j).

Remarque

Les liens de régulation, de support et de causalité directe ne sont décrits que s'ils sont non ambigus c'est-à-dire qu'un lien de régulation, de support ou de causalité directe n'est représenté que s'il ne peut être obtenu que par un seul processus. L'utilisation de tels liens permet d'accélérer l'identification de l'état sans vérifier explicitement la correspondance (ou l'inconsistance) entre conditions ou effets et observations.

2.3.4 Synthèse des ensembles de processus

La figure 2.2 permet de synthétiser les définitions précédentes sous forme graphique. *PRC* est le complémentaire de *PRI* dans l'ensemble des phénomènes initial. *PRD* est le complémentaire de *PRH* dans *PRI*. *PR?D* est le complémentaire de *PRPI* dans *PRD*. Enfin, *PRJC* est le complémentaire de *PRA* dans *PRC*.

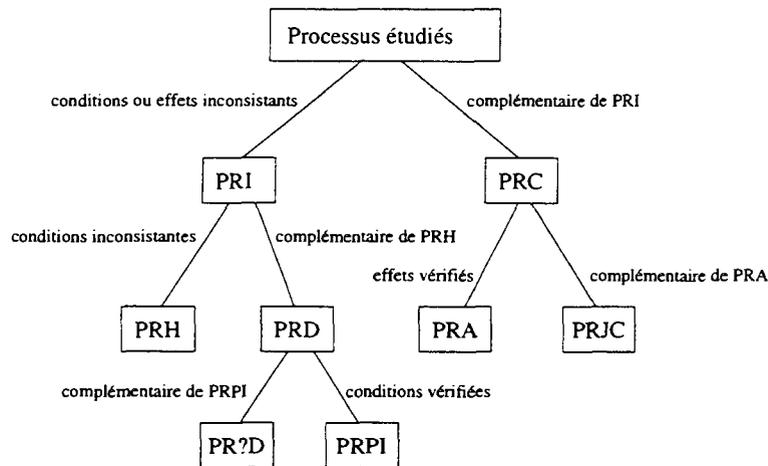


FIG. 2.2 – Synthèse des ensembles de processus

3

Introduction de fonctionnements anormaux

Pour pouvoir fournir un diagnostic expliquant les raisons (les causes) d'un dysfonctionnement il faut disposer de connaissances sur les comportements anormaux. Ces dysfonctionnement peuvent être de deux types, des pannes internes et des pannes externes.

La modélisation fonctionnelle ne nous permet pas, a priori, de vérifier si un phénomène ou un processus fournissent des effets cohérents avec leur fonctionnement normal dans un contexte anormal (i.e. lorsqu'ils sont hors contexte) mais uniquement dans un contexte normal. On ne peut pas simuler les effets possibles pour tous les contextes possibles à partir d'un seul phénomène (ou processus). Pour pouvoir vérifier si un phénomène ou un processus se comporte normalement dans un contexte non désiré, il faut décrire de nouveaux processus ou phénomènes. Ils spécifieront quels sont les effets que l'on obtient en appliquant d'autres conditions, physiquement admissibles, à leur cofonction ou à leur organisation.

Dans le cas de processus ou de phénomènes défaillants, qui spécifient des pannes internes, on peut décrire ces pannes explicitement en modifiant leur cofonction ou leur organisation et en décrivant les effets possibles dans un contexte normal.

3.1 Au niveau des processus

3.1.1 Les familles de processus

Pour représenter le comportement normal dans les différents contextes admissibles nous avons introduit la notion de famille. Nous dirons que tous les processus partageant la même cofonction appartiennent à une **famille** de processus. Ils diffèrent les uns des autres uniquement par leurs conditions.

Définition : Une famille est un ensemble de processus possédant la même cofonc-

tion, chacun ayant des conditions d'activation différentes.

Soit P_i et P_j deux processus d'une même famille :

- $\text{cofonction}(P_i) \equiv \text{cofonction}(P_j)$
- $\text{conditions}(P_i) \neq \text{conditions}(P_j)$

Une famille permet de représenter tous les fonctionnements possibles d'un ensemble de rôles fonctionnels si l'on suppose que ceux-ci ont un comportement normal, c'est-à-dire un fonctionnement en accord avec leur modèle comportemental individuel. A partir d'une famille nous allons pouvoir "simuler" le comportement normal dans tout le domaine de valeur des conditions.

Dans chaque famille, il existe au moins un processus représentant le comportement désiré par le concepteur pour l'ensemble de composants pris en compte dans la cofonction, ce processus est appelé processus nominal. Une famille peut n'avoir qu'un seul élément, dans ce cas cet élément est un processus nominal. Ce cas existe quand un changement des conditions d'activation ne conduit pas à un processus représentant un fonctionnement possible à la vue des modèles comportementaux des rôles fonctionnels de la cofonction. C'est-à-dire si le domaine de définition des conditions d'activation est limité à celui décrit pour ce processus.

Pour une famille donnée, les variables spécifiant les conditions sont les mêmes. Ce sont les différentes valeurs de ces variables qui permettent de décrire chaque représentant d'une famille.

Chaque variable possède un domaine de définition qui correspond à l'ensemble des valeurs possibles que peut prendre cette variable. On pourra dire qu'une famille est totalement définie si chaque partie du domaine de définition de l'ensemble des variables (produit cartésien des domaines de définitions de chaque variable) est associée aux conditions d'un des processus de la famille.

Chaque processus d'une même famille correspond à une description possible et connue correspondant à un processus nominal ou à la description des effets d'une panne externe sur cette cofonction. En supposant que notre modélisation est complète, c'est-à-dire que tous les processus ayant une possibilité d'apparaître ont été décrits (famille totalement définie), alors quand tous les représentants d'une famille ont été examinés au moins un a ses conditions consistantes avec les observations. Si aucun n'a ses effets consistants, alors on se trouve dans le cas où une panne interne se superpose à la panne externe. Dans ce cas, la cofonction d'une famille dont tous les représentants ont été réfutés correspondra à un conflit : un au moins des rôles fonctionnels de cette cofonction a un comportement différent de celui attendu. Ceci va nous permettre :

- de substituer à un processus hors contexte le représentant de sa famille qui pourra être considéré comme réalisé dans ce contexte. Le processus hors contexte initial est remplacé par le processus réalisé de sa famille.

- de reclasser un processus hors contexte parmi les processus défaillants si aucun des processus de sa famille ne peut être considéré comme réalisé (si la famille est complètement définie). Le processus hors contexte initial devient un processus défaillant.

3.1.2 Processus alternatifs hors famille

Les dysfonctionnements correspondant à des pannes internes peuvent être décrits à partir de processus dont les cofonctions décriront les dysfonctionnements d'un ou de plusieurs rôles fonctionnels.

Pour un processus donné P_i et un processus alternatif P_j représentant l'un de ces dysfonctionnements, il y aura au moins un rôle fonctionnel différent dans leurs cofonctions.

3.1.3 Exemple

Si l'on prend l'exemple d'une résistance branchée en série entre deux sources de tension (figure 3.1), on peut décrire le fonctionnement nominal par le processus suivant :

Processus Nominal :
Cofonction: $GE1 - C_{12}^f - GE2$
Conditions: $e_1 - e_2 > 0$
Effets: $f_{12} > 0$

Dans ce processus le fonctionnement de la résistance est interprété comme un conduit de flux, les sources de tension sont interprétées comme des sources d'effort.

Le domaine de variation des conditions non décrit par ce premier processus est $e_1 - e_2 < 0$, ce qui nous conduit à décrire un autre représentant dans cette famille :

Processus décrivant les effets d'une panne externe :
Cofonction: $GE1 - C_{12}^f - GE2$
Conditions: $e_1 - e_2 < 0$
Effets: $f_{12} < 0$

Si la résistance est défaillante et devient un circuit ouvert alors on peut décrire un processus dans lequel le rôle fonctionnel conduit de flux est remplacé par une barrière de flux ($R \rightarrow \infty$). L'effet sera de bloquer le passage du courant entre les deux sources, on a donc $f_{12} = 0$:

Processus décrivant les effets d'une panne interne :

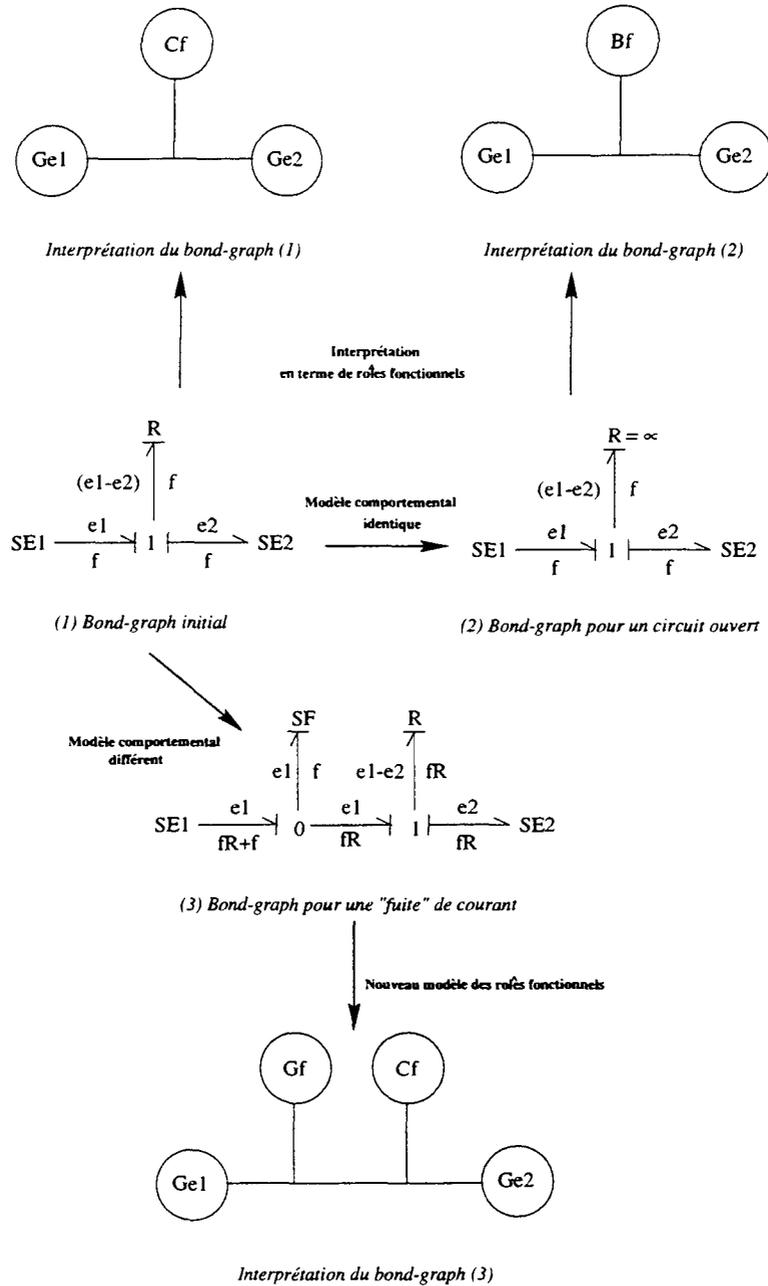


FIG. 3.1 – Exemple : Bond-graph et modèle des rôles fonctionnels

Cofonction: $GE1 - B_{12}^f - GE2$

Conditions: $\forall(e_1 - e_2)$

Effets: $f_{12} = 0$

Supposons maintenant qu'il existe une fuite de courant au niveau de la résistance. Ce type de panne ne peut pas être décrit par un processus où l'on changerait uniquement un (ou plusieurs) rôles fonctionnels de la cofonction. Pour pouvoir décrire ce dysfonctionnement il faudrait décrire un nouveau modèle comportemental¹⁵ dans lequel une jonction permettant de décrire la fuite serait ajoutée (voir (3) figure 3.1). Ce type de panne ne peut donc pas être décrit dans notre approche puisque nous utilisons un modèle du comportement normal du système. Nous verrons toutefois dans la section suivante un cas particulier où un tel type de panne peut être décrit.

Les modifications du modèle comportemental sont délicates à gérer. Des travaux portant sur des modèles hybrides à base de bond-graphs qui pourraient permettre ce type de raisonnement peuvent être trouvés dans [Mosterman et al.(1997)]. Le nouveau modèle comportemental obtenu devrait alors être interprété en terme de rôles fonctionnels, puis de processus, puis de phénomènes.

3.2 Au niveau des phénomènes

La réalisation d'un phénomène PH_i implique que tous les processus de son organisation sont actifs. Si seulement certains des processus de l'organisation sont actifs, alors le résultat de cette nouvelle combinaison de processus aura un effet différent de celui attendu. Cette nouvelle combinaison de processus définit alors l'organisation d'un nouveau phénomène PH_j qui sera une alternative à PH_i . Un phénomène PH_j alternatif à PH_i peut aussi correspondre à un changement des conditions ou à un changement des conditions et de l'organisation simultanément. L'état de PH_j sera évalué lorsque PH_i aura été réfuté.

Les phénomènes alternatifs à PH_i permettent de définir des fonctionnements possibles lorsque PH_i n'est pas réalisé. Ces phénomènes alternatifs représentent soit des changements de conditions, soit des changements dans l'organisation du phénomène. Ces changements peuvent se traduire par la description d'organisation prenant en compte une combinaison différentes de processus représentant des comportements normaux, ou par la substitution de l'un des processus de l'organisation initiale de PH_i par l'un de ses processus alternatifs. Ces alternatives permettent en particulier de représenter les fonctionnements anormaux. Elles sont définies de façon « expertes » à partir des dysfonctionnements identifiés que l'on souhaite représenter.

15. Par modification du modèle comportemental nous entendons l'ajout d'un élément (élément de bond-graph ou jonction) et/ou le changement de causalité dans le bond-graph.

Pour illustrer notre propos nous allons prendre l'exemple mécanique décrit dans la figure 3.2. La figure 3.3 présente le bond-graph et le modèle des rôles fonctionnels de ce système.

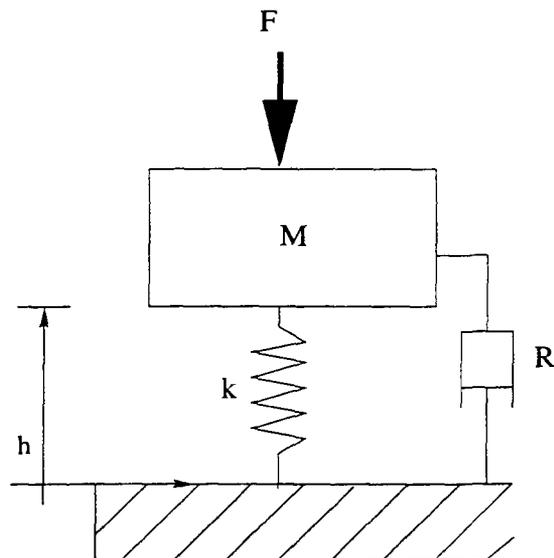


FIG. 3.2 - Exemple

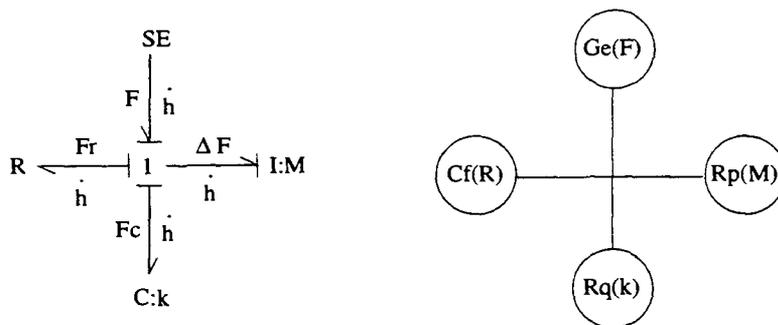


FIG. 3.3 - Exemple : Bond-graph et modèle des rôles fonctionnels

Le système décrit dans cet exemple se comporte comme un circuit R-L-C classique. Si on impose la force F on obtiendra une position d'équilibre spécifiant h . Ce comportement peut être décrit à partir des quatre processus suivants :

- P_1 : qui correspond au chargement d'énergie cinétique de l'élément inertiel de masse M , la cofonction est $SE(F) - I(M)$.
- P_2 : qui correspond au déchargement d'énergie cinétique de M et au chargement d'énergie potentielle dans l'élément capacitif de raideur k , la cofonction est $I(M) - C(k)$.

- P_3 : qui est le symétrique de P_2 , il correspond au transfert de k vers M , la cofonction est $C(k) - I(M)$.
- P_4 : qui correspond à la dissipation d'énergie cinétique par l'élément résistif R , la cofonction est $I(M) - R$.

Si l'on veut réguler h en fonction de F , alors les valeurs de R , M et k sont choisies de manière à obtenir h sans oscillation. Le phénomène PH_1 décrivant ce comportement a pour organisation : (P_1, P_2, P_4) . P_3 ne fait pas partie de l'organisation de PH_1 dans ce cas. Imaginons que l'un des composants soit défaillant, par exemple si la résistance devient négligeable, dans ce cas le processus P_4 est défaillant. On peut alors définir un nouveau phénomène PH_2 ayant pour organisation (P_1, P_2, P_3) ; en effet, comme l'élément résistif est éliminé, on observe une oscillation, l'énergie est transférée de $I(M)$ vers $C(k)$ (processus P_2) puis de $C(k)$ vers $I(M)$ (processus P_3). Ce nouveau phénomène PH_2 qui sera évalué en tant qu'alternative à PH_1 aura pour effet, pour un F donné, de produire un h oscillant. Il faut noter que le modèle comportemental correspondant à ce fonctionnement est identique à celui du comportement normal en terme de causalité.

Ce type de phénomènes "anormaux" ou non désirés ne peut être décrit que si l'on possède une connaissance approfondie du système. Cette connaissance permettra de définir les configurations possibles des processus permettant de décrire de nouveaux phénomènes.

Enfin, on peut aussi définir des phénomènes alternatifs à PH_i à partir de processus prenant en compte des défaillances de rôles fonctionnels dans leurs cofonctions. Si l'on reprend l'exemple précédent et que l'on suppose que la résistance devient infinie, on obtient alors un nouveau processus P_5 dans lequel le rôle fonctionnel « conduit », décrivant la résistance, est remplacé par un rôle fonctionnel « barrière ». Ce processus a pour effet de rendre la vitesse nulle, les autres processus ne peuvent plus avoir lieu. On peut définir un nouveau phénomène PH_3 ayant comme organisation (P_5) et qui, quelle que soit la force appliquée, empêchera toute variation de h . Dans ce cas, il faut noter que le modèle comportemental est modifié, la résistance impose désormais un flux nul (au lieu d'un effort proportionnel à la vitesse). Ce cas ne peut être décrit que si ce changement de modèle n'influe sur aucun autre phénomène et sur aucun autre processus. Dans le cas contraire, on ne peut pas utiliser une telle modélisation d'un phénomène défaillant.

La description de ces différentes alternatives va nous permettre de reclasser certains des phénomènes initialement considérés comme hors contexte :

- Si, pour un contexte donné, il existe une et une seule alternative PH_j à un phénomène PH_i qui puisse être considérée comme réalisée, alors PH_i est retiré de l'ensemble des phénomènes hors contexte et PH_j est ajouté à l'ensemble des phénomènes réalisés.

Les phénomènes alternatifs peuvent aussi être utilisés pour expliquer des phénomènes défaillants :

- Si, pour un contexte donné, il existe une et une seule alternative PH_j à un phénomène défaillant PH_i qui peut être considérée comme réalisée, alors PH_i est retiré de l'ensemble des phénomènes défaillants et PH_j est ajouté à l'ensemble des phénomènes réalisés.

3.3 Au niveau des rôles fonctionnels

D'après la définition des rôles fonctionnels, le comportement de chaque composant peut être interprété en terme de rôles fonctionnels. Les dysfonctionnements des composants doivent donc pouvoir être interprétés en terme de rôles fonctionnels.

Dans [Chittaro(1995)], Chittaro propose un ensemble d'axiomes pour décrire les dysfonctionnements possibles des rôles fonctionnels de type générateur et conduit. On pourrait donc utiliser de tels axiomes pour expliquer les candidats générés par l'étape de localisation en introduisant les comportements possibles des rôles fonctionnels et en testant ensuite la consistance de ces modèles.

Néanmoins, nous avons vu que les dysfonctionnements au niveau des rôles fonctionnels ne peuvent être décrits que s'ils n'impliquent pas de changement du modèle comportemental.

Notre démarche étant avant tout d'utiliser les connaissances de plus haut niveau pour guider le raisonnement, nous ne nous sommes pas intéressé à la description fine des dysfonctionnements des rôles fonctionnels qui nous aurait conduit à des changements de modèle comportemental en fonction des défaillances. La seule prise en compte de changement de rôles fonctionnels en cas de panne que nous décrivons se place au niveau des cofonctions des processus. Notre idée est d'utiliser les candidats, construits à partir des cofonctions des processus défaillants, pour focaliser la recherche de diagnostic en utilisant des méthodes reposant sur l'abduction d'explications ou sur le respect de la consistance (ayant une représentation plus complète des dysfonctionnements du système).

4

Recherche de diagnostic

La recherche de diagnostic va s'effectuer en prenant en compte successivement les différents niveaux de modélisation de l'approche multi-modèles. A chaque niveau on va essayer de retrouver l'état du système en recherchant les éléments fonctionnant normalement et ceux qui sont défectueux. Les éléments défectueux servent ensuite de base de départ pour le raisonnement au niveau inférieur.

Cette recherche de diagnostic est amorcée par l'ensemble PHAR des phénomènes à réaliser. Cet ensemble définit l'état dans lequel le système devrait être. Les différences entre les effets attendus des phénomènes de PHAR et ceux effectivement observés vont nous permettre d'identifier et de localiser les défaillances. Comme l'on s'intéresse uniquement aux phénomènes de PHAR tous les phénomènes de PHH définissent des pannes externes. PHD ne peut contenir que des phénomènes définissant des pannes externes ou internes. Enfin, les diagnostics que l'on va obtenir sont relatifs à PHAR : ils définissent les phénomènes effectivement réalisés (PHR), et ceux qui ne le sont pas (PHN), ils ne préjugent pas de la réalisation ou de la non réalisation de phénomènes autres que ceux que l'on désire réaliser.

Les ensembles obtenus à partir de cette première étape sont ensuite exploités pour générer un ensemble de processus à examiner. Une fois ces processus classés dans les différents ensembles (*PRI*, *PRC*, *PRH*, etc ...) les résultats obtenus permettent de calculer des conflits de phénomènes, de processus et de rôles fonctionnels.

4.1 Gestion des observations

Les observations disponibles dans la pratique rendent difficile la vérification de la réalisation d'un phénomène ou de l'activité d'un processus. Pour remédier à ce problème nous pourrions utiliser le graphe d'influence pour augmenter le volume de ces observations. Cette idée est utilisée dans [Zouaoui(1998)] pour améliorer la détection des processus actifs. Dans notre cas nous ne pouvons pas utiliser toutes

les relations du graphe d'influence puisque certaines sont liées au comportement des composants¹⁶. Ces relations peuvent donc, lorsque les composants n'ont pas un comportement normal, ne plus représenter le fonctionnement réel du système. Nous nous limiterons à l'utilisation des relations constitutives entre variables du type $e = \frac{dq}{dt}$ et $f = \frac{dp}{dt}$. Ces relations sont des relations physiques qui ne dépendent pas du comportement du système.

Les effets et les conditions des phénomènes réalisés et des processus actifs sont ajoutés à l'ensemble des observations. En effet, la réalisation d'un phénomène (ou l'activité d'un processus) signifie que les conditions nécessaires à sa réalisation sont remplies. Les états qualitatifs des variables qui apparaissent dans ses conditions seront ajoutés aux observations. Les états qualitatifs des variables des effets d'un processus actif ne seront ajoutés que si ce processus actif est le seul qui influence ces variables.

Cet ensemble d'observations OBS est donc mis à jour chaque fois qu'un élément est ajouté dans l'ensemble des phénomènes réalisés ou dans l'ensemble des processus actifs. L'ajout d'informations dans l'ensemble des observations ne doit pas le rendre inconsistant : si OBS^* définit les observations ajoutées suite à la réalisation d'un phénomène et si OBS est l'ensemble initial d'observations alors on doit toujours vérifier que $OBS^* \cup OBS \not\models \perp$. Cette condition est automatiquement vérifiée pour les phénomènes réalisés appartenant à PHAR, sinon cela signifierait que l'ensemble PHAR contient au moins deux phénomènes dont les conditions et/ou les effets respectifs sont en contradiction. Dans ce cas PHAR serait lui même inconsistant (et donc la modélisation incorrecte).

4.2 Diagnostic au niveau des phénomènes

A partir de l'ensemble des phénomènes décrits dans PHAR, l'identification de l'état fonctionnel du système en terme de phénomènes se déroule en trois phases (voir figure 4.1) :

1. *Identification* : Dans la première phase on examine les phénomènes de *PHAR* pour déterminer s'ils sont non réalisés *PHN* (hors contexte *PHH* ou défailants *PHD*), ou consistants (*PHC*) (réalisés *PHR* ou juste consistants *PHJC*).
2. *Explication* : Dans la deuxième phase, on examine les alternatives des phénomènes hors contexte ou défailants. Cette étape conduit à obtenir de nouveaux ensembles de phénomènes réalisés, de phénomènes hors contexte et de phénomènes défailants.

16. A la différence de F. Zouaoui (qui se plaçait dans un cadre de bon fonctionnement) nous nous plaçons dans une problématique de diagnostic. Les relations d'influence, issues de la modélisation du comportement normal du système, ne peuvent plus être considérées comme vraies a priori.

3. *Exploitation*: Dans la troisième étape, on utilise les résultats obtenus précédemment pour spécifier les processus que l'on doit examiner pour déterminer leur état.

On suppose que l'on sait interpréter le comportement normal du système. En bon fonctionnement, pour un ensemble PHAR donné, tous les phénomènes de PHAR doivent pouvoir être identifiés comme des phénomènes réalisés. C'est-à-dire que les effets de tous les phénomènes sont, soit directement observables, soit déductibles de la réalisation d'un autre phénomène. La réalisation d'un phénomène PH_i ne pourra être déduite de celle d'un autre phénomène réalisé PH_j qu'en utilisant les conditions de ce dernier. En effet, pour que PH_i soit réalisé, un de ses effets (qu'il est le seul à produire) doit correspondre à une des conditions de PH_j . En aucun cas un effet d'un phénomène réalisé ne pourra être utilisé pour cette déduction car, soit cet effet est une condition d'un autre phénomène et ce n'est pas suffisant pour conclure à sa réalisation, soit c'est un effet d'un autre phénomène et dans ce cas il est ambigu puisqu'il est produit par deux phénomènes.

Si cette condition d'observabilité/déductibilité des effets des phénomènes de PHAR en bon fonctionnement n'est pas respectée cela signifie, soit qu'il existe une ambiguïté entre les effets de deux phénomènes, soit que les effets d'un phénomène ne sont pas observables/déductibles.

Dans le premier cas, cela signifie que l'ensemble PHAR que l'on utilise ne respecte pas les conditions requises. En effet, on a défini PHAR comme l'ensemble des phénomènes nécessaires à l'obtention des buts et choisis pour les réaliser. Il ne devrait donc pas exister deux phénomènes produisant le même effet, puisque lors de la définition de PHAR on a dû en choisir un et un seul.

Dans le second cas, cela signifie qu'une partie de notre modèle est non observable : quelles que soient les observations disponibles, on ne pourra pas définir l'état de cette partie du système. Il est inutile de décrire un modèle que l'on ne peut ni vérifier ni réfuter.

4.2.1 Identification des phénomènes

Cette étape s'organise en trois parties. Dans un premier temps, à partir des informations initiales, on place les phénomènes dans les différents ensembles PHH , $PH?D$, $PHPI$, PHR et $PHJC$. Dans un second temps on utilise l'ensemble PHR pour augmenter OBS. Enfin, on propage ces nouvelles observations pour déplacer des phénomènes de PHD vers $PHPI$ ou de $PHJC$ vers PHR .

Identification initiale

Chacun des phénomènes de PHAR est examiné successivement :

1. Nous examinons tout d'abord les conditions des phénomènes :

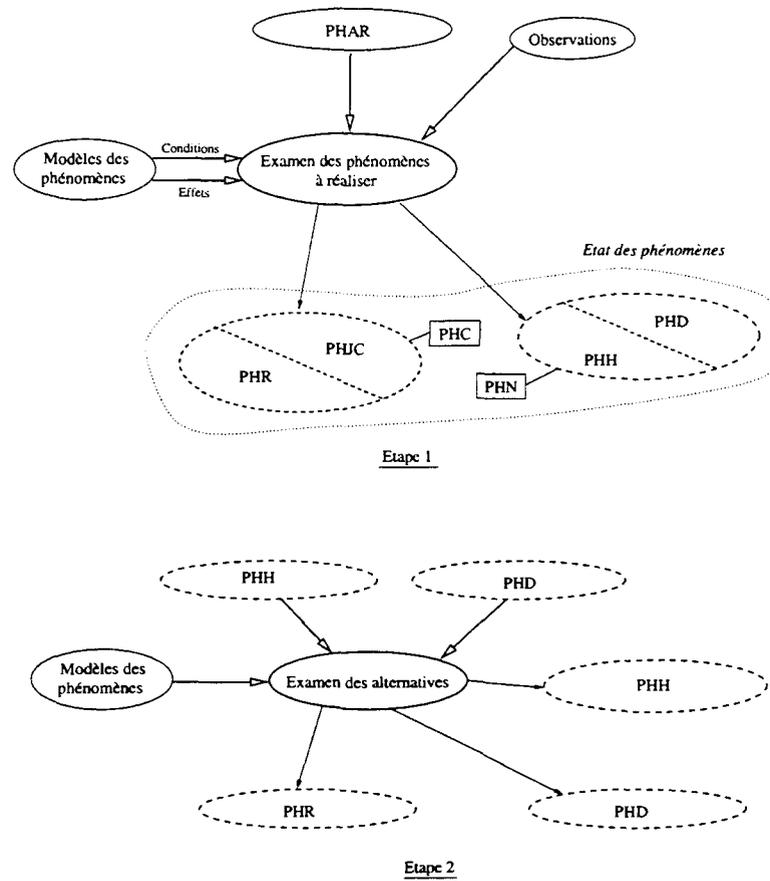


FIG. 4.1 – Organisation de la tâche de diagnostic au niveau des phénomènes : étapes 1 et 2

$\forall PH \in PHAR$, si $conditions(PH) \cup OBS \models \perp$ alors $PH \in PHH$

2. Nous examinons ensuite les effets des phénomènes de PHAR qui ne sont pas hors contexte :

$\forall PH \in PHAR$, $PH \notin PHH$, si $effets(PH) \cup OBS \models \perp$ alors $PH \in PHD$, sinon $PH \in PHC$.

Nous disposons donc de l'ensemble des phénomènes non réalisés ($PHN = PHH \cup PHD$) et de l'ensemble des phénomènes consistants (PHC).

3. Nous utilisons ensuite les relations de support associant un phénomène de PHN et un phénomène de PHC pour déduire de nouveaux phénomènes hors contexte (voir section 2.2.3). Cette étape permet de réduire le nombre de phénomènes consistants (si un phénomène de PHN supporte un phénomène de PHC , ce dernier migre dans PHH).

4. Nous déterminons parmi les phénomènes restants dans PHC quels sont ceux qui sont effectivement réalisés :

$\forall PH \in PHC$, si $\exists e \in effets(PH)$ tel que $e \in OBS$ et $\nexists PH' \in PHC$ tel que $e \in effets(PH')$ alors $PH \in PHR$.

Le complémentaire de PHR dans PHC définit $PHJC$.

5. Nous utilisons les relations de support entre phénomènes de $PHJC$ et de PHR pour déduire de nouveaux phénomènes réalisés (voir section 2.2.3).
6. Enfin, nous sélectionnons les phénomènes de PHD qui définissent, à coup sûr, des pannes internes. $\forall PH \in PHD$, si $\forall c \in conditions(PH)$, $c \in OBS$ alors $PH \in PHPI$

Exploitation de PHR

Nous allons baser notre raisonnement sur l'exploitation de l'hypothèse de non compensation des pannes : deux défaillances ne peuvent se compenser pour fournir un comportement identique à l'un de ceux que l'on a décrit. Comme chaque organisation d'un phénomène est définie par la conjonction des processus dont l'activité est nécessaire à la réalisation du phénomène ou par une disjonction de conjonctions de tels processus alors, si l'on suppose que deux défaillances dans l'organisation du phénomène ne peuvent produire les effets attendus, une au moins de ces conjonctions doit être valide si le phénomène est réalisé (c'est-à-dire que tous les processus de cette conjonction sont actifs). On peut donc, à partir de l'organisation de chaque phénomène réalisé, définir des ensembles de processus actifs.

1. Lorsque l'organisation d'un phénomène réalisé ne contient qu'une seule conjonction de processus alors chacun de ces processus est actif :

$$\forall PH \in PHR, org(PH) = \{CPRH\},$$

$$\forall PR \in \{CPRH\}, PR \in PRA.$$

Puisque ces processus sont actifs alors leurs conditions et leurs effets sont considérés comme vérifiés, ils sont ajoutés à l'ensemble OBS. Si l'introduction de ces effets ou de ces conditions dans OBS crée une inconsistance, cela signifie que notre modèle des processus ne décrit pas le phénomène désiré et est incorrect.

2. Si l'organisation d'un phénomène est composée de plusieurs conjonctions de processus, cela signifie que ce phénomène peut être réalisé de plusieurs façons (autant de possibilités que de conjonctions). Chaque conjonction va définir une extension possible, dans laquelle les processus qu'elle contient seront actifs. Si plusieurs extensions sont possibles, il reste néanmoins qu'une seule est effective. On va donc vérifier la consistance de chacune de ces extensions :

- Pour une des conjonctions d'un phénomène réalisé (caractérisant une extension), *s'il existe un processus appartenant à cette conjonction dont l'un des effets ou l'une des conditions est inconsistante avec les observations*, alors cette extension ne peut exister. Cette extension ne doit plus être considérée (une des autres conjonctions est valide).

Néanmoins, on peut déterminer si le (ou les) processus qui a créé l'inconsistance est en panne interne ou hors contexte. Si ce processus est en panne interne on va le placer dans PRPI. Dans l'autre cas, il n'est pas nécessaire de conserver la trace de cette inconsistance qui n'est pas anormale.

La construction de ces extensions peut entraîner une explosion combinatoire, il est donc important de limiter au maximum les possibilités de construction d'extensions. Pour cela, il faudra, lors de la définition des phénomènes, éviter de décrire des phénomènes pouvant être réalisés par plusieurs combinaisons différentes de processus mais plutôt plusieurs phénomènes ayant chacun une organisation différente, ces phénomènes pouvant être des alternatives mutuelles.

3. A la fin cette étape, il est nécessaire de réévaluer les phénomènes de $PHJC$, et de PHD n'appartenant pas à $PHPI$, en utilisant les nouvelles observations introduites par l'identification des processus actifs. Nous allons voir dans la section suivante comment cette propagation peut s'effectuer. Dans la suite nous nous placerons dans ce cas.

Propagation des effets et des conditions des phénomènes de PHR

Chaque ajout d'un phénomène dans PHR entraîne l'ajout d'informations dans OBS. En effet, les effets et les conditions de ce phénomène ainsi que des pro-

cessus de son organisation (qui sont alors actifs) sont considérés comme réalisés. Ces nouvelles informations peuvent agir soit sur les effets, soit sur les conditions d'autres phénomènes.

Ces « observations » sont déduites de phénomènes (ou des processus de leur organisation) qui modélisent le fonctionnement attendu du système. Elles ne peuvent donc pas remettre en cause l'appartenance d'un phénomène à *PHC* car elles contrediraient une condition ou un effet d'un phénomène qui représente également le fonctionnement attendu. Si c'était le cas, la réalisation de deux phénomènes de PHAR amènerait à une contradiction et PHAR serait inconsistant.

Ces nouvelles observations peuvent, par contre, permettre de déplacer un phénomène de *PHJC* vers *PHR* dans le cas où elles correspondent à un (des) effet(s) que ce phénomène est le seul à réaliser dans PHAR. Ce phénomène est alors considéré comme réalisé et on le place dans *PHR*. Ses liens de support seront exploités pour déplacer éventuellement des phénomènes de PHJC vers PHR.

Ces nouvelles observations ne peuvent pas non plus remettre en cause l'appartenance d'un phénomène à *PHH* dont une condition était déjà réfutée. Par contre, elles peuvent permettre de déplacer un phénomène de *PH?D* vers *PHPI* dans le cas où elles permettent de vérifier les conditions (non encore vérifiées dans *OBS*) de ce phénomène.

Synthèse

A la fin de cette étape, on dispose donc des ensembles :

- *PHN* définissant les phénomènes qui ne sont pas réalisés, il se décompose en :
 - *PHH* définissant les phénomènes qui ne sont pas réalisables dans le contexte de fonctionnement du système.
 - *PHD* définissant les phénomènes qui peuvent être le siège d'une panne interne, lui même décomposé en :
 - *PHPI* définissant les phénomènes qui sont, à coup sûr, le siège d'une panne interne.
 - *PH?D* définissant les phénomènes qui peuvent être le siège d'une panne interne ou qui sont hors contexte.
- *PHC* définissant les phénomènes qui peuvent être réalisés, il se décompose en :
 - *PHR* définissant les phénomènes qui sont réalisés.
 - *PHJC* définissant les phénomènes pour lesquels l'état ne peut être complètement défini.
- *PRA* définissant des processus actifs (ceux qui appartiennent à l'organisation d'un phénomène de PHR).

4.2.2 Explication

Cette étape n'existe que si l'on dispose d'une description des fonctionnements non désirés possibles. Elle est composée de deux parties, tout d'abord une phase d'explication puis une phase de propagation :

Explication initiale

Pour chaque phénomène de PHN on va examiner les alternatives possibles.

S'il existe une alternative PH^* d'un phénomène non réalisé PH telle que PH^* puisse être considéré comme réalisé (voir section 2.2.2), alors PH^* est ajouté à PHR et PH est retiré de PHN . Le comportement identifié est celui de PH^* lorsque PH est réfuté. L'alternative PH^* spécifie explicitement la défaillance traduite par la non réalisation de PH . L'organisation de PH n'est plus nécessaire pour localiser cette défaillance. Les processus de l'organisation de PH^* sont ajoutés à PRA .

Si PH appartenait à PHH et si une alternative PH^* est identifiée, alors soit elle suppose une modification des conditions pour une même organisation que PH , soit elle suppose une organisation différente. Dans aucun des deux cas, l'organisation de PH ne peut définir une panne interne. Elle ne peut donc pas permettre de construire un conflit de processus.

Si PH appartenait à $PHPI$ et si une alternative PH^* est identifiée alors elle ne peut supposer qu'un changement d'organisation (c'est une panne interne).

Si PH appartenait à $PH?D$ et si une alternative PH^* est identifiée, alors soit elle suppose une modification des conditions pour une même organisation que PH , soit elle suppose une organisation différente. Si l'organisation est identique, alors PH appartenait en fait à PHH , mais ses conditions n'étaient pas observées et donc pas réfutées. Si l'organisation est différente, dans ce cas, on peut dire que PH appartenait en fait à $PHPI$. Cette étape permet de réduire la taille de PHN .

Propagation des effets et des conditions des phénomènes réalisés alternatifs

Les nouveaux phénomènes ajoutés dans PHR sont exploités en utilisant les relations de support (leurs phénomènes support sont réalisés, on peut les placer dans PHR) et en augmentant OBS de leurs conditions et de leurs effets et de celles et ceux des processus de leur organisation.

Les phénomènes alternatifs réalisés (et certains de leurs phénomènes support) ne sont pas des éléments de $PHAR$, mais les nouvelles observations OBS^* (leurs conditions et leurs effets) que l'on peut déduire de leur réalisation ne sont pas inconsistantes avec OBS (c'est une condition nécessaire à leur réalisation qui est donc vérifiée).

Ces nouvelles informations pourront, quand même, comme dans le cas précédent d'observations déduites de la réalisation de phénomènes décrivant le fonc-

tionnement attendu du système, permettre la vérification de conditions ou d'effets de phénomènes classés dans $PH?D$ (qui iront dans $PHPI$) ou dans $PHJC$ (qui iront dans PHR). De plus, elles pourront engendrer de nouvelles contradictions avec les conditions ou les effets de phénomènes classés dans $PH?D$ ou dans $PHJC$.

En effet, OBS contient déjà les conditions et les effets des phénomènes de PHC qui sont dans PHR et, pour qu'un phénomène alternatif soit réalisé il faut que ses conditions et ses effets soient consistants avec OBS . Les nouvelles observations ne pourront donc être en contradiction qu'avec des conditions ou des effets des phénomènes dans le complémentaire de PHR dans PHC c'est-à-dire $PHJC$.

De même, pour un phénomène de PHN , s'il appartient à PHH alors OBS contient déjà une contradiction avec une de ses conditions, s'il appartient à $PHPI$ alors OBS permet déjà de vérifier toutes ses conditions et de contredire un des ses effets. Les nouvelles observations ne pourront donc être en contradiction qu'avec une condition d'un phénomène de $PH?D$ (qui jusqu'ici n'appartenait pas à OBS). On doit donc examiner les phénomènes de $PH?D$ et $PHJC$.

Un phénomène de $PH?D$ peut être influencé par ces nouvelles observations de deux façons :

- En réfutation, si ses conditions deviennent inconsistantes avec les observations, il est alors placé dans PHH .
- En vérification, si toutes ses conditions sont vérifiées par les observations, il est alors placé dans $PHPI$.

De même, un phénomène de $PHJC$ peut être influencé par ces nouvelles observations de trois façons :

- En réfutation :
 - si ses conditions deviennent inconsistantes avec les observations, il est alors placé dans PHH ,
 - si ses effets deviennent inconsistantes, il est alors placé dans PHD (on évalue alors s'il est dans $PHPI$ ou $PH?D$).
- En vérification, si un de ses effets correspond, de manière non-ambiguë, à une observation, il est alors placé dans PHR .

La définition de nouveaux phénomènes défaillants entraîne ensuite une étape de test des alternatives au niveau des phénomènes. Cette étape peut alors produire de nouveaux phénomènes réalisés et donc relancer la procédure de propagation.

Cette phase se termine quand plus aucun phénomène ne peut être mis dans PHR .

4.2.3 Exploitation des résultats

Construction d'un ensemble de processus à examiner

Pour chaque phénomène non identifié comme réalisé, on ne peut pas définir l'état des processus de son organisation. On va donc étudier chacun de ces processus pour déterminer son état véritable. L'ensemble formé par les processus appartenant à l'organisation d'un phénomène qui n'a pas été identifié comme réalisé est appelé *PRE* :

$$\forall PH \in PHD, PH \in PHH, PH \in PHJC, org(PH) = \{CPRH\}, \\ \forall PR \in \{CPRH\} PR \in PRE.$$

Les processus de *PRE* appartiennent à des organisations de phénomènes de *PHAR*, ils correspondent donc au fonctionnement désiré du système.

4.3 Diagnostic au niveau des processus

L'identification de l'état fonctionnel du système en terme de processus, à partir de *PRA* et de *PRE* s'effectue en trois phases (voir figure 4.2) :

1. *Identification*: Dans la première phase on examine les processus de *PRE*. S'ils sont consistants (*PRC*), on les sépare alors entre les actifs (*PRA*) ou les juste consistants (*PRJC*), sinon ils sont inactifs (*PRI*), on les sépare alors en défaillants (*PRD*) ou hors contexte (*PRH*). Les processus de *PRD* peuvent être séparés en *PR?D* et *PRPI*.
2. *Explication*: Dans la deuxième phase, on examine les alternatives des processus hors contexte ou défaillants. Cette étape se divise en deux :
 - (a) Pour chaque processus hors contexte on examine les processus alternatifs appartenant à sa famille.
 - (b) Pour chaque processus défaillant on examine les processus alternatifs hors de sa famille.
3. *Exploitation des résultats*: Dans la troisième étape, on utilise les processus de *PRPI* pour reclasser des phénomènes de *PH?D* et de *PHJC*.

Nous allons détailler chacune de ces étapes.

4.3.1 Identification

Cette étape s'organise en trois parties. Dans un premier temps, à partir des informations initiales, on place les processus dans les différents ensembles *PRH*, *PR?D*, *PRPI*, *PRA* et *PRJC*. Dans un second temps on utilise l'ensemble *PRA* pour augmenter OBS. Enfin, on propage ces nouvelles observations pour déplacer des processus de *PR?D* vers *PRPI* ou de *PRJC* vers *PRA*.

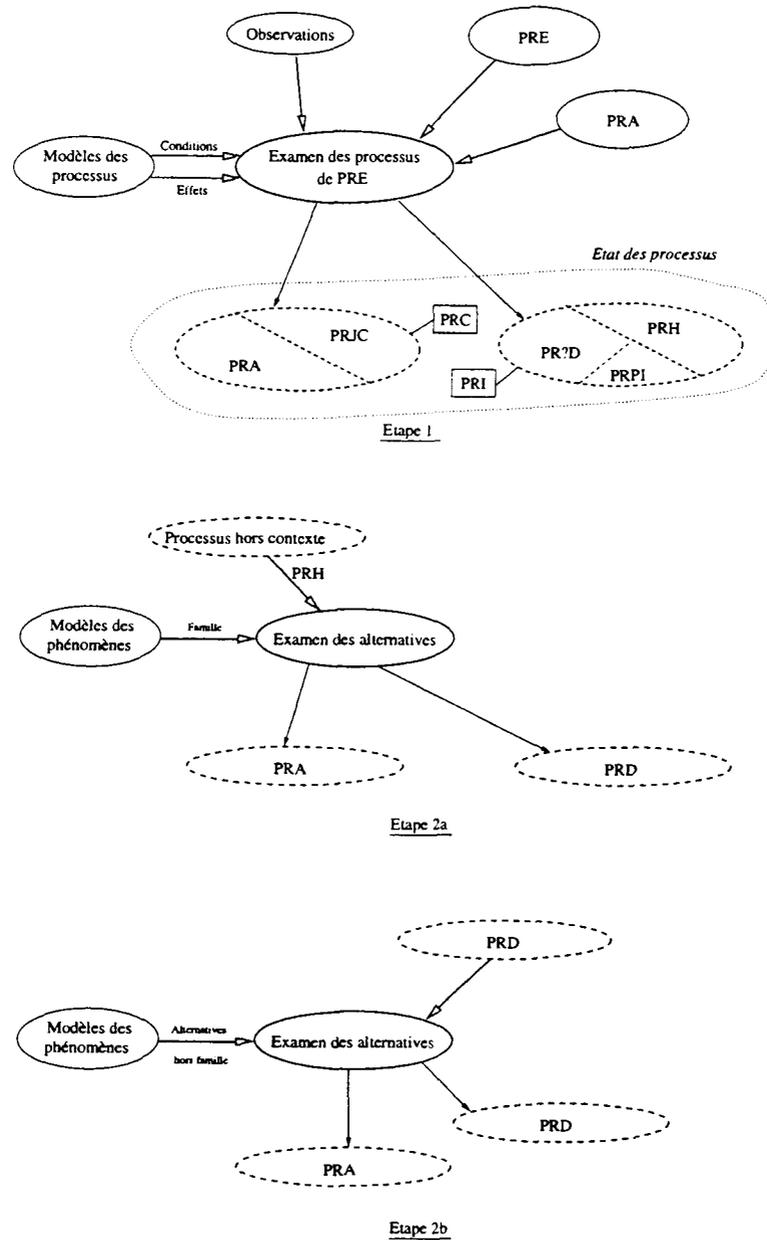


FIG. 4.2 – Organisation de la tâche de diagnostic au niveau des processus : étapes 1, 2a et 2b

Identification initiale

Chacun des processus appartenant à l'ensemble PRE des processus à examiner doit être étudié :

1. Nous examinons tout d'abord les conditions de ces processus :

$$\forall PR \in PRE \text{ si } conditions(PR) \cup OBS \models \perp \text{ alors } PR \in PRH$$

2. Nous examinons ensuite les effets de ces processus :

$$\forall PR \in PRE, PR \notin PRH \text{ si } effets(PR) \cup OBS \models \perp \text{ alors } PR \in PRD, \text{ sinon } PR \in PRC.$$

Nous disposons donc de l'ensemble des processus inactifs PRI ($PRH \cup PRD$) et de l'ensemble des processus consistants.

3. Nous utilisons ensuite les relations de régulation, support et causalité directe associant un processus de PRI à un processus de PRC pour déduire de nouveaux processus hors contexte (voir section 2.3.3). Cette étape permet de réduire le nombre de processus consistants.

4. Nous déterminons, parmi les processus restant dans PRC , ceux qui sont effectivement actifs :

$$\forall PR \in PRC, \text{ si } \exists e \in effets(PR) \text{ tel que } e \in OBS \text{ et } \nexists PR' \in PRC \text{ tel que } e \in effets(PR') \text{ alors } PR \in PRA.$$

Le complémentaire de PRA dans PRC définit $PRJC$.

5. On utilise ensuite les relations de régulation, support et causalité directe entre processus de $PRJC$ et de PRA pour déduire de nouveaux processus actifs (voir section 2.3.3).

Chaque ajout dans PRA entraîne l'ajout d'informations dans OBS , on doit donc réexaminer les processus de $PRJC$ tant que de nouveaux processus actifs sont détectés.

6. Enfin, on sélectionne les processus de PRD qui définissent, à coup sûr, des pannes internes. $\forall PR \in PRD, \text{ si } \forall c \in conditions(PR), c \in OBS \text{ alors } PR \in PRPI.$

Le complémentaire de $PRPI$ dans PRD définit $PR?D$.

Propagation des effets et des conditions des processus actifs

Les nouveaux processus actifs ajoutés dans PRA sont issus de l'organisation de phénomènes qui étaient dans $PHAR$, leurs conditions et leurs effets sont réalisés et s'ajoutent aux observations. Ces informations correspondent au fonctionnement attendu du processus, elles ne peuvent pas rétablir la consistance entre

les conditions d'un processus de *PRH* et les observations. De même, pour un processus de *PRD*, les nouvelles informations ne peuvent rétablir la consistance entre les effets et les observations. Au plus, ces nouvelles informations peuvent permettre de vérifier les conditions d'un processus de *PR?D* et le placer dans *PRPI*. En ce qui concerne les processus de *PRJC*, les nouvelles observations (issues des conditions des nouveaux processus actifs) ne peuvent que permettre de vérifier les effets d'un processus juste consistant PR. Dans ce cas, on déplace PR de *PRJC* vers *PRA* et on exploite les éventuelles relations de régulation de support ou de causalité directe de PR.

Les nouvelles observations issues de *PRA* seront prises en compte au niveau des phénomènes comme on l'a présenté en section 4.2.1 dans le cas des phénomènes réalisés.

Synthèse

A la fin de cette étape, on dispose donc des ensembles :

- *PRI* définissant les processus qui sont inactifs, il se décompose en :
 - *PRH* définissant les processus qui ne sont pas activables dans le contexte de fonctionnement du système.
 - *PRD* définissant les processus qui peuvent être le siège d'une panne interne, qui se décompose lui même en :
 - *PRPI* définissant les processus qui sont le siège d'une panne interne.
 - *PR?D* définissant les processus qui peuvent être le siège d'une panne interne ou qui sont hors contexte.
- *PRC* définissant les processus qui peuvent être actifs, il se décompose en :
 - *PRA* définissant les processus qui sont actifs.
 - *PRJC* définissant les processus pour lesquels l'état ne peut être complètement défini.

4.3.2 Explication

Cette étape n'est réalisable que si l'on dispose de modèles des dysfonctionnements des processus. Elle est composée de deux parties, tout d'abord une phase d'explication puis une phase de propagation :

Explication initiale

Pour chaque processus de PRI on va examiner les alternatives possibles :

1. On examine tout d'abord les processus PR de PRH et les processus PR de $PR?D$. S'il existe un processus PR^* appartenant à la famille de PR qui peut être considéré comme actif (voir section 2.3.2), alors PR^* est ajouté à PRA et PR est retiré de PRI . S'il n'existe pas un tel processus PR^* et que la famille est complètement définie, alors PR est en panne interne (il est le siège d'une panne interne), PR est retiré de PRH (ou de $PR?D$) et ajouté dans $PRPI$ ¹⁷. Si la famille n'est pas complètement définie, alors le processus reste dans PRH (ou $PR?D$).

On élimine ainsi un processus hors contexte ou défaillant (n'étant pas en panne interne) et on obtient soit un nouveau processus actif, soit un nouveau processus en panne interne. On définit ainsi un nouvel ensemble de processus actifs et un nouvel ensemble de processus en panne interne.

2. On examine ensuite les processus PR de $PRPI$. S'il existe un processus PR^* qui est une alternative de PR hors de sa famille et qui peut être considéré comme actif, alors PR^* est ajouté à PRA et PR est retiré de $PRPI$. S'il n'existe pas un tel processus PR^* , alors le processus reste dans $PRPI$: la panne interne n'a pas pu être expliquée.

Les relations entre processus sont utilisées pour reclasser des processus de $PRJC$ vers d'autres ensembles.

Propagation des effets et des conditions des processus actifs alternatifs

Des processus alternatifs actifs, on peut déduire de nouvelles observations. Ces informations ne peuvent pas déplacer un processus de PRH , elles ne peuvent pas rétablir la consistance entre les conditions d'un processus de PRH et les observations.

Un processus de $PR?D$ peut être influencé par ces nouvelles informations de deux façons :

- En réfutation, si ses conditions deviennent inconsistantes avec les observations, il est alors placé dans PRH .
- En vérification, si toutes ses conditions sont vérifiées par les observations, il est alors placé dans $PRPI$.

17. On ajoutera PR dans $PRPI$ même si ses conditions ne sont pas vérifiées car par la suite c'est uniquement la cofonction de PR , définissant la panne interne, qui sera utilisée.

De même, un processus de *PRJC* peut être influencé par ces nouvelles informations de trois façons :

- En réfutation,
 - si ses conditions deviennent inconsistantes avec les observations, il est alors placé dans *PRH*,
 - si ses effets deviennent inconsistants, il est alors placé dans *PRD* (on évalue alors s'il est dans *PRPI* ou *PR?D*).
- En vérification, si un de ses effets correspond, de manière non-ambiguë, à une observation, il est alors placé dans *PRA*.

La définition de nouveaux processus défaillants entraîne ensuite une étape de test des alternatives au niveau des processus. Cette étape peut alors produire de nouveaux processus actifs et donc relancer la procédure de propagation.

Les nouvelles observations issues de *PRA* seront prises en compte comme on l'a présenté en section 4.2.2.

4.4 Construction des conflits

La phase d'identification de l'état fonctionnel se termine quand on ne peut plus trouver de nouveaux phénomènes réalisés ou de processus actifs. On passe alors à la phase de construction des conflits.

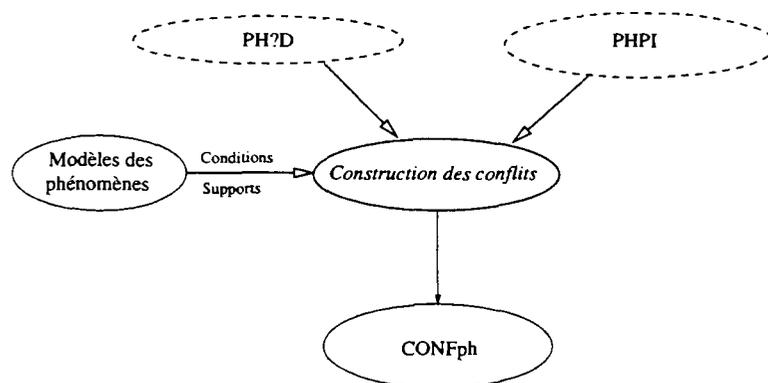


FIG. 4.3 – Construction des conflits de phénomènes

On va chercher à construire des conflits de rôles fonctionnels permettant de rétablir la consistance entre observations et modèles. Pour cela on va tout d'abord construire des conflits de phénomènes (voir figure 4.3) puis des conflits de processus (voir figure 4.4).

On part de la classification des phénomènes et des processus faite auparavant. Pour les phénomènes réalisés et les processus actifs certains correspondent à des

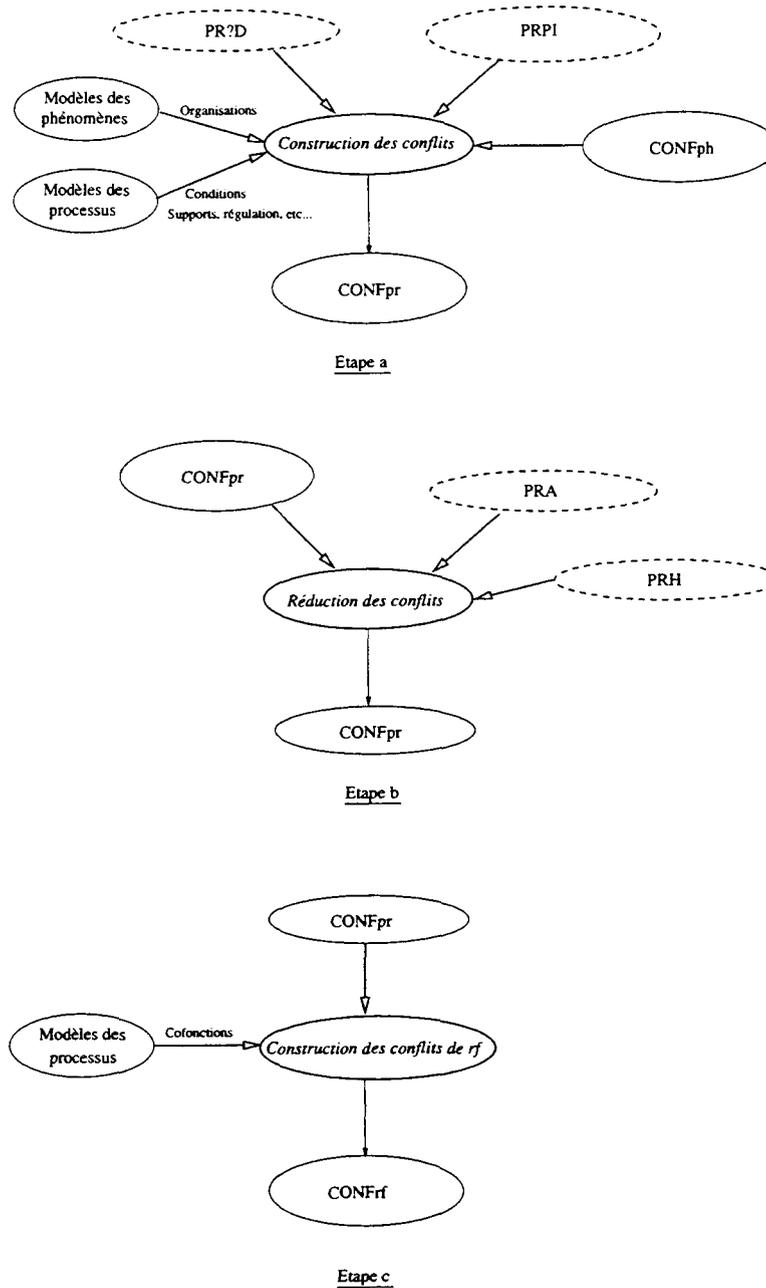


FIG. 4.4 – Construction des conflits de processus et de rôles fonctionnels

explications identifiées du bon fonctionnement. D'autres (les alternatifs) correspondent de fait à des pannes internes qui sont identifiées (grâce à des modèles du mauvais fonctionnement). Les conflits sont construits à partir des phénomènes de $PHPI$ et de $PH?D$. Ces phénomènes provenant de $PHAR$ (donc de la représentation du bon fonctionnement) traduisent une inconsistance qui n'a pas pu être expliquée par un des mauvais fonctionnements représentés. Il en est de même pour les processus de $PRPI$ et de PRD .

Construction des conflits de phénomènes

Nous allons étudier chacun des ensembles de phénomènes construits pour identifier des conflits de phénomènes :

- Les phénomènes de PHR sont réalisés, ils ne définissent pas des pannes internes. Les phénomènes de PHH ne définissent pas non plus de pannes internes. Comme leurs conditions d'activation ne sont pas remplies, ils ne peuvent donc pas donner des effets attendus (par contre les phénomènes qui créent des conditions inconsistantes sont des phénomènes défailants qui eux peuvent éventuellement définir un conflit). Les phénomènes de ces deux ensembles n'apparaîtront pas dans un conflit.
- Chaque phénomène de $PHPI$ définit une panne interne, donc un au moins des processus de son organisation doit être inactif pour expliquer sa non réalisation. Chaque phénomène PH de $PHPI$ définit donc un conflit de phénomènes réduit au seul PH . L'ensemble des conflits de phénomènes est appelé $CONF_{ph}$:

$$\forall PH \in PHPI, \{PH\} \in CONF_{ph}.$$

- Les phénomènes de $PH?D$, ne définissent pas, à coup sûr, une panne interne (ils peuvent être hors contexte). Pour un phénomène PH de $PH?D$, comme $\neg e$ est observé à la place d'un effet attendu e , cette inconsistance ne peut être expliquée que par la défaillance de PH lui même, de l'un des phénomènes dont un effet (non observé) correspond à une de ses conditions, ou d'un phénomène de son support.

Ces phénomènes n'ayant pas leurs effets observés, ne peuvent être que des phénomènes de PHN ou de $PHJC$. S'ils sont des éléments de PHN , ils ne sont pas dans les conditions de fonctionnement attendues ou ils sont en panne interne. Dans les deux cas, les effets qu'ils produisent ne correspondent pas aux conditions de PH ce qui explique que PH ne produit pas l'effet attendu. Par contre, s'ils sont des phénomènes de $PHJC$, on ne peut rien conclure et il faut considérer récursivement les phénomènes de leur support et ceux qui produisent leurs conditions.

On va donc définir une notion de *support généralisé* d'un phénomène PH comme l'ensemble formé :

- des phénomènes produisant un effet correspondant à une de ses conditions non observées,
- des phénomènes, qui ne sont pas identifiés comme réalisés, appartenant à son support,
- et, récursivement, des supports généralisés des phénomènes ci-dessus qui appartiennent à *PHJC*.

Lors de la construction du support généralisé de PH, l'existence d'un phénomène PH* de *PHN* dans ce support suffit à expliquer que PH ne soit pas réalisé. En fait, aucun des phénomènes de la chaîne reliant PH* à PH n'est réalisé car, ne recevant pas les bonnes conditions de son prédécesseur, il ne peut pas fournir les bonnes conditions à son successeur. PH est en fait hors contexte.

Par contre, si le support généralisé de PH ne contient pas de phénomène de *PHN* mais uniquement des phénomènes de *PHJC*, il faut supposer que l'un au moins de ces phénomènes, ou PH lui même, est en panne interne pour expliquer que les effets de PH sont en contradiction avec les observations. En effet, comme les conditions d'un phénomène, si elles ne correspondent pas aux effets d'un phénomène du support généralisé, sont, soit issues d'un phénomène réalisé, soit des conditions exogènes (supposées correctes), la cause initiale est donc une panne interne parmi l'un des phénomènes du support généralisé, qui alors ne produit pas les bons effets pour ses successeurs (qui sont alors hors contexte), ou de PH lui même, qui est alors dans les bonnes conditions mais ne produit pas les bons effets.

On peut donc définir un conflit de phénomènes à partir de l'union d'un phénomène PH de *PH?D* et de son support généralisé (*supportgene(PH)*) si celui ci ne contient pas de phénomène non réalisé :

$$\forall PH \in PH?D, \text{ si } \exists PH^* \in \text{supportgene}(PH) \text{ tel que } PH^* \in PHN \text{ alors } \{PH\} \cup \text{supportgene}(PH) \in CONF_{ph}$$

- Les phénomènes de *PHJC* sont consistants avec les observations. Ils ne définissent donc pas, seuls, de panne interne. Ils peuvent par contre, comme on vient de le décrire, participer à la construction d'un conflit de phénomènes. Les phénomènes de *PHJC* n'intervenant dans aucun conflit correspondent à des phénomènes dont le comportement est non identifiable, ils sont donc non diagnosticables.

Construction des conflits de processus

Les conflits de processus vont être construits à partir des processus en panne interne, des conflits de phénomènes et des processus de $PR?D$.

1. Tout d'abord, on peut noter que chaque processus de $PRPI$ spécifie une panne interne, c'est-à-dire que l'un au moins des rôles fonctionnels de sa cofonction doit être défaillant. Chaque processus de $PRPI$ définit donc un conflit de processus (réduit à lui même).

Soit $CONF_{pr}$ l'ensemble des conflits de processus, $\forall PR \in PRPI, \{PR\} \in CONF_{pr}$.

2. Dans un deuxième temps, on peut exprimer les conflits de phénomènes sous la forme de conflits de processus. Dans un conflit de phénomènes, un au moins des phénomènes est le siège d'une panne interne, donc, au moins un des processus de son organisation est en panne interne. L'union des organisations des phénomènes du conflit définit donc un conflit de processus. Soit C un conflit de phénomènes :

$$\forall C \in CONF_{ph}, \bigcup_{PH_i \in C} organisation(PH_i) \in CONF_{pr}$$

3. Enfin, on peut, comme on l'a fait pour les phénomènes de $PH?D$, s'intéresser aux processus de $PR?D$. On peut définir une notion de *support généralisé* d'un processus PR comme l'ensemble formé :

- des processus produisant un effet correspondant à une de ses conditions non observées,
- des processus, qui ne sont pas identifiés comme actifs, le supportant ou le régulant,
- et, récursivement, des supports généralisés des processus ci-dessus qui appartiennent à $PRJC$.

Lors de la construction du support généralisé, l'existence d'un processus PR^* de PRI dans ce support suffit à expliquer que PR ne soit pas actif. En fait, aucun des processus de la chaîne reliant PR^* à PR n'est actif car, ne recevant pas les bonnes conditions de son prédécesseur, il ne peut pas fournir les bonnes conditions à son successeur. PR est en fait hors contexte.

Si le support généralisé de PR ne contient pas de processus de PRI mais uniquement des processus de $PRJC$, il faut supposer que l'un au moins de ces processus, ou PR lui même, est en panne interne pour expliquer que les effets de PR sont en contradiction avec les observations. En effet, comme les conditions d'un processus, si elles ne correspondent pas aux effets d'un processus du support généralisé, sont, soit issues d'un processus actif, soit des conditions exogènes (supposées correctes), la cause initiale

est donc une panne interne parmi l'un des processus du support généralisé, qui alors ne produit pas les bons effets pour ses successeurs (qui sont alors hors contexte), ou de PR lui même, qui est alors dans les bonnes conditions mais ne produit pas les bons effets.

On peut donc définir un conflit de processus à partir de l'union d'un processus de $PR?D$ et de son support généralisé ($supportgene(PR)$) si celui ci ne contient pas de processus inactif :

$$\forall PR \in PR?D, \text{ si } \nexists PR^* \in supportgene(PR) \text{ tel que } PR^* \in PRI \text{ alors } \{PR\} \cup supportgene(PR) \in CONF_{pr}.$$

L'ensemble $CONF_{pr}$ est maintenu minimal à chaque ajout de conflits.

Les processus de $PRJC$ sont consistants avec les observations. Ils ne définissent donc pas, seuls, de panne interne. Ils peuvent par contre, comme on vient de le décrire, participer à la construction d'un conflit de processus.

Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment l'on utilise les processus de PRA et PRH .

Réduction des conflits de processus

Un processus actif ou hors contexte n'est pas symptomatique d'une panne interne. Ces processus vont donc nous permettre de réduire la taille des conflits : Puisqu'ils ne peuvent pas spécifier de panne interne, ils vont être retirés des conflits de $CONF_{pr}$:

- $\forall C \in CONF_{pr}$ si $\exists PR \in PRA$ et $PR \in C$ alors $C = C - \{PR\}$
- $\forall C \in CONF_{pr}$ si $\exists PR \in PRH$ et $PR \in C$ alors $C = C - \{PR\}$

Après cette étape, les conflits ne contiennent donc plus que des processus défaillants ou des processus juste consistants.

Construction des conflits de rôles fonctionnels

Dans un conflit de processus, un au moins des processus est le siège d'une panne interne, donc un des rôles fonctionnels de sa cofonction n'est pas rempli. On peut donc construire, à partir d'un conflit de processus, un conflit de rôles fonctionnels :

$$\forall C \in CONF_{pr}, \cup_{PR_i \in C} cofonction(PR_i) \in CONF_{rf}.$$

4.4.1 Construction des conflits de composants

Les conflits entre rôles fonctionnels sont utilisés pour construire des candidats en terme de composants défectueux. Dans une étape de traduction, on transforme les conflits entre rôles fonctionnels en conflits entre composants. Ceci est réalisé en

utilisant les liens entre rôles fonctionnels et composants (chaque rôle fonctionnel interprète partiellement le comportement d'un composant). Néanmoins, certains des rôles fonctionnels correspondent à des sources d'effort ou de flux et si la valeur de cet effort ou de ce flux est connue alors on peut décider si cette valeur est normale ou non. Ainsi, on exonérera les rôles fonctionnels sources si l'on dispose d'une mesure de la variable qu'ils imposent, ou si cette variable, bien que non mesurée, est imposée par un (des) composant(s), externe au système considéré, dont on est sûr du bon fonctionnement.

4.5 Implémentation

4.5.1 Structure des données

Nous allons décrire les structures des données utilisées :

- *VARIABLE*: définition de l'état qualitatif de chaque variable sous la forme d'un triplet $\langle \text{ident}, \text{signe}, \text{sens} \rangle$
 - *ident*: identificateur de la variable.
 - *signe*: le signe de la variable dont les valeurs possibles sont $+$, $-$, 0 , $?$ (la valeur $?$ signifiant que le signe est inconnu).
 - *sens*: le sens de variation de la variable dont les valeurs possibles sont $+$, $-$, 0 , $?$ suivant que la variable est croissante, décroissante, stable ou que son sens de variation est inconnu.
- *OBS*: liste de *VARIABLE*
- *PHEN*: chaque phénomène est défini par $\langle \text{ident}, \text{organisation}, \text{cond}, \text{effet}, \text{supports}, \text{altern} \rangle$
 - *ident*: identificateur du phénomène.
 - *organisation*: liste d'*idents* (identificateurs des processus de l'organisation du phénomène)
 - *cond*: liste de *VARIABLE* (définissant les conditions nécessaires à la réalisation du phénomène).
 - *effet*: liste de *VARIABLE* (définissant les conditions nécessaires à la réalisation du phénomène)
 - *supports*: liste d'*idents* (identificateurs des phénomènes fournissant un support au phénomène)
 - *altern*: liste d'*idents* (identificateurs des phénomènes alternatifs)

- *PRO*: chaque processus est défini par $\langle ident, cofonction, cond, effet, supports, altern \rangle$.
 - *ident*: identificateur du processus.
 - *cofonction*: liste d'*idents* (identificateurs des rôles fonctionnels de la cofonction du processus)
 - *cond*: liste de *VARIABLE* (définissant les conditions nécessaires à l'activation du processus)
 - *effet*: liste de *VARIABLE* (définissant les conditions nécessaires à l'activation du processus)
 - *supports*: liste d'*idents* (identificateurs des processus fournissant un support au processus)
 - *altern*: liste d'*idents* (identificateurs des processus alternatifs)
- *PHAR*: liste d'*idents*, c'est la liste des identificateurs des phénomènes à réaliser.

4.5.2 Fonctions

Nous allons définir différentes fonctions que nous utiliserons par la suite pour présenter l'algorithme que nous avons développé. On notera $champ(p)$ le contenu de *champ* dans la structure de l'élément *p*. Par exemple, $cond(p)$ correspond à l'ensemble de variables définies dans le champ *cond* pour l'élément *p* de même, $sens(o)$ correspond au sens de variation de la variable *o* (i.e. +, -, 0 ou ?).

- *construit_hors_contexte(P,H)*:
 Cette fonction identifie parmi une liste P, donnée en entrée, d'identificateurs de phénomènes ou de processus, ceux qui ont des conditions inconsistantes avec les observations et en renvoie la liste H en sortie.

```

H ← {∅}
  Pour p ∈ P
    Pour c ∈ cond(p)
      Pour o ∈ OBS
        Si ident(c)≡ident(o)
          Si ((signe(c)≠signe(o)) ∧ (signe(c)≠'??') ∧ (signe(o)≠'??'))
            V ((sens(c)≠sens(o)) ∧ (sens(c)≠'??') ∧ (sens(o)≠'??'))
              H ← H ∪ {p}
        Fin Si
  Fin Si
  
```

```

    Fin Si
  Fin Pour
Fin Pour
Fin Pour

```

- *construit_defaillant(P,H)*: Cette fonction identifie parmi une liste P, donnée en entrée, d'identificateur de phénomènes ou de processus, ceux qui ont des effets inconsistants avec les observations et en renvoie la liste H en sortie. L'algorithme définissant cette fonction est identique à celui de *construit_hors_contexte(P,H)*, l'unique différence est le remplacement de *cond(p)* par *effets(p)*.
- *construit_realise(P,H)*: Cette fonction identifie parmi une liste P, donnée en entrée, d'identificateurs de phénomènes ou de processus, ceux qui ont des effets vérifiés par les observations et en renvoie la liste H en sortie.

```

H ← {∅}
Pour p ∈ P
  Pour c ∈ effets(p)
    Pour o ∈ OBS
      Si ident(c)≡ident(o)
        Si ( (((signe(c)≡'??') ∨ (signe(o)≡'??')) ) ∧ (sens(c)≠sens(o)))
          ∨ (((sens(c)≡'??') ∨ (sens(o)≡'??')) ∧ (signe(c)≠signe(o)))
          ∨ ( ((sens(c)≠sens(o)) ∨ (signe(c)≠signe(o))) ∧ ((signe(c)≠'??')
            ∧ (signe(o)≠'??') ∧ (sens(c)≠'??') ∧ (sens(o)≠'??')) )
            passer au c suivant
          Sinon H ← H ∪ {p}
        Fin Si
      Fin Si
    Fin Pour
  Fin Pour
Fin Pour

```

- *construit_panne_interne(P,H)*: Cette fonction identifie parmi une liste P, donnée en entrée, d'identificateurs de phénomènes ou de processus, ceux qui ont toutes leurs conditions vérifiées par les observations et en renvoie la liste H en sortie.

```

H ← {∅}

```

```

Pour p ∈ P
  Pour c ∈ cond(p)
    Pour o ∈ OBS
      Si ident(c)≡ident(o)
        Si ( (((signe(c)≡' ?') ∨ (signe(o)≡' ?')) ) ∧ (sens(c)≠sens(o)))
          ∨ ( ((sens(c)≡' ?') ∨ (sens(o)≡' ?')) ∧ (signe(c)≠signe(o)))
          ∨ ( ((sens(c)≠sens(o)) ∨ (signe(c)≠signe(o))) ∧ ((signe(c)≠' ?')
            ∧ (signe(o)≠' ?') ∧ (sens(c)≠' ?') ∧ (sens(o)≠' ?')) )
            passer au p suivant
        Fin Si
      Fin Si
    Fin Pour
  Fin Pour
  H ← H ∪ {p}
Fin Pour

```

- *supports_refute*(P_1, P_2, P_3, P_4): Cette fonction permet d'ajouter dans P_1 tous les éléments de P_2 et P_3 qui ont comme support un élément de P_1 ou de P_2 . Cette fonction va être utilisée pour identifier les phénomènes (ou les processus) hors contexte car supportés par des phénomènes non réalisés (ou des processus inactifs): on aura donc $P_1 \equiv PHH$ (resp. PRH), $P_2 \equiv PHD$ (resp. PRI), $P_3 \equiv PHC$ (resp. PRA). P_4 qui contient les éléments de P_3 placés dans P_1 . Les éléments de P_2 placés dans P_1 sont éliminés de P_2 .

```

Π ← {∅}
P4 ← {∅}
Pour p ∈ P3 ∪ P2
  Pour p* ∈ supports(p)
    Si p* ∈ P1
      P1 ← P1 ∪ {p}
      Π ← Π ∪ {p}
    Fin Si
  Fin Pour
Fin Pour
P2 ← P2 - Π

```

```

 $P_4 \leftarrow P_3 \cap \Pi$ 
 $\Pi \leftarrow \{\emptyset\}$ 
Pour  $p \in P_3 \cup P_1$ 
  Pour  $p^* \in \text{supports}(p)$ 
    Si  $p^* \in P_2$ 
       $P_1 \leftarrow P_1 \cup p$ 
       $\Pi \leftarrow \Pi \cup p$ 
    Fin Si
  Fin Pour
Fin Pour
 $P_2 \leftarrow P_2 - \Pi$ 
 $P_4 \leftarrow P_4 \cup (P_3 \cap \Pi)$ 

```

- *supports_verif*(P_1, P_2): Cette fonction permet de placer dans P_1 tous les éléments de P_2 qui apparaissent dans le support d'un élément de P_1 . Cette fonction va être utilisée pour identifier les phénomènes ou les processus réalisés car supportant des phénomènes ou des processus réalisés : on aura donc $P_1 \equiv PHR$ (resp. PRA) et $P_2 \equiv PHAR$ (resp. PRE).

```

Pour  $p \in P_2$ 
  Pour  $p^* \in \text{supports}(p)$ 
    Si  $p^* \in P_1$ 
       $P_1 \leftarrow P_1 \cup \{p\}$ 
    Fin Si
  Fin Pour
Fin Pour

```

- *etend_obs*(P): Cette fonction ajoute dans OBS les conditions et les effets de éléments de P .

```

Pour  $p \in P$ 
  Pour  $c \in \text{cond}(p)$ 
     $\text{OBS} \leftarrow \text{OBS} \cup \{c\}$ 
  Fin Pour
  Pour  $e \in \text{effets}(p)$ 

```

```
OBS ← OBS ∪ {e}
```

```
Fin Pour
```

```
Fin Pour
```

- *construit_pr(E,S)*: Cette fonction construit un ensemble S d'identificateurs correspondant à l'union des organisations des éléments de la liste d'identificateurs E.

```
S ← {∅}
```

```
Pour p ∈ E
```

```
  Pour c ∈ organisation(p)
```

```
    S ← S ∪ {c}
```

```
  Fin Pour
```

```
Fin Pour
```

- *construit_rf(E,S)*: Cette fonction construit un ensemble S d'identificateurs correspondant à l'union des cofonctions des éléments de la liste d'identificateurs E. L'algorithme définissant cette fonction est identique à celui de *construit_pr(E,S)*, l'unique différence est le remplacement de *organisation(p)* par *cofonction(p)*.
- *complementaire(P₁,P₂,P₃)*: Cette fonction renvoie dans P₃ le complémentaire de P₁ dans P₂.
- *nbre_elements(P)*: Cette fonction renvoie le nombre d'éléments de P.
- *etudie_alternatives(P,A)*: A partir d'un ensemble d'éléments P, cette fonction identifie l'unique alternative réalisée (si elle existe) de chacun des éléments de P. Cet ensemble d'alternatives est stocké dans A. Parallèlement, les éléments de P pour lesquels une alternative réalisée est identifiée sont éliminés de P.

```
A ← ∅
```

```
Pour p ∈ P
```

```
  ALT ← altern(p)
```

```
  construit_hors_contexte(ALT,HC)
```

```
  complementaire(HC,ALT,CC)
```

```
  construit_defaillant(CC,ED)
```

```
  complementaire(ED,CC,ECC)
```

```

construit_realise(ECC,R)
  Si nbre_elements(R) = 1
    A ← A ∪ R
    P ← P - {p}
  Fin Si
Fin Pour

```

- *support_generalise(p,L,S)*: Cette fonction construit le support généralisé d'un élément p, pour un ensemble d'éléments L donné.

```

S ← ∅
Pour p* ∈ L
  Pour c ∈ cond(p)
    Pour e ∈ effets(p*)
      Si ( (ident(e) ≡ ident(c))
        Si ( (((signe(c)≡'??') ∨ (signe(o)≡'??')) ∧ (sens(c)≡sens(o)))
          ∨ (((sens(c)≡'??') ∨ (sens(o)≡'??')) ∧ (signe(c)≡signe(o)))
          ∨ ((sens(c)≠sens(o)) ∧ (signe(c)≡signe(o))) )
            Sinon S ← S ∪ { p* }
        Fin Si
      Fin Si
    Fin Pour
  Fin Pour
Fin Pour
S ← S ∪ support(p)

```

- *conflits_panne_interne(P,C,Type)*: Cette fonction construit un ensemble de conflits à partir des organisations ou des cofonctions des éléments décrits dans P qui sont du type Type (phénomène ou processus).

```

C ← ∅
Si Type ≡ phenomene
  Pour p ∈ P
    R ← R ∪ organisation(p)
  Fin Pour

```

```

Fin Si
Si Type  $\equiv$  processus
  Pour  $p \in P$ 
     $R \leftarrow R \cup \text{cofonction}(p)$ 
  Fin Pour
Fin Si

```

- *conflits_de_defaillants*(P, E, N, C): Cette fonction construit un ensemble de conflits à partir des supports généralisés (définis relativement à E) des éléments de P si ces supports généralisés ne contiennent pas d'éléments de N .

```

 $C \leftarrow \emptyset$ 
Pour  $p \in P$ 
  support_generalise( $p, E, S$ )
  Pour  $a \in S$ 
    Pour  $b \in N$ 
      Si  $a \equiv b$ 
        passer au  $p$  suivant
      Fin Si
    Fin Pour
  Fin Pour
Pour  $p^* \in S$ 
  support_generalise( $p^*, E, S'$ )
  Pour  $a \in S'$ 
    Pour  $b \in N$ 
      Si  $a \equiv b$ 
        passer au  $p^*$  suivant
      Fin Si
    Fin Pour
  Si  $a \in S$ 
    Sinon  $S \leftarrow S \cup \{a\}$ 
  Fin Pour
Fin Pour
 $C \leftarrow C \cup \{S\}$ 
Fin Pour

```

4.5.3 Procédure

```

nombre_OBS ← 0
nombre_PHR ← 0
nombre_PRA ← 0

/ * début de la saturation sur le nombre d'observations * /
Tant que (nbre_elements(OBS) > nombre_OBS)
  construit_hors_contexte(PHAR,PHH)
  complementaire(PHH,PHAR,PHT)
  construit_defaillant(PHT,PHD)
  complementaire(PHH∪PHD,PHAR,PHT1)
  supports_refute(PHH,PHD,PHT1,PHT)
  complementaire(PHT1,PHT,PHC)
  construit_realise(PHC,PHR)
  complementaire(PHR,PHC,PHJC)

/ * début de la saturation sur les phenomenes * /
Tant que (nbre_elements(PHR) > nombre_PHR)
  nombre_PHR ← nbre_elements(PHR)
  supports_verif(PHR,PHJC)
  etend_obs(PHR)
  construit_pr(PHR,PRA)
  etend_obs(PRA)
  Si nbre_elements(PHJC) ≠ 0 alors
    construit_hors_contexte(PHJC,PHT)
    Si nbre_elements(PHT) ≠ 0 alors
      PHH ← PHH ∪ PHT
      PHJC ← PHJC - PHT
    Fin Si
  Fin Si
  Si nbre_elements(PHH) ≠ 0 alors
    etudie_alternatives(PHH,A)
    Si A ≠ ∅ alors
      PHH ← PHH - {A}
      PHR ← PHR ∪ {A}
    Fin Si
  Fin Si
  Si nbre_elements(PHJC) ≠ 0 alors
    construit_defaillant(PHJC,PHT)
    Si nbre_elements(PHT) ≠ 0 alors
      PHD ← PHD ∪ PHT
      PHJC ← PHJC - PHT

```

```

    Fin Si
  Fin Si
  Si nbre_elements(PHD) ≠ 0 alors
    etudie_alternatives(PHD,A)
    Si A ≠ ∅ alors
      PHD ← PHD - {A}
      PHR ← PHR ∪ {A}
    Fin Si
  Fin Si
  supports_refute(PHH,PHD,PHJC,PHT)
  complementaire(PHT,PHJC,PHT')
  PHJC ← PHT'
  Si nbre_elements(PHJC) ≠ 0 alors
    construit_realise(PHJC,PHT)
    Si nbre_elements(PHT) ≠ 0 alors
      PHR ← PHR ∪ PHT
      PHJC ← PHJC - PHT
    Fin Si
  Fin Si
  supports_verif(PHJC,PHR)
  PHJC ← PHJC - { PHJC ∩ PHR }
  Fin Tant que
/ * fin de la saturation sur les phenomenes * /

  construit_panne_interne(PHD,PHPI)
  complementaire(PHPI,PHD,PH?D)
  construit_pr(PHR,PRA)
  construit_pr(PHHUPHD,PRE)
  nombre_OBS ← nbre_elements(OBS)

/ * passage au niveau des processus * /
  construit_hors_contexte(PRE,PRH)
  complementaire(PRH,PRE,PRT)
  construit_defaillant(PRT,PRD)
  complementaire(PRHUPRD,PRE,PRT1)
  supports_refute(PRH,PRD,PRT1,PRT)
  complementaire(PRT1,PRT,PRC)
  construit_realise(PRC,PRA)
  complementaire(PRA,PRC,PRJC)

/ * début de la saturation sur les processus * /
  Tant que (nbre_elements(PRA) > nombre_PRA)
    nombre_PRA ← nbre_elements(PRA)

```

```

supports_verif(PRA,PRJC)
etend_obs(PRA)
Si nbre_elements(PRJC)≠0 alors
  construit_hors_contexte(PRJC,PRT)
  Si nbre_elements(PRT)≠0 alors
    PRH ← PRH ∪ PRT
    PRJC ← PRJC - PRT
  Fin Si
Fin Si
Si nbre_elements(PRH)≠0 alors
  etudie_alternatives(PRH,A)
  Si A ≠ ∅ alors
    PRH ← PRH - {A}
    PRA ← PRA ∪ {A}
  Fin Si
Fin Si
Si nbre_elements(PRJC)≠0 alors
  construit_defaillant(PRJC,PRT)
  Si nbre_elements(PRT)≠0 alors
    PRD ← PRD ∪ PRT
    PRJC ← PRJC - PRT
  Fin Si
Fin Si
Si nbre_elements(PRD)≠0 alors
  etudie_alternatives(PRD,A)
  Si A ≠ ∅ alors
    PRD ← PRD - {A}
    PRA ← PRA ∪ {A}
  Fin Si
Fin Si
supports_refute(PRH,PRD,PRJC,PRT)
complementaire(PRT,PRJC,PRT')
PRJC ← PRT'
Si nbre_elements(PRJC)≠0 alors
  construit_realise(PRJC,PRT)
  Si nbre_elements(PRT)≠0 alors
    PRA ← PRA ∪ PRT
    PRJC ← PRJC - PRT
  Fin Si
Fin Si
supports_verif(PRJC,PRA)
PRJC ← PRJC - { PRJC ∩ PRA }
Fin Tant que

```

```

/ * fin de la saturation sur les processus * /

    construit_panne_interne(PRD,PRPI)
    complementaire(PRPI,PRD,PR?D)
Fin Tant que
/ * fin de la saturation sur le nombre d'observations * /

/ * construction des conflits * /
conflits_panne_interne(PHPI,CPH,phen)
complementaire(PHJCUPHR,PHAR,PHNT)
conflits_de_defaillants(PH?D,PHAR,PHNT,CPH')
CPH ← CPH ∪ CPH'
Pour ch ∈ CPH
    construit_pr(ch,cr)
    CPR ← CPR ∪ {cr}
Fin Pour
conflits_panne_interne(PHPI,CPR',phen)
CPR ← CPR ∪ CPR'
complementaire(PRJCUPRA,PRE,PRIT)
conflits_de_defaillants(PR?D,PRE,PRIT,CPR1)
CPR ← CPR ∪ CPR1
Pour cr ∈ CPR
    construit_rf(cr,cf)
    CRF ← CRF ∪ {cf}
Fin Pour
En fin de traitement le programme fournit les sorties suivantes :

```

- Pour les phénomènes : les ensembles *PHR*, *PHJC*, *PHH*, *PHPI* et *PH?D* sous la forme de listes d'identificateurs.
- Pour les processus : les ensembles *PRA*, *PRJC*, *PRH*, *PRPI* et *PR?D* sous la forme de listes d'identificateurs.
- L'ensemble final d'observations *OBS* sous la forme d'une liste de variables.
- L'ensemble *CRF* des conflits de rôles fonctionnels.

Nous verrons, dans la dernière partie de ce rapport, les résultats obtenus par ce programme dans le cas du diagnostic des joints du Groupe Moto-Pompe Primaire.

4.6 Le diagnostic

Un diagnostic est défini par :

- Les phénomènes réalisés et les processus actifs qui permettent de déduire l'ensemble des observations normales.
- Les phénomènes et les processus alternatifs réalisés qui permettent de déduire un sous-ensemble des observations anormales.
- Les composants en panne (pour lesquels aucun fonctionnement alternatif n'a pu être identifié) qui appartiennent à un diagnostic noyau construit à partir des conflits (par exemple en construisant les hitting-sets).

Un diagnostic rétablit donc la consistance avec l'ensemble des observations et il est de plus abductif pour un sous ensemble des observations $\Psi^+ \subset OBS$, Ψ^+ contient les observations normales et les observations anormales qui sont expliquées par les phénomènes ou les processus alternatifs que nous avons identifiés comme réalisés ou actifs.

Par rapport à une démarche strictement basée sur la consistance, notre approche repose sur l'hypothèse de non compensation des défaillances. Cette hypothèse nous permet d'exonérer les sous-systèmes (phénomènes ou processus) dont le modèle permet d'expliquer certaines des observations.

Nous pouvons ensuite utiliser ces candidats pour limiter l'espace de recherche dans une approche à base de modèles utilisant des modèles des défaillances des composants. En effet, notre approche de modélisation ne permet pas de gérer des modèles alternatifs pour le comportement individuel des composants. On peut donc espérer utiliser les conflits et les candidats diagnostics comme base de départ du raisonnement si l'on dispose d'un modèle plus fin des comportements individuels des composants potentiellement anormaux. On va donc chercher, dans une approche MBD prenant en compte les comportements défectueux des composants, des diagnostics abductifs permettant d'expliquer les observations qui ne l'ont pas encore été.

Ces approches permettant la gestion des comportements défectueux des composants sont au nombre de deux :

1. *Les approches abductives* : A partir des candidats on peut limiter l'exploration du graphe aux justifications associées aux composants appartenant aux candidats diagnostics. On obtient ainsi des explications sur les dysfonctionnements de ces composants.
2. *Les approches par consistance* : On n'introduira dans la base de connaissances que les modèles du fonctionnement normal et des pannes des composants apparaissant dans les candidats diagnostics. Pour améliorer la recherche on peut utiliser une méthode basée sur l'utilisation d'un ATMS focalisable ([Yacoub et al.(1996)] et [Dressler et Struss(1994)]). Ces méthodes

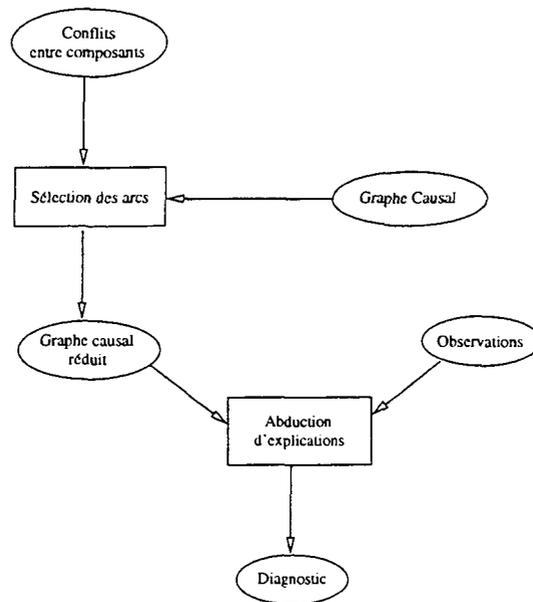


FIG. 4.5 – Utilisation des conflits pour la focalisation d'une approche abductive

supposent l'organisation des modèles de pannes en fonction d'un ordre de préférence.

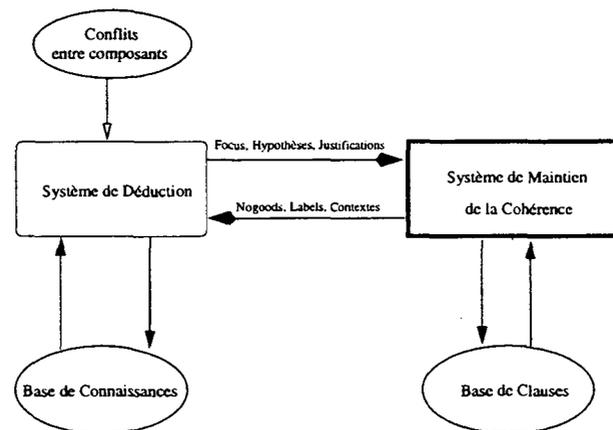


FIG. 4.6 – Utilisation des conflits pour la focalisation d'une approche par consistance

5

Conclusion

La définition des différents ensembles de phénomènes et de processus nous a permis de représenter explicitement les phénomènes ou les processus pour lesquels le contexte ne permettait pas la réalisation ou l'activité (*PHH* et *PRH*) et les phénomènes (ou les processus) dont le comportement est anormal dans un contexte donné (*PHPI* et *PRPI*).

Ces définitions conduisent naturellement à la description des alternatives qui vont permettre de définir les comportements normaux du système dans différents contextes et les comportements anormaux dans un contexte donné. Pour un phénomène (ou un processus), ses alternatives en terme de changement de contexte peuvent être définies simplement en étudiant le comportement des processus de son organisation (respectivement des rôles fonctionnels de sa cofonction) dans ce contexte. De même, les alternatives prenant en compte des changements d'organisation (respectivement de cofonction) peuvent être étudiées préalablement à partir des dysfonctionnements connus du système.

On peut, dans le cas des alternatives en terme de changement de contexte, vérifier la complétude de la description des différentes alternatives. Pour une organisation donnée, on peut définir a priori le domaine des variations physiquement admissibles de chaque condition et en déduire les différents contextes possibles. Si pour chaque domaine identifié, un phénomène est décrit alors la complétude du modèle du fonctionnement normal est assurée.

Du point de vue du diagnostic, notre méthode repose schématiquement sur deux phases principales :

1. Tout d'abord, on identifie les comportements permettant d'expliquer les observations. Ces comportements peuvent être des comportements attendus (phénomènes de PHAR ou processus de PRE) ou des comportements non désirés (phénomènes et processus alternatifs) correspondant explicitement à des pannes internes ou à des changements du domaine de fonctionnement des composants. Ces alternatives se substituent au modèle du phénomène ou du processus défaillant et expliquent sa non réalisation. Elles ne remettent

pas en cause les déductions effectuées préalablement et ne modifient pas l'ensemble de phénomènes réalisés et de processus actifs.

2. Dans un deuxième temps, on calcule successivement des conflits de phénomènes, de processus puis de rôles fonctionnels permettant de rétablir la consistance avec les observations. Ces observations conduisant à l'identification d'inconsistances avec les modèles du fonctionnement normal sont celles qui n'ont pas pu être expliquées par une alternative dans la phase précédente.

Les intérêts majeurs de cette méthode sont en particulier :

- La compilation du comportement est effectuée « hors ligne », les modèles du comportement se réduisent à des couples (conditions, effets) qui sont comparés aux observations disponibles. Ces couples spécifient des relations d'influence, entre les variables conditions et effets, que l'on pourrait retrouver dans le graphe d'influence mais dont l'explicitation en fonction des hypothèses d'interprétation est souvent difficile. La phase d'identification ne nécessite pas de phase de simulation mais juste une phase de propagation.
- L'utilisation de l'aspect hiérarchique de la multi-modélisation permet une exonération au plus tôt des composants dont le comportement permet d'expliquer les observations (chaque phénomène réalisé implique l'activité des processus de son organisation).
- La construction des « conflits » est, elle aussi, effectuée partiellement « hors ligne ». Les organisations des phénomènes sont obtenues à partir des comportements que l'on veut représenter (en décrivant les processus nécessaires à leur réalisation). Les cofonctions des processus sont obtenues à partir du comportement « fondamental » des composants du système (en utilisant le modèle comportemental décrit par le bond-graph).
- La notion de panne interne et de panne externe que nous avons exploitée permet de limiter la construction des conflits. Les phénomènes ou les processus hors contexte ne génèrent pas de conflits. De plus, lorsqu'ils apparaissent dans un support généralisé d'un élément de $PH?D$ et de $PR?D$ ils permettent de supprimer le conflit potentiel. Enfin, on peut (par exonération) les supprimer des conflits où ils apparaissent ce qui limite la taille des conflits générés.

On voit donc que pour tirer pleinement parti de l'approche multi-modèles il faut pouvoir disposer de la description des alternatives. En effet, leur utilisation limite la construction des conflits en permettant l'exonération des éléments hors contexte et des phénomènes réalisés et permet de spécifier explicitement l'effet de pannes connues.

L'ensemble de notre méthode revient en fait à gérer ces conflits en fonction des « observations » disponibles et des alternatives décrites. Les observations anormales génèrent des conflits, ces conflits seront « expliqués », grâce aux modèles alternatifs dont l'on dispose, ou « exploités », pour construire des candidats rétablissant la consistance lorsqu'aucune alternative n'a pu être identifiée.

Dans notre approche, nous commençons par étudier l'état des phénomènes mais on peut noter que l'on pourrait commencer par étudier l'état des processus. Dans ce cas, il faudrait être capable de construire l'ensemble de processus qui devraient être actifs (à l'image de PHAR). Néanmoins, il faudrait disposer de suffisamment de points de mesure ou de possibilités d'estimer les variables du modèle pour pouvoir réfuter ou vérifier l'état de ces processus. C'est à dire, comme dans le cas de PHAR, pouvoir, en fonctionnement normal, observer ou déduire l'activité de tous ces processus.

Quatrième partie

Application

1

Introduction

L'application sur laquelle nous avons testé notre procédure de diagnostic est un sous ensemble du Groupe Moto -Pompe Primaire (GMPP). Le GMPP (figure 1.1) est utilisé dans la boucle primaire des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) pour rattraper les pertes de charges. Il est composé principalement d'un moteur, d'une roue et d'un corps, son rôle est de maintenir un débit constant dans le circuit primaire. Pour éviter toute contamination de l'enceinte, on ne peut tolérer aucune remontée du fluide primaire le long de l'arbre. Pour cela, de l'eau issue du RCV (contrôle volumétrique et chimique), à une pression supérieure de celle du fluide primaire, est injectée au niveau de la roue vers le circuit primaire. Une partie de cette eau remonte vers le moteur le long de l'arbre et est collectée par trois joints. Enfin, un échangeur de chaleur est placé à l'interface entre le corps enfermant la roue et le corps contenant l'injection et les joints. Cet échangeur permet d'éviter un échauffement excessif du corps de la pompe dû à la température du fluide primaire. Le fluide caloporteur de cet échangeur provient du circuit RRI (circuit de refroidissement intermédiaire).

Le sous-ensemble que nous avons considéré est l'ensemble de composants réalisant l'injection d'eau RCV et les trois joints permettant la récupération de la fuite le long de l'arbre. En fonctionnement normal, le joint 1 absorbe la majorité de la fuite, le joint 2 évacue le restant de la fuite et le joint 3 n'est utilisé que lors d'une défaillance du joint 1. Dans ce cas, le joint 2 est dimensionné pour suppléer à la panne du joint 1 et le joint 3 effectue la tâche assignée normalement au joint 2.

Dans cette partie, nous allons tout d'abord décrire le modèle comportemental que nous avons construit (chapitre 2) ainsi que les modèles qui en découlent directement : modèle des rôles fonctionnels et graphe d'influence. Dans un deuxième temps (chapitre 3) nous présentons les processus que l'on peut identifier à partir du bond-graph, ces processus définissent ensuite des phénomènes qui sont décrits dans le chapitre 4. Le chapitre 5 décrit les différents dysfonctionnements que l'on peut identifier. Enfin, dans le chapitre 6, nous montrons l'application de la méthode décrite dans la partie précédente pour résoudre des problèmes de

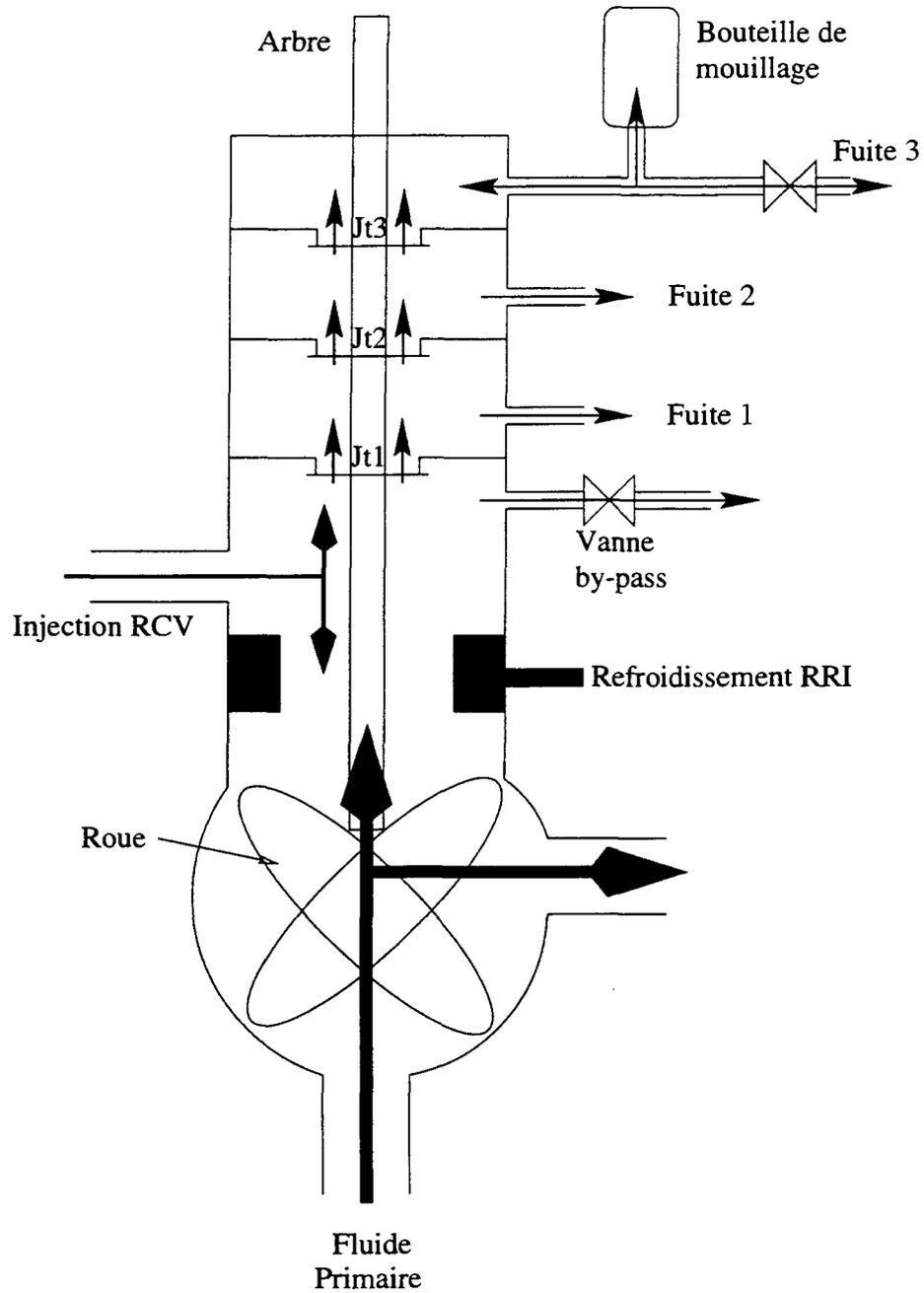


FIG. 1.1 - Schéma du GMPP

diagnostics.

2

Le modèle comportemental

Ce modèle est basé sur une analyse du fonctionnement des joints d'après [Combes(1991)]. Les hypothèses retenues ont été validées grâce à l'analyse de mesures réelles, en particulier celles issues du système de surveillance des réacteurs (KIT).

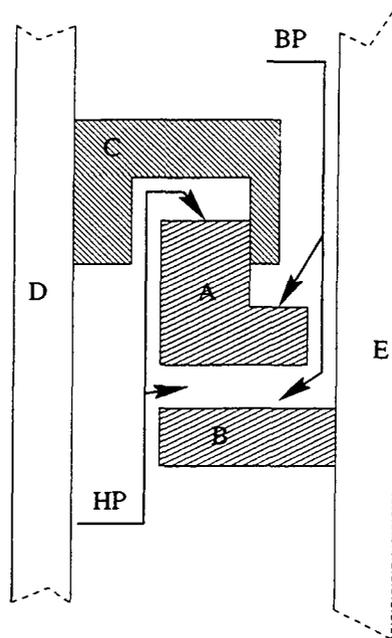
2.1 Modélisation du joint hydrostatique

2.1.1 Comportement du joint hydrostatique

En fonctionnement normal, l'augmentation de la différence de pression aux bornes du joint 1 ne se traduit pas par une augmentation du débit qui le traverse (comme dans le cas d'un élément résistif classique) mais par la stabilité de celui-ci. Ce comportement est obtenu grâce à l'utilisation d'un joint hydrostatique. La figure 2.1 présente un schéma de ce joint. Il est composé d'une glace tournante, solidaire de l'arbre du GMPP et d'une glace flottante, libre en translation dans l'axe de l'arbre.

Le débit à travers le joint est fixé par la distance entre les deux glaces (h) et par l'existence d'un champ de pression entre l'amont du joint (HP) et l'aval du joint (BP). La distance entre les deux glaces est fixée par l'équilibre entre la force d'assise FA et la force de soulèvement FS.

- FA est liée au poids de la glace et aux pressions HP et BP qui s'appliquent sur le dessus de la glace flottante. Lorsque FA augmente le joint se ferme, h diminue.
- FS est liée au champ de pression entre les glaces, lui même fonction de HP et BP, et de la géométrie du joint. Dans [Combes(1991)], il est indiqué que la glace flottante doit présenter un profil particulier pour garantir l'existence d'une position d'équilibre du joint. Ce profil est caractérisé par un angle d'ouverture de la glace, α , positif (voir schéma 2.2).



- A: Glace flottante
- B: Glace tournante
- C: Douille
- D: Corps de la pompe
- E: Arbre du GMPP

FIG. 2.1 – Schéma du joint 1

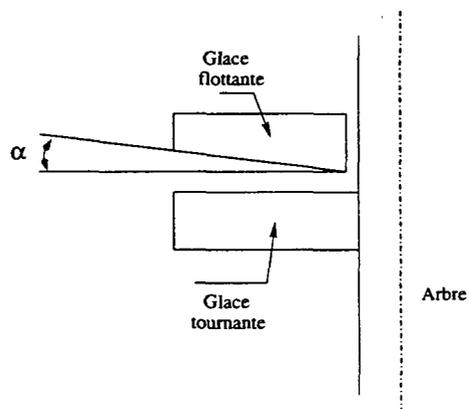


FIG. 2.2 – Profil de la glace flottante

Lorsque α est positif, le champ de pression a une allure parabolique. FS dépend donc aussi de α . Lorsque FS augmente, le joint s'ouvre, h augmente. On doit noter aussi que α varie en fonction de la pression. En effet, la différence entre les forces appliquées sur le dessus et sur le dessous de la glace flottante entraîne l'apparition d'un couple qui a pour effet de « refermer » α lorsque la différence de pression (HP - BP) augmente et de l'« ouvrir » lorsque la différence de pression diminue. Finalement, FS correspond à l'intégrale du champ de pression rapportée à la surface de la glace flottante. Ce champ de pression varie en fonction de l'écartement des glaces, cet écartement est lui même fonction du rayon de la glace flottante et de α .

Dans [Combes(1991)] ce comportement du joint est modélisé grâce à une méthode numérique aux éléments finis. Dans notre contexte de modélisation, la représentation aussi fine du comportement n'est pas possible. Nous devons donc synthétiser les informations disponibles pour construire un modèle qui soit apte à représenter globalement le comportement du joint, c'est-à-dire comme une régulation du débit. Pour cela nous allons utiliser la notion de raideur hydraulique k telle qu'elle est définie dans [Combes(1991)]. A partir d'une position d'équilibre du joint, si l'on rapproche les deux faces actives de a parallèlement à elles-mêmes, FS devient $FS + \frac{\partial FS}{\partial a}$. On définit la raideur hydraulique par $k = \frac{\partial FS}{\partial a} * a$. A partir d'une position d'équilibre ($FS = FA$), une perturbation de la position de la glace a entraîne donc une variation de FS proportionnelle au déplacement de la glace $k * a$.

Le joint a été conçu pour s'autoréguler, FA varie toujours plus vite que FS. En effet, lorsque la différence de pression augmente, FA augmente, le couple sur la glace a tendance à refermer α , FS augmente donc moins vite que FA. Lorsque la différence de pression diminue, FA diminue, le couple a tendance à ouvrir α , FS diminue donc moins vite que FA.

Globalement, le comportement du joint est le suivant : Lorsque la pression HP augmente, le débit entre les glaces devrait augmenter mais, comme FA augmente plus vite que FS, h diminue puis atteint un nouvel équilibre, ainsi le débit n'augmente pas puisque la section disponible a diminué. A l'inverse, lorsque la pression HP diminue le débit devrait diminuer, mais parallèlement le joint s'ouvre (FA diminue plus vite que FS), donc la section disponible augmente et le débit reste stable.

2.1.2 Modèle du joint hydrostatique

Ce comportement est décrit en représentant séparément la partie mécanique et la partie hydraulique.

Modèle mécanique

D'un point de vue mécanique, on a vu que la variation de h dépendait de la variation de FS - FA. Depuis un état d'équilibre, si FS - FA est positif, le joint va s'ouvrir, si cette quantité est négative, le joint va se fermer. Ceci peut être modélisé grâce à la notion de raideur hydraulique. FA varie toujours plus vite que FS, donc une augmentation de la pression va entraîner tout d'abord une augmentation de FA ce qui aura tendance à fermer le joint de x . FS devient alors $FS + k \cdot x$ et compense l'augmentation de FA pour atteindre un nouveau point d'équilibre $FS = FA$.

Dans la partie mécanique (voir figure 2.3), le déplacement de la glace flottante est donc donné par la solution de l'équation différentielle :

$$m * \ddot{x} = F_p - R_f * \dot{x} - k * x$$

Dans cette équation,

- m correspond à la masse de la glace flottante,
- F_p est la résultante du poids de la glace, des forces exercées par la pression d'injection RCV et la pression en aval du joint sur le dessus de la glace flottante et de la force de soulèvement FS due à l'existence d'un champ de pression entre les deux glaces.
- R_f correspond à la résistance due au frottement de la bague supportant la glace flottante dans son logement.
- $k * x$ à la force de rappel exercée par la raideur hydraulique.

Le bond-graph de la partie mécanique (figure 2.4) comprend donc un élément capacitif $C : 1/k$, un élément inertiel $I : m$, un élément résistif $R : R_f$ et une source d'effort (ici, la pression) $SE : F_p$.

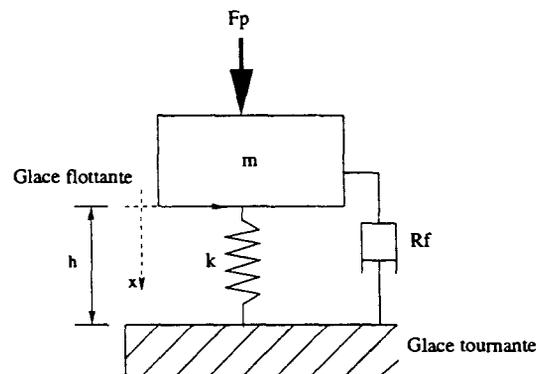


FIG. 2.3 – Schéma mécanique du joint 1

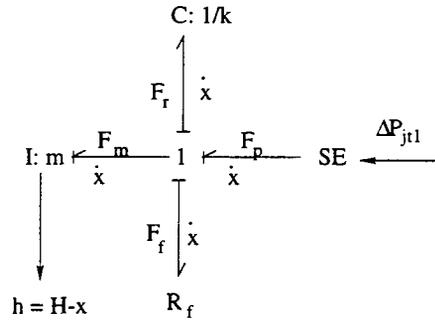


FIG. 2.4 – Bond graph mécanique du joint 1

Lorsque la pression en amont du joint augmente, FA augmente plus vite que FS donc F_p augmente, on atteindra donc un nouvel équilibre où h aura diminué. Lorsque la pression en amont du joint diminue, FA diminue plus vite que FS donc F_p diminue. On atteindra donc un nouvel équilibre où h aura augmenté.

Modèle hydraulique

Dans la partie hydraulique, nous représentons le débit traversant le joint comme la composition d'un écoulement de la forme $\Delta P = R_{jt1} \cdot Q_R$, modélisé par une résistance R_{jt1} , et d'un écoulement lié à l'écartement h des glaces, modélisé par une source de flux $SF(h)$ (de débit Q_h) inversement proportionnelle à l'ouverture h des glaces. Le débit de cette source se soustrait au débit Q_R pour donner le débit Q_{jt1} à travers le joint. Ainsi, si h augmente, Q_h diminue et Q_{jt1} augmente. Inversement si h diminue, Q_h augmente et Q_{jt1} diminue (figure 2.5).

En pratique, on suppose que l'évolution de la partie mécanique, amenant à un nouvel état d'équilibre, est aussi rapide que l'évolution hydraulique traduisant la variation du débit en fonction de la variation de la différence de pression HP - BP. Ces deux bond-graphs sont associés comme le décrit la figure 2.6.

2.2 Modélisation de l'injection

Les informations contenues dans [Chevalier(1994), Rémy(1995)] nous ont permis de construire le bond-graph présenté en figure 2.7. La construction de ces bond-graphs repose sur les principes que nous avons rappelés dans le chapitre 2 (décrits dans [Rosenberg et Karnopp(1983)]).

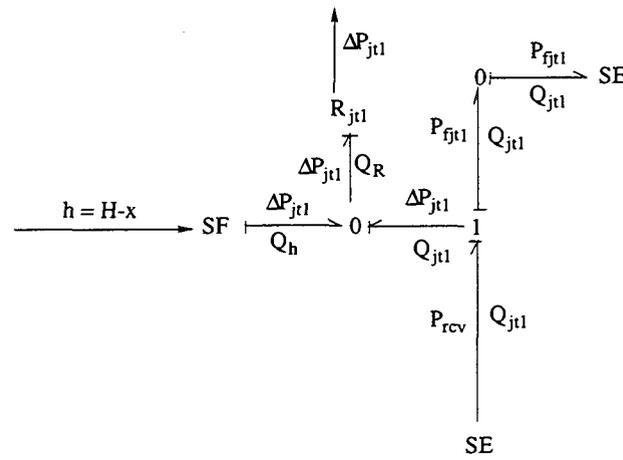


FIG. 2.5 - Bond graph hydraulique du joint 1

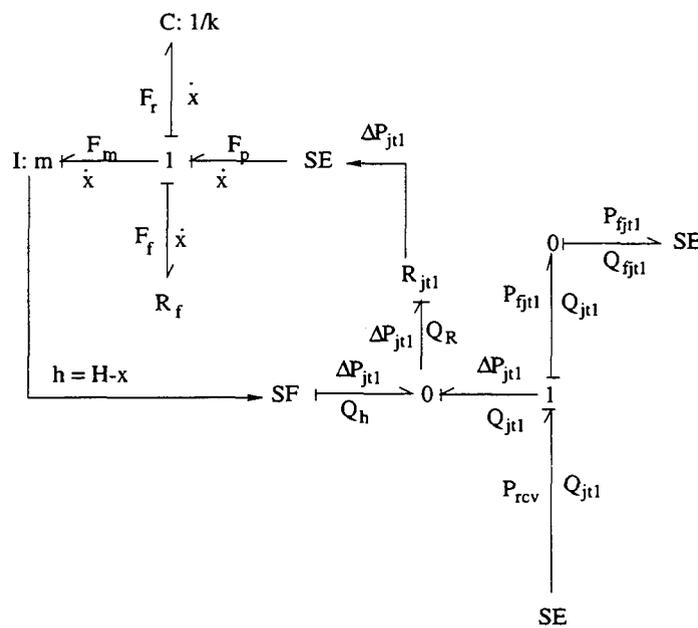


FIG. 2.6 - Bond-graph du GMPP (joint 1)

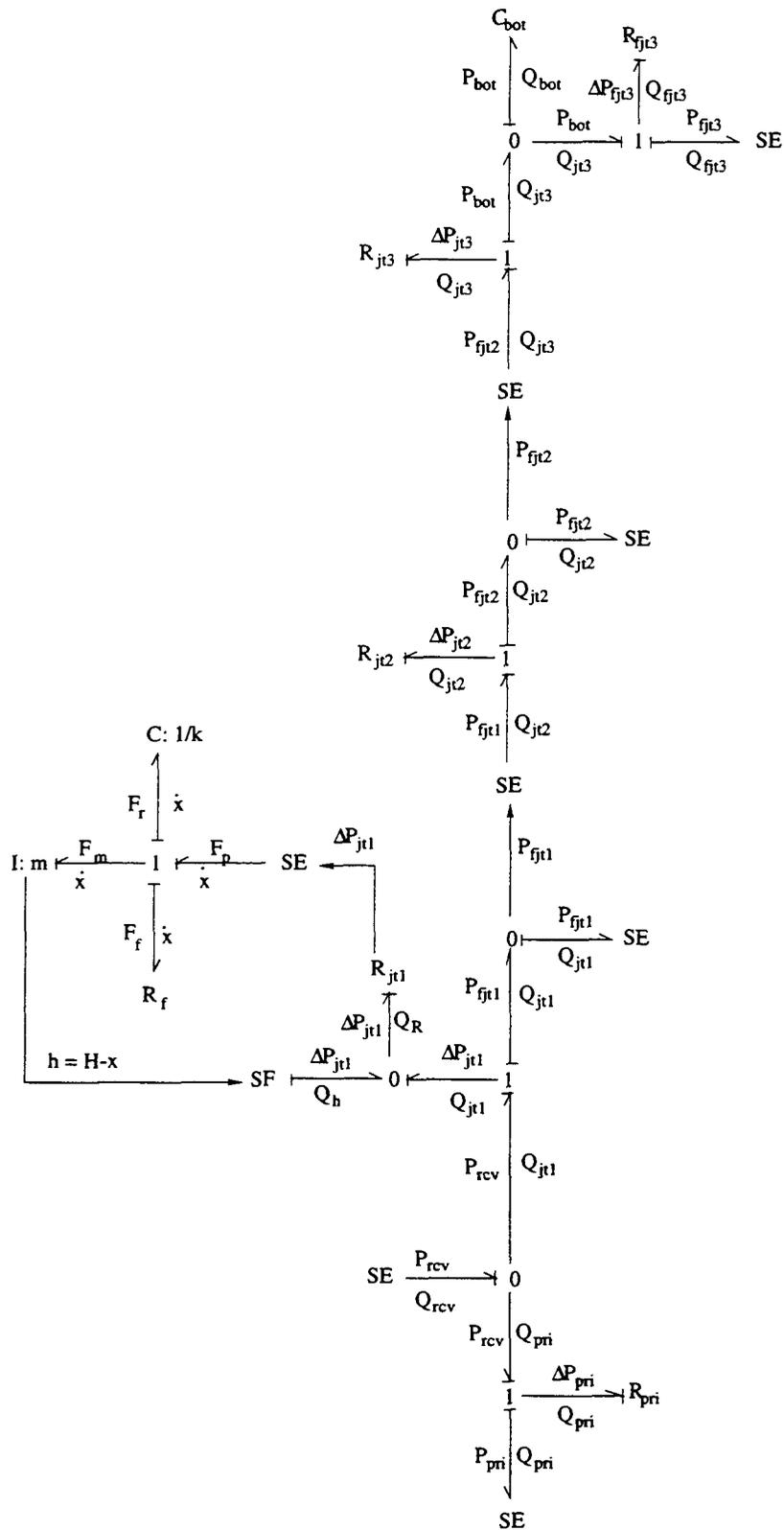


FIG. 2.7 – Bond graph de l'ensemble injection/joints du GMPP

Ce bond-graph contient deux parties : une partie hydraulique et une partie mécanique. La partie hydraulique décrit l'écoulement de l'eau à travers les joints et vers le circuit primaire. La partie mécanique décrit le comportement des glaces. Dans ce bond-graph, on trouve les éléments suivants :

- $SE(P_{rcv})$: correspond à la pression d'injection de l'eau venant du circuit RCV.
- $SE(P_{pri})$: correspond à la pression du circuit primaire.
- R_{pri} : correspond à la résistance imposée par le corps de la pompe lors de l'injection.
- $SE(P_{fjt1})$: correspond à la pression sur la ligne de fuite du joint 1. Elle impose la pression à la fois en l'aval du joint 1 et en l'amont du joint 2.
- R_{jt2} : correspond à la modélisation du joint 2. En fonctionnement normal, le joint 2 récupère peu de fluide. Il peut donc être assimilé à une résistance simple. Si le joint 1 devient défaillant, cette résistance serait remplacée par le modèle de joint hydrostatique (le joint 2 a alors un comportement identique au joint 1).
- $SE(P_{fjt2})$: correspond à la pression sur la ligne de fuite du joint 2. Elle impose la pression à la fois en l'aval du joint 2 et en l'amont du joint 3.
- R_{jt3} : correspond à la modélisation du joint 3.
- C_{bot} : correspond à la modélisation de la bouteille de mouillage. En fonctionnement normal, la lubrification du joint 3 n'est pas toujours assurée par la remontée du fluide le long de l'arbre. Pour assurer cette lubrification une bouteille de mouillage a été ajoutée, elle se vide dans le joint 3 si le débit arrivant en amont n'est pas suffisant, elle se remplit lorsque ce débit est suffisant pour assurer la lubrification.
- $SE(P_{fjt3})$: correspond à la pression sur la ligne de fuite du joint 3.
- R_{fjt3} : correspond à la résistance imposée par la ligne de fuite 3. Lorsque le niveau dans la bouteille a atteint un niveau suffisamment élevé, celle-ci se décharge dans la ligne de fuite.

A partir du bond-graph on peut construire le modèle des rôles fonctionnels en utilisant la méthode décrite dans [Zouaoui(1998)]. Ce modèle est représenté dans la figure 2.8.

Enfin, ce bond-graph permet aussi de construire un graphe d'influence qui est présenté dans la figure 2.9.

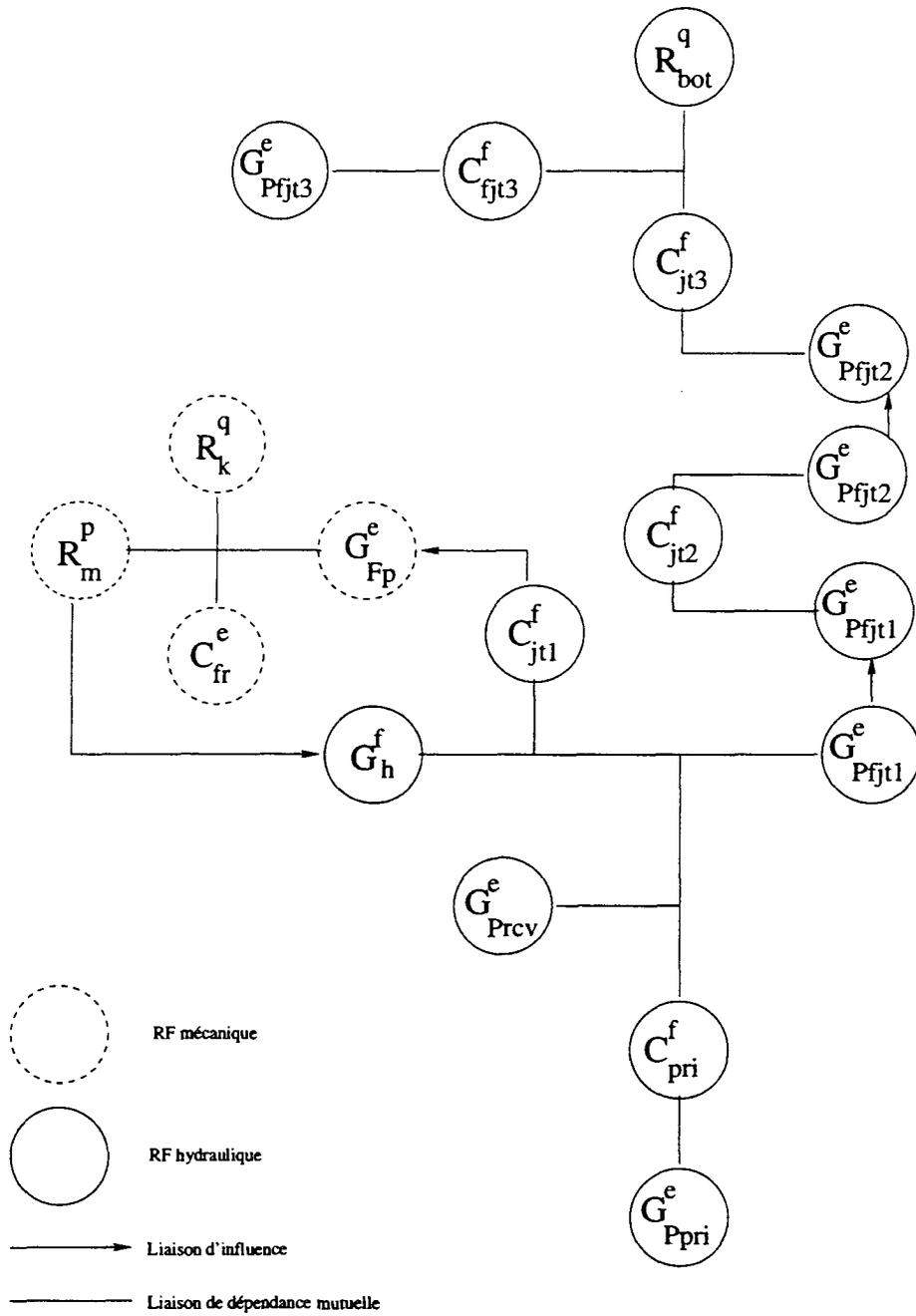


FIG. 2.8 – Modèle des rôles fonctionnels de l'ensemble injection/joints du GMPP

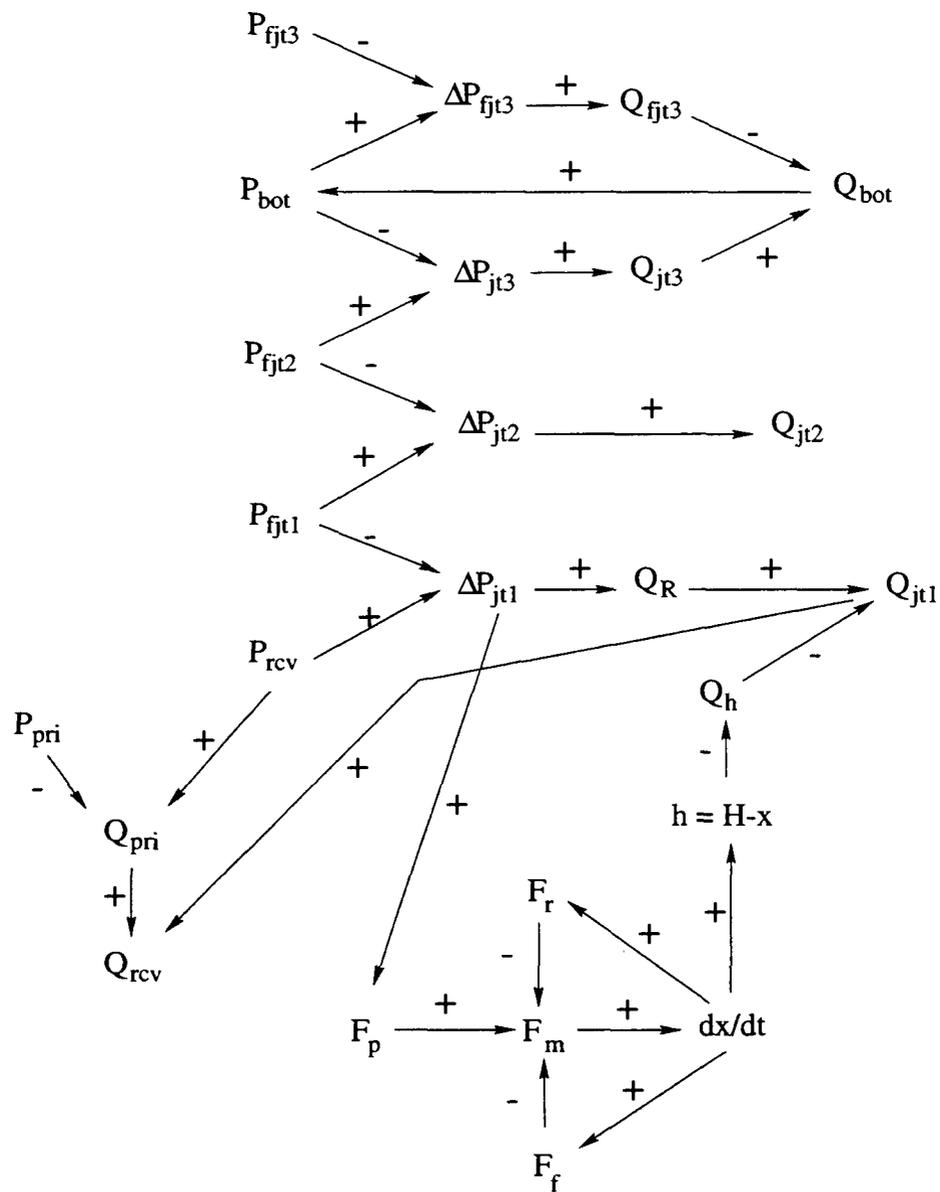


FIG. 2.9 – Graphe d'influence de l'ensemble injection/joints du GMPP

3

Le modèle des processus

A partir du bond-graph, on peut construire automatiquement les cofonctions nécessaires au modèle des processus. Dans le domaine hydraulique, les cofonctions possibles sont :

1. $SE(P_{rcv}) - R_{pri} - SE(P_{pri})$
2. $SE(P_{rcv}) - R_{jt1} - SE(P_{fjt1})$
3. $SF(Q_h) - SE(P_{fjt1})$
4. $SE(P_{fjt1}) - R_{jt2} - SE(P_{fjt2})$
5. $SE(P_{fjt2}) - R_{jt3} - C_{bot}$
6. $C_{bot} - R_{fjt3} - SE(P_{fjt3})$

Dans le domaine mécanique, les cofonctions possibles sont :

1. $SE(F_p) - I : m$
2. $I : m - C : 1/k$
3. $I : m - R_f$

Ces cofonctions représentent des transferts d'énergie dans la structure du système, leur interprétation en terme de processus permet la construction de processus et de familles décrivant le comportement du système. Dans les sections suivantes, les effets « ambigus », c'est-à-dire les relations vers des variables recevant des influences multiples, sont notés entre parenthèse. Ces effets ne sont pas propagés dans l'ensemble d'observations lorsque le processus est actif.

3.1 Processus hydrauliques

A partir de la première cofonction hydraulique on peut décrire des processus représentant l'injection d'eau depuis le RCV vers le circuit primaire. Ces processus sont du type 3.b, leurs conditions correspondent à un bilan d'effort :

Processus H.1 :

Cofonction : $SE(P_{rcv}) - R_{pri} - SE(P_{pri})$

Condition d'activation : $(P_{rcv} - P_{pri}) \geq$ seuil de remontée du fluide primaire

Effet : $(P_{rcv} - P_{pri})$ AGIT(+), Q_{pri} , $Q_{pri} > 0$, $(Q_{pri}$ AGIT(+), Q_{rcv} , Q_{pri} CONTRIBUTUE(+), Q_{rcv})

Note : Une variation de $(P_{rcv} - P_{pri})$ se traduit par une variation du débit d'injection Q_{rcv} . Cette hypothèse a été vérifiée lors de l'analyse des données réelles issues du KIT.

La pression d'injection RCV est théoriquement supérieure de 3 bars à la pression primaire. Si la différence de pression descend en dessous d'un seuil limite, alors le fluide primaire a tendance à remonter dans le corps de la pompe. Cette défaillance sera décrite grâce à un processus H1' qui, à la même cofonction que H1, associera des conditions différentes :

Processus H.1' :

Cofonction : $SE(P_{rcv}) - R_{pri} - SE(P_{pri})$

Condition d'activation : $(P_{rcv} - P_{pri}) <$ seuil de remontée du fluide primaire

Effet : $(P_{rcv} - P_{pri})$ AGIT(+), Q_{pri} , $(P_{rcv} - P_{pri})$ CONTRIBUTUE(+), Q_{pri} , Q_{pri} AGIT(+), Q_{rcv} , Q_{pri} CONTRIBUTUE(+), Q_{rcv})

H1 et H1' décrivent une famille complètement définie.

A partir de la deuxième cofonction hydraulique on peut décrire le processus représentant le transfert hydraulique depuis le RCV vers la ligne de fuite du joint 1. Ce processus est du type 3.b, ses conditions correspondent à un bilan d'effort :

Processus H.2 :

Cofonction : $SE(P_{rcv}) - R_{jt1} - SE(P_{fjt1})$

Condition d'activation : $(P_{rcv} - P_{fjt1}) > 0$

Effets : $(P_{rcv} - P_{fjt1})$ AGIT(+), Q_r , $Q_r > 0$, $(Q_r$ AGIT(+), $Q_{jt1})$

Note : Une variation de $(P_{rcv} - P_{fjt1})$ se traduit par une variation du débit du joint Q_{jt1} .

En pratique, on peut noter que P_{fjt1} est une variable exogène de l'ensemble injection plus joints (elle est supposée constante), la condition du processus H2

correspond en fait à une condition sur la valeur de P_{rcv} (P_{rcv} est toujours supérieure à P_{fjt1}).

A partir de la troisième cofonction hydraulique on peut décrire les processus représentant le transfert hydraulique depuis la source de flux dépendant de h vers la ligne de fuite du joint 1. Ces processus sont du type 2.a, leurs conditions correspondent à un flux positif. Ici la source de flux est pilotée, la condition est exprimée en fonction de cette variable de commande h :

Processus H.3 :

Cofonction : $SF(Q_h) - SE(P_{fjt1})$

Condition d'activation : $h > 0$

Effets : h AGIT(-) Q_h , (Q_h AGIT(-) Q_{jt1})

Note : Une variation de l'écartement des glaces du joint h se traduit par une variation de même sens du débit du joint Q_{jt1} .

Processus H.3' :

Cofonction : $SF(Q_h) - SE(P_{fjt1})$

Condition d'activation : $h > 0$ tend vers 0.

Effets : h AGIT(-) Q_h , Q_h tend vers ∞ , (Q_h AGIT(-) Q_{jt1})

Processus H.3'' :

Cofonction : $SF(Q_h) - SE(P_{fjt1})$

Condition d'activation : $h > 0$ tend vers h_{max}

Effets : h AGIT(-) Q_h , Q_h tend vers 0, (Q_h AGIT(-) Q_{jt1})

H3, H3' et H3'' décrivent une famille complètement définie. En effet, h est toujours positif puisqu'il représente l'ouverture du joint. De plus, les deux cas limites, h tend vers 0 et h tend vers h_{max} sont décrits. Il n'existe donc pas de partie du domaine de variation de h qui ne soit pas décrite.

A partir de la quatrième cofonction hydraulique on peut décrire les processus représentant le transfert hydraulique à travers le joint 2 vers sa ligne de fuite. Ces processus sont du type 3.b, leurs conditions correspondent à un bilan d'effort :

Processus H.4 :

Cofonction : $SE(P_{fjt1}) - R_{jt2} - SE(P_{fjt2})$

Condition d'activation : $(P_{fjt1} - P_{fjt2}) > 0$

Condition de fonctionnement : $Q_{jt1} > 0$

Effets : $(P_{fjt1} - P_{fjt2})$ AGIT(+) Q_{jt2} , $Q_{jt2} > 0$

Note : En l'absence d'eau en amont du joint 2, celui ci ne peut fonctionner normalement. Nous avons donc ajouté une condition de fonctionnement du joint 2.

Processus H.4' :

Cofonction : $SE(P_{fjt1}) - R_{jt2} - SE(P_{fjt2})$

Condition d'activation : $(P_{fjt1} - P_{fjt2}) > 0$

Condition de fonctionnement : $Q_{fjt1} \rightarrow 0$

Effets : $Q_{jt2} \rightarrow 0$

Note : En l'absence d'eau en amont du joint 2, celui-ci ne peut fonctionner normalement, son débit devient nul.

A partir de la cinquième cofonction hydraulique on peut décrire un processus représentant le transfert hydraulique à travers le joint 3 vers la bouteille de mouillage. Ce processus est du type 3.d, ses conditions correspondent à un bilan d'effort (C_{bot} joue le rôle de puits ou de source d'effort suivant le signe de $(P_{fjt2} - P_{bot})$):

Processus H.5:

Cofonction : $SE(P_{fjt2}) - R_{jt3} - C_{bot}$

Condition d'activation : $(P_{fjt2} - P_{bot}) \neq 0$

Effets : $(P_{fjt2} - P_{bot})$ AGIT(+), Q_{jt3} , $(P_{fjt2} - P_{bot})$ CONTRIBUE(+), Q_{jt3} , $(Q_{jt3}$ AGIT(+), Q_{bot} , Q_{jt3} CONTRIBUE(+), Q_{bot} , Q_{bot} PRODUIT(+), P_{bot})

A partir de la sixième cofonction hydraulique on peut décrire un processus représentant le transfert hydraulique depuis la bouteille de mouillage vers la ligne de fuite du joint 3. Ce processus est du type 3.b, ses conditions correspondent à un bilan d'effort (C_{bot} joue le rôle de source d'effort):

Processus H.6:

Cofonction : $C_{bot} - R_{fjt3} - SE(fjt3)$

Condition d'activation : $(P_{bot} - P_{fjt3}) > 0$

Effets : $(P_{bot} - P_{fjt3})$ AGIT(+), Q_{fjt3} , $Q_{fjt3} > 0$, $(Q_{fjt3}$ AGIT(-), Q_{bot} , Q_{fjt3} CONTRIBUE(-), Q_{bot} , Q_{bot} PRODUIT(+), P_{bot})

Note : Lorsque le niveau dans la bouteille de mouillage augmente, la pression dans la bouteille augmente, puis celle-ci se décharge vers la ligne de fuite du joint 3.

Les processus H5 et H6 décrivent le fonctionnement du joint 3. Nous ne disposons d'aucune mesure sur cette partie du GMPP, nous n'avons donc pas décrit plus explicitement son comportement, en particulier nous ne décrivons pas tous les processus de la famille.

3.2 Processus mécaniques

A partir de la première cofonction mécanique on peut décrire deux processus représentant l'accumulation d'énergie cinétique dans l'élément inertiel (chargement depuis la source d'effort). Ces processus sont du type 2.d, leurs conditions correspondent à un bilan d'effort (I est un puits de flux pour M.1, une source de

flux pour M.1') :

Processus M.1 :

Cofonction : $SE(F_p) - I : m$

Condition d'activation : $F_p > 0$ (soit $P_{rcv} - P_{fjt1}$ augmente)

Effets : F_p AGIT(+) F_m , F_p CONTRIBUE(+) F_m

Note : Lors d'une augmentation de $(P_{rcv} - P_{fjt1})$, la force F_p appliquée à la glace flottante est positive, ce qui entraîne une variation de la vitesse de la glace.

Processus M.1' :

Cofonction : $SE(F_p) - I : m$

Condition d'activation : $F_p < 0$ (soit $P_{rcv} - P_{fjt1}$ diminue)

Effets : F_p AGIT(+) F_m , F_p CONTRIBUE(+) F_m

Note : Lors d'une diminution de $(P_{rcv} - P_{fjt1})$, la force F_p appliquée à la glace flottante est négative, ce qui entraîne une variation de la vitesse de la glace.

À partir de la deuxième cofonction mécanique on peut décrire un processus représentant l'accumulation d'énergie potentielle dans l'élément capacitif. Ce processus est du type 2.e, ses conditions portent sur l'effort imposé à l'inertie permettant d'obtenir un flux positif (l'inertie joue le rôle de source de flux et la capacité de puits d'effort) :

Processus M.2 :

Cofonction : $I : m - C : 1/k$

Condition d'activation : $F_m > 0$

Effets : $\dot{x} > 0$ et augmente, x AGIT(+) F_r , x CONTRIBUE(+) F_r

Note : Une vitesse de glace positive entraîne une augmentation de la force de rappel F_r due à la raideur hydraulique.

À partir de la troisième cofonction mécanique on peut décrire un processus représentant la dissipation d'énergie cinétique dans l'élément résistif. Ce processus est du type 1.c, ses conditions portent sur l'effort imposé à l'inertie permettant d'obtenir un flux non nul dans la résistance (l'inertie joue le rôle de source ou de puits d'énergie) :

Processus M.3 :

Cofonction : $I : m - R_f$

Condition d'activation : $F_m > 0$ ou < 0

Effets : \dot{x} augmente ou diminue, \dot{x} AGIT(+) F_f , \dot{x} CONTRIBUE(+) F_f

Note : Une variation de la vitesse de la glace entraîne une variation de même sens de la force de frottement due à la résistance R_f .

Toujours à partir de la quatrième cofonction mécanique on peut décrire un processus représentant l'accumulation d'énergie cinétique dans l'élément inertiel (chargement depuis l'élément capacitif). Ce processus est du type 2.e, ses conditions portent sur l'effort imposé à l'inertie permettant d'obtenir un flux négatif (l'inertie joue le rôle de puits de flux et la capacité de source d'effort) :

Processus M.4:

Cofonction : $C : 1/k - I : m$

Condition d'activation : $(F_p - F_r) < 0$

Effets : $(F_p - F_r)$ AGIT(+), F_m , $(F_p - F_r)$ CONTRIBUE(+), F_m , F_m PRO-DUIT(+), \dot{x}

Note : Une variation de la force de rappel F_r entraîne une variation de la vitesse de la glace.

En fonctionnement normal, nous disposons des mesures de P_{rcv} , P_{pri} , Q_{rcv} , Q_{j11} et Q_{j12} . Pour une pression P_{rcv} fixe, le débit Q_{j11} est fixe, les processus hydrauliques actifs sont H1, H2, H3 et H4. D'un point de vue mécanique, le joint 1 est au repos, dans un état d'équilibre fixant h , aucun processus mécanique n'est actif. Pour une augmentation de P_{rcv} , tous les processus hydrauliques restent actifs. D'un point de vue mécanique M.1, M.2, et M.3 deviennent actifs (on suppose que les valeurs de R_f , k et m permettent un retour à l'équilibre sans oscillations). La combinaison de M.1, M.2, et M.3 fixe un nouveau h (inférieur à celui fixé par l'état d'équilibre précédent) qui augmente $Q(h)$ et donc diminue Q_{j11} (effet de H.3) comme, parallèlement, l'effet de H.2 est d'augmenter Q_r , le résultat est une stabilité de Q_{j11} .

4

Description des modèles téléologique et des phénomènes

4.1 Un modèle téléologique du GMPP

Cette modélisation est construite à partir d'informations issues d'une étude fonctionnelle contenue dans [Rémy(1995)] et des connaissances des pannes modélisées dans DIAPO. Ces informations nous ont permis de construire un modèle téléologique du GMPP. La figure 4.1 présente ce modèle téléologique que l'on peut tirer de la description du GMPP (voir 1). On y retrouve les éléments du GMPP associés aux buts auxquels ils participent.

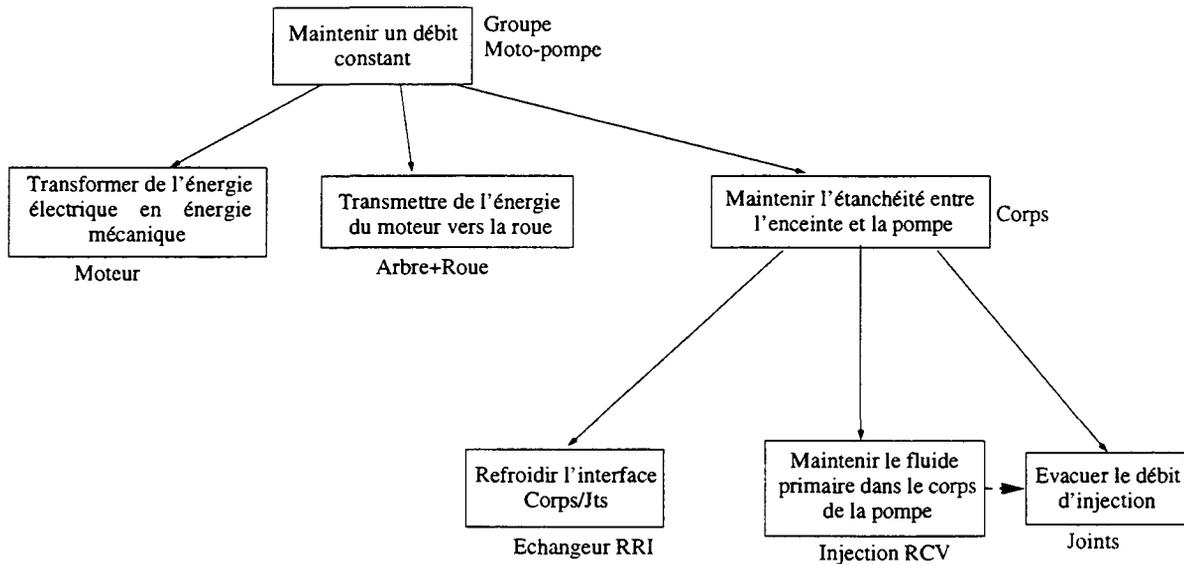


FIG. 4.1 – *Modèle téléologique du GMPP*

Détaillons l'arborescence : Pour maintenir un débit constant dans le circuit primaire il est nécessaire de transformer l'énergie électrique dont l'on dispose en

énergie mécanique qui sera transférée à la roue via l'arbre. A ce niveau, un but « auxiliaire », lié à la particularité du milieu de travail, est de maintenir le fluide primaire dans le circuit primaire c'est à dire de maintenir l'étanchéité entre l'enceinte et la pompe. Le but « maintenir l'étanchéité entre l'enceinte et la pompe » peut à son tour être décomposé en « refroidir l'interface corps/jts », « maintenir le fluide primaire dans le corps de la pompe » et « évacuer le débit d'injection ». Nous avons donc décrit, dans notre modèle téléologique : l'architecture des buts, les sous-ensembles du GMPP qui permettent de les remplir.

4.2 Les phénomènes

Un phénomène est décrit à partir de l'ensemble des processus nécessaires à son occurrence et d'un ensemble d'effets décrivant le résultat de sa réalisation. Dans le cas du fonctionnement normal du joint, on peut regrouper certains des six processus hydrauliques pour obtenir quatre phénomènes (voir figure 4.2) :

1. PH1 : « *Injection d'eau dans le corps de la pompe* » : Ce phénomène remplit le but « maintenir le fluide primaire dans le corps de la pompe ». Il est réalisé par le processus H.1. Son effet est d'avoir Q_{rcv} positif. Ce phénomène est le support de PH2.
2. PH2 : « *Evacuer la fuite* » : Ce phénomène remplit le but « évacuer le débit d'injection ».
 - (a) PH3 : « *Evacuer le débit de fuite via les joints 1 et 2* » : Ce phénomène est un sous-phénomène de « Evacuer la fuite » (PH2). Cette évacuation s'effectue à travers le joint 1 puis vers la ligne de fuite 1 (processus H.2 et H.3) ainsi qu'à travers le joint 2 et vers la ligne de fuite 2 (processus H.4). Ses effets sont normalement $Q_{jt1} > 0$ et $Q_{jt2} > 0$. Ils sont liés à la valeur de l'ouverture h du joint 1, leur variation est fonction de celle de h . Cette influence se fait à travers le lien de support avec le phénomène « Réguler le débit du joint 1 ».
 - (b) PH4 : « *Lubrifier le joint 3* » : Ce phénomène est lui aussi un sous-phénomène de « Evacuer la fuite ». En fonctionnement normal il n'y a pas toujours assez de fluide pour lubrifier le joint 3, une bouteille de mouillage permet de le maintenir lubrifié. Ce phénomène est réalisé par le processus H.5. Son effet est $Q_{jt3} \neq 0$.
Nous avons ajouté dans ce phénomène le processus H.6 correspondant au déchargement de la bouteille vers la ligne de fuite 3.

Dans le domaine mécanique, le fonctionnement normal du joint est, pour une variation donnée de la pression, d'atteindre un nouvel état d'équilibre h . Ce

comportement est décrit par le phénomène « régulation stable ».

- PH5: « *Régulation du débit du joint 1* »: Ce phénomène participe à la réalisation du phénomène "Evacuer la fuite".
- PH6: « *Régulation R-L-C* »: Ce phénomène est le support de PH3. Il correspond à une combinaison de R, k et m telle que $(R^2 - 4mk) > 0$. Dans ce cas l'état d'équilibre est atteint sans oscillation.
 1. PH7: « *Régulation stable* »: Ce phénomène est réalisé par la combinaison des processus M.1, M.2, M.3. Dans ce cas, l'augmentation de la différence de pression fournit de l'énergie qui est stockée dans la capacité. La condition est $(P_{rcv} - P_{jtl})$ positif (resp. est stable), l'effet est h stable, ayant diminué (resp. n'ayant pas varié).
 2. PH7': « *Régulation stable, Alternative* »: Ce phénomène est réalisé par la combinaison des processus M.1', M.3 et M.4. La condition est $(P_{rcv} - P_{jtl})$ diminue, l'effet est h stable (ayant augmenté). Dans ce cas, l'énergie potentielle de la capacité est transformée en énergie cinétique permettant d'ouvrir le joint.

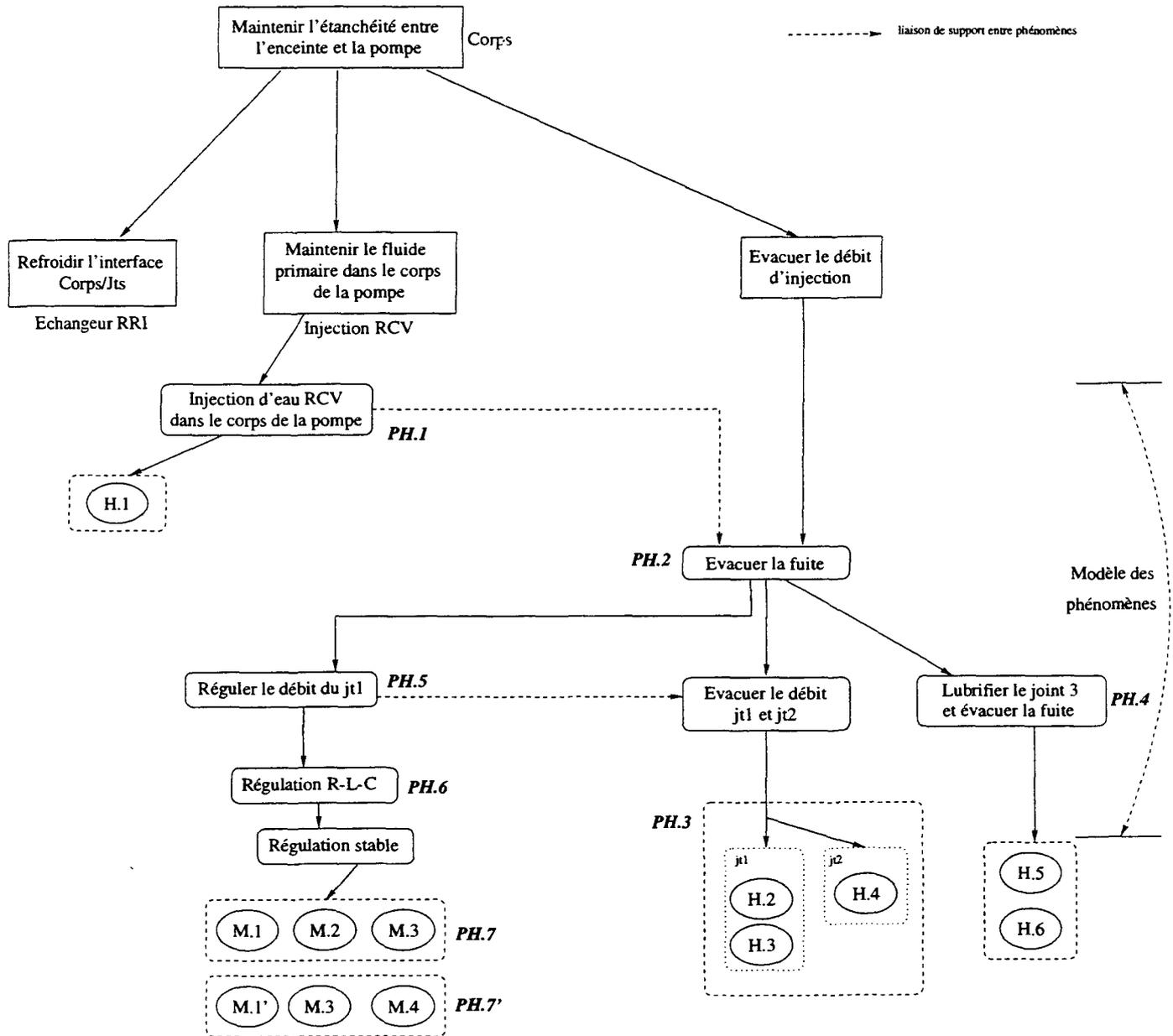


FIG. 4.2 - Modèle téléologique et modèle des phénomènes du GMPP

5

Description des dysfonctionnements

5.1 Au niveau des processus

Certaines des pannes décrites dans DIAPO [Porcheron et al.(1994)] peuvent être interprétées en terme de processus. Nous allons donc étudier ces pannes, en particulier les processus qu'elles affectent et les effets qu'elles engendrent.

5.1.1 Blocage de la bague: joint bloqué ouvert

Cette panne affecte la partie mécanique du modèle et implique que la résistance prend une valeur infinie. M.3 est donc affecté par cette panne, par voie de conséquence tous les processus mécaniques le sont aussi. En effet, un blocage de la bague entraîne une valeur de R_f infinie, toute l'énergie transmise par la source vers l'élément inertiel (M.1) est entièrement consommée par la résistance (M.3). Le déplacement de la glace flottante est impossible, h ne varie plus, donc $Q(h)$ dans le domaine hydraulique reste fixe, elle ne compensera plus la variation de Q_r .

Dans ce cas les processus M.1, M.2, M.3 et M.4 doivent être remplacés par un unique processus ayant pour cofonction $SE(F_p) - R_f$. Ses conditions d'activation sont les mêmes que celles de M.1, ses effets sont $\dot{x} = 0$ donc $x = cte$. L'occurrence de ce processus est mutuellement exclusive de celle de M.1, M.2, M.3 (ou M.1', M.2, M.3).

Processus M.5:

Cofonction: $SE(F_p) - R_f$

Condition d'activation: $F_p > 0$ ou < 0

Effets: $\dot{x} = 0$ donc $x = cte$

Note: Lorsque la glace flottante est bloquée, toute la puissance apportée par la source d'effort est consommée dans la résistance. Les éléments capacitifs et inertiels disparaissent, la résistance R_f prend une valeur infinie. Ce processus est une alternative à la combinaison des processus M.1, M.2, M.3 (et éventuellement

M.4), il est mutuellement exclusif de M.1, M.2, M.3 et M.4.

5.1.2 Colmatage du joint

Cette panne se traduit dans le domaine hydraulique par une augmentation de la résistance R_{jt1} et dans le domaine mécanique par une disparition de α , ce qui tend à refermer le joint. La raideur hydraulique fonction de α diminue et donc la force de soulèvement diminue. De plus, comme le terme capacitif de l'équation différentielle disparaît, nous n'avons donc plus qu'un circuit R - L. Ainsi, quelle que soit la variation de pression en amont du joint, la source d'effort est positive, dh/dt est négatif, h décroît et tend vers 0.

Dans le domaine hydraulique, comme R_{jt1} tend vers l'infini, dans la cofonction du processus H.2 le rôle de conduit de la résistance devient un rôle de barrière B_{jt1} . On obtient le nouveau processus H.7 qui a les mêmes conditions d'activation que H.2 et qui a comme effets : Q_r décroît et tend vers 0 et Q_{jt1} décroît et tend vers 0.

Processus H.7 :

Cofonction : $SE(P_{rcv}) - B_{jt1} - SE(P_{fjt1})$

Condition d'activation : $(P_{rcv} - P_{fjt1}) > 0$

Effets : $Q_r \rightarrow 0$ et $Q_{jt1} \rightarrow 0$ (Q_r AGIT(+) Q_{jt1})

Note : Ce processus est une alternative au processus H.2. Les processus H.2 et H.7 sont mutuellement exclusifs.

Pour le domaine mécanique, si l'on supprime la capacité, seuls les processus M.1 et M.3 restent possibles. Néanmoins ce comportement ne peut être décrit à partir de nouveaux processus, il doit l'être grâce à la description d'un phénomène comme nous le verrons dans la section suivante.

5.2 Au niveau des phénomènes

Certains dysfonctionnements ne peuvent être décrits qu'en terme de phénomènes. En effet, ils apparaissent plus comme une combinaison différente de processus déjà décrits que comme de nouveaux processus. Dans le domaine hydraulique, on peut décrire en particulier des alternatives au phénomène PH3. Ces alternatives sont :

1. PH3' : « Colmatage du joint 1 » : Ce phénomène a pour organisation H.7, H.3' et H.4'. L'effet correspondant à sa réalisation est $Q_{jt1} \rightarrow 0$ et $Q_{jt2} \rightarrow 0$.
2. PH3'' : « Blocage du joint 1 » : Ce phénomène a pour organisation H.2, H.3'' et H.4. Les effets correspondant à sa réalisation sont Q_{jt1} augmente et Q_{jt2} augmente.

Dans le domaine mécanique on peut décrire des phénomènes correspondant à des fonctionnement défectueux qui sont des alternatives de PH7 "Régulation stable" et PH7' (qui est déjà l'alternative de PH7 en fonctionnement normal).

Ces phénomènes mécaniques sont PH8, qui s'insère au même niveau que PH7 et PH7', PH9 et PH10, qui s'insèrent au même niveau que PH6 :

– PH5: « *Régulation du débit du joint 1* »: Ce phénomène participe à la réalisation du phénomène "Evacuer la fuite".

1. PH6: « *Régulation R-L-C* »

(a) PH8: « *Régulation instable* »: Ce phénomène est réalisé par la combinaison des processus M.1, M.2, M.3 et M.4. Il correspond à une combinaison de R, m et k telle que $(R^2 - 4 * mk) < 0$. Il n'est pas a priori un fonctionnement désiré, néanmoins on peut imaginer qu'une dégradation des caractéristiques mécaniques du joint peut conduire à une telle combinaison des valeurs de R, m et k. Son effet est que h tend vers une position stable en oscillant.

2. PH9: « *Régulation R-L* »: Ce phénomène, correspondant au colmatage du joint, met en oeuvre les processus M.1 et M.2. Son effet est h tend vers 0 quelle que soit la variation de $(P_{rcv} - P_{fjt1})$ (F_p ne dépend plus de FS) (voir 5.1.2).

3. PH10: « *Blocage* »: Ce phénomène est réalisé par le processus M.5. Son effet est que h reste égal à h_{max} quelle que soit la variation de $(P_{rcv} - P_{fjt1})$ (voir 5.1.1).

Le modèle des phénomènes tenant compte de ces descriptions du fonctionnement non désiré est décrit dans la figure 5.1.

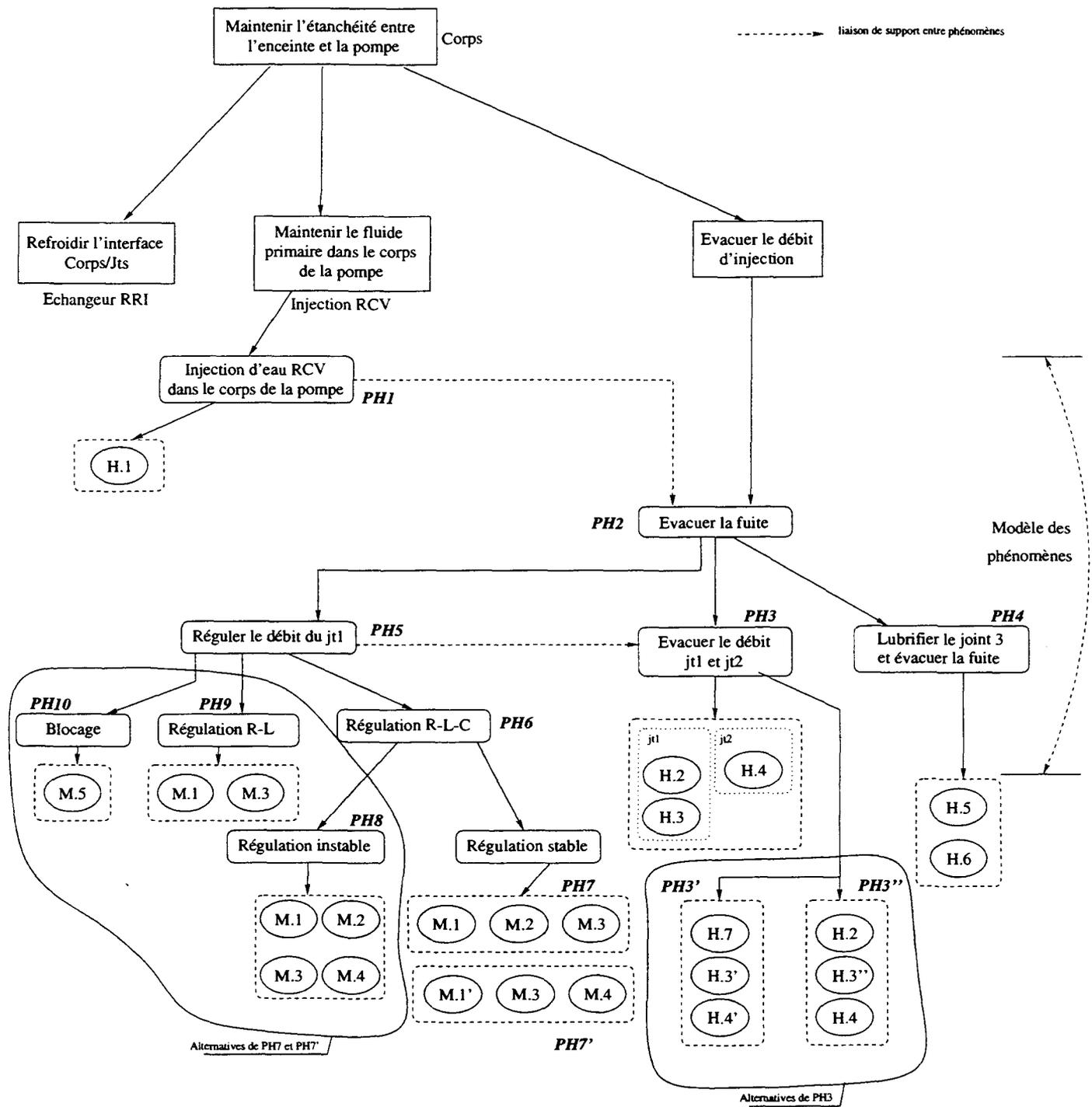


FIG. 5.1 – Modèle téléologique et modèle des phénomènes du GMPP avec introduction du fonctionnement dégradé

6

Diagnostic par l'approche multi-modèles

L'application à laquelle nous étions confrontés, le diagnostic de l'ensemble injection RCV et joints de fuite du GMPP, a déjà fait l'objet de nombreux travaux dans le cadre des méthodes par abduction. En effet, la pompe primaire est un organe sensible du circuit de refroidissement du coeur dont le bon fonctionnement conditionne celui de tout le circuit primaire. L'approche par abduction repose sur un modèle des pannes ; il semblait en effet difficile de construire une représentation du comportement qui soit adaptée à une approche par consistance. Sa description dans le cadre de l'approche multi-modèles a demandé un effort important de modélisation. Cet investissement initial de description du modèle comportemental nous a permis, par la suite, de compiler les connaissances (dans les modèles fonctionnels) sous une forme synthétique et très explicite du point de vue du diagnostic. Nous avons donc obtenu des modèles facilement exploitables qui nous conduisent à une identification relativement aisée des comportements du système.

Cependant, cette application ne s'est pas avérée véritablement significative pour valider notre approche. En effet, aucune mesure n'est disponible pour l'étage du joint 3 et pour l'aval du joint 2 et, de plus, nous n'avons pas pu obtenir de données pour les cas de dysfonctionnements. Les résultats que nous présentons dans ce chapitre ne permettent qu'une illustration des potentialités des méthodes d'identification du comportement et de diagnostic que nous proposons.

6.1 Observations disponibles

Les informations disponibles pour cette application sont des mesures de débit et de pression. Les variables mesurées sont :

- P_{rcv} : c'est la pression d'injection d'eau par le circuit RCV.

- P_{pri} : c'est la pression du fluide dans le circuit primaire.
- Q_{rcv} : c'est le débit d'eau injectée par le circuit RCV.
- Q_{jj1} : c'est le débit d'eau dans la ligne de fuite du joint 1.
- Q_{jj2} : c'est le débit d'eau dans la ligne de fuite du joint 2.

Nous ne disposons pas d'informations sur les pressions sur les lignes de fuite des joints. Elles seront supposées stables, cette hypothèse s'avère vérifiée dans la réalité. Sur le joint trois, aucune information n'est disponible; les processus et les phénomènes associés à ce joint (PH4, H5 et H6) ne seront pas examinés dans notre application (ils seraient tout le temps juste consistants).

6.2 Identification du fonctionnement normal

Nous allons utiliser les observations disponibles pour identifier le comportement du système. Pour cela nous pouvons utiliser un ensemble de mesures effectuées à partir du KIT de surveillance d'une centrale. A partir de ces mesures on observe que la différence de pression entre l'injection RCV et le primaire est continûment positive. De plus, le débit d'injection est corrélé à cette différence de pression. Les débits de fuite sur les lignes des joints 1 et 2 sont positifs et stables (environ 1 pour cent de variation par rapport à la moyenne). A n'importe quel point de mesure nous disposons donc des observations suivantes :

- $(P_{rcv} - P_{pri}) > 0$
- $Q_{rcv} > 0$
- $Q_{jt1} > 0$ et stable
- $Q_{jt2} > 0$ et stable ($Q_{jt1} \gg Q_{jt2}$)

A partir de ces informations, nous allons dérouler notre procédure de diagnostic.

6.2.1 Phénomènes à réaliser

Les phénomènes à réaliser sont normalement PH1, PH2, PH3, PH4, PH5, PH6 et PH7¹⁸ (tous les phénomènes nécessaires au fonctionnement de la pompe). Pratiquement, les phénomènes PH5 et PH6 n'ont pas de "modèles", ils permettent l'organisation de la connaissance sur le comportement mécanique du joint. Le phénomène à réaliser, d'un point de vue mécanique, est uniquement le phénomène PH7, sa réalisation entraînera celle de PH6 et donc de PH5. Pour les mêmes

¹⁸. ou PH7', on considère ici les cas où P_{rcv} est stable ou augmente

raisons le phénomène PH2 n'est pas examiné puisque sa réalisation découle de celles de PH3, PH4 et PH5. Le phénomène PH4 ne sera pas étudié non plus puisque l'on ne dispose pas des observations nécessaires pour établir son état (pas de mesures disponibles sur le joint 3).

En définitive l'ensemble des phénomènes à réaliser est :

$$- PHAR = \{PH1, PH3, PH7\}.$$

6.2.2 Identification de l'état des phénomènes

Aucun des modèles des phénomènes de PHAR n'est en contradiction avec les observations, ils appartiennent donc tous à PHC :

$$- PHC = \{PH1, PH3, PH7\}.$$

Les effets des phénomènes PH1 et PH3 sont observés (respectivement $Q_{rcv} > 0$, $Q_{jt1} > 0$ et $Q_{jt2} > 0$), ils sont donc réalisés. On a donc :

$$- PHR = \{PH1, PH3\}.$$

PH3 est réalisé, comme PH7 appartient au support de PH3, donc PH7 est déduit comme réalisé. On a donc :

$$- PHC = PHR = \{PH1, PH3, PH7\}$$

$$- PHN = \emptyset$$

6.2.3 Exploitation

Tous les phénomènes de PHAR ont été reconnus comme réalisés donc tous les processus de leur organisation sont actifs : $PRA = \{M1, M2, M3, H1, H2, H3, H4\}$ et $PRE = \emptyset$. De plus, il n'y a pas de conflits de processus, le fonctionnement est donc identifié comme un comportement normal ($PHN = \emptyset$ et $PRI = \emptyset$).

6.3 Identification des comportements dégradés

Nous ne disposons pas de mesures correspondant à des pannes. Nous ne pouvons donc que simuler celles-ci. Nous allons étudier le cas du colmatage du joint 1. Dans un premier temps, nous supposons que l'on ne dispose pas de modèles alternatifs, dans un second temps, nous verrons comment l'on peut les utiliser.

Nous allons considérer que les observations dont nous disposons sont identiques sauf pour les débits de fuite des joints 1 et 2. Pour ces variables on observe : $Q_{jt1} \rightarrow 0$ et $Q_{jt2} \rightarrow 0$.

6.3.1 Cas du colmatage sans modèles alternatifs

Définition de PHAR

PHAR est identique à celui de la section 6.2 :

$$- PHAR = \{PH1, PH3, PH7\}.$$

Identification des phénomènes

Aucune des conditions des phénomènes n'est en contradiction avec les observations :

$$- PHH = \emptyset.$$

Un phénomène a des effets en contradiction avec les observations PH3 :

$$- PHN = PHD = \{PH3\}.$$

PH3 n'appartient au support d'aucun phénomène, on obtient donc :

$$- PHC = \{PH1, PH7\}.$$

Les effets de PH1 sont observés, ceux de PH7 sont inconnus, on a donc :

$$- PHR = \{PH1\}$$

$$- PHJC = \{PH7\}.$$

L'introduction de PH1 dans PHR n'entraîne pas de phase de propagation (ses effets et ses conditions appartiennent déjà aux observations).

Comme les conditions de PH3 sont remplies (son support PH1 est réalisé) alors ce phénomène spécifie un panne interne :

$$- PHN = PHD = PHPI = \{PH3\}.$$

$$- PH?D = \emptyset.$$

Exploitation des résultats

A partir de PHR on construit un ensemble de processus actifs (l'organisation de PH1 est $\{H1\}$):

$$- PRA = \{H1\} .$$

L'introduction de H1 dans PRA n'entraîne pas de phase de propagation (ses effets et ses conditions sont identiques à ceux de PH1).

A partir de PHD et $PHJC$ on obtient un ensemble de processus à examiner (l'organisation de PH7 est $\{M1, M2, M3\}$, celle de PH3 est $\{H2, H3, H4\}$):

$$- PRE = \{M1, M2, M3, H2, H3, H4\} .$$

Identification des processus

Un processus a des conditions en contradiction avec les observations (on observe $Q_{jt1} \rightarrow 0$ alors que la condition de fonctionnement de $H4$ est $Q_{jt1} > 0$):

$$- PRH = \{H4\}.$$

Les autres processus ont des effets qui ne sont pas observables, ils sont tous juste consistants:

$$- PRJC = \{M1, M2, M3, H2, H3\}.$$

Construction des conflits

A partir de PHPI on peut construire un conflit de phénomène:

$$- CONF_{ph} = \{(PH3)\}.$$

Comme $PH?D = \emptyset$ on ne peut pas construire d'autre conflit de phénomènes.

$PRPI = \emptyset$, on ne peut donc pas l'utiliser pour construire des conflits de processus. On ne peut construire des conflits de processus qu'à partir des conflits de phénomènes:

$$- CONF_{pr} = \{(H2, H3, H4)\} \text{ qui correspond à l'organisation de PH3.}$$

Les processus de PRH et de PRA sont retirés du conflit, on obtient (puisque $PRH = \{H4\}$):

$$- CONF_{pr} = \{(H2, H3)\}.$$

Le conflit de processus obtenu est traduit en terme de conflit de rôles fonctionnels. Comme il n'y a pas de processus défaillants dans ce conflit, le conflit de rôles fonctionnels correspond à l'union des cofonctions des processus H2 et H3:

$$- CONF_{rf} = \{(cofonction(H2) \cup cofonction(H3))\}.$$

Ce qui correspond à:

$$- CONF_{rf} = \{(SE(prcv), R_{jt1}, SE(Pfjt1), SF(h))\}.$$

Dans ce conflit, les rôles fonctionnels correspondant aux sources $SE(Prcv)$ et $SE(Pfjt1)$ peuvent être exonérés puisque ces sources correspondent à des variables mesurées. Le conflit est donc $\{(R_{jt1}, SF(h))\}$. Ces deux rôles fonctionnels modélisent des comportements du joint 1, la panne est donc localisée au niveau du joint 1. On dispose au final d'un conflit de composant: $\{(Jt1)\}$.

6.3.2 Cas du colmatage avec modèles alternatifs

Définition de PHAR et identification des phénomènes

Cette phase est identique à celle décrite dans le paragraphe 6.3.1. Elle nous permet d'obtenir :

- $PHAR = \{PH1, PH3, PH7\}$.
- $PHH = \emptyset$.
- $PHN = PHD = PHPI = \{PH3\}$.
- $PH?D = \emptyset$.
- $PHC = \{PH1, PH7\}$.
- $PHR = \{PH1\}$ et $PHJC = \{PH7\}$.

Test des alternatives des phénomènes

On doit tester les alternatives des phénomènes de PHN. Comme PHH est vide nous allons uniquement examiner les alternatives de PH3 qui est le seul élément de PHD. L'alternative PH3' est réalisée puisque $Q_{jt1} \rightarrow 0$ est observé. On retire donc PH3 de PHD et PH3' est placé dans PHR. On a désormais :

- $PHD = \emptyset$.
- $PHR = \{PH1, PH3'\}$.

Propagation des phénomènes réalisés alternatifs

Chaque processus appartenant à l'organisation d'un phénomène réalisé est actif, on obtient donc (puisque l'organisation de PH3' est $\{H7, H3', H4'\}$):

- $PRA = \{H1, H7, H3', H4'\}$.

L'activité de ces processus de PRA implique que leurs conditions et leurs effets sont remplis :

- H7 donne : $Q_r \rightarrow 0$
- H4' donne : $Q_{jt2} \rightarrow 0$
- H3' donne : $h > 0$ et diminue et $Q_h \rightarrow \infty$

A partir de ces nouvelles informations on va réévaluer les phénomènes de PHJC. L'« observation » $h > 0$ et diminue est en contradiction avec l'effet de PH7, PH7 est donc placé dans PHD; comme ses conditions sont remplies ($(P_{rcv} - P_{fjt1}) > 0$) il est placé dans PHPI. On a désormais :

- $PHH = \emptyset$.
- $PHD = PHPI = \{PH7\}$.

Réévaluation des alternatives

Il faut donc évaluer les alternatives de PH7. Parmi celles ci le phénomène alternatif PH9 est réalisé (son effet est $h > 0$ et diminue). PH7 est retiré de PHD, PH9 est ajouté dans PHR. On obtient donc :

- $PHD = \emptyset$.
- $PHR = \{PH1, PH3', PH9\}$.

Cette modification de PHR entraîne une modification de PRA qui devient (puisque l'organisation de PH9 est $\{M1, M3\}$):

- $PRA = \{H1, H7, H3', H4', M1, M3\}$

Il n'y a plus de phénomènes dans PHJC, les nouvelles observations déductibles de PRA ne nous permettent pas de nouvelle déduction.

L'état fonctionnel est donc :

- $PHN = \emptyset$ ce qui correspond à :
 - $PHH = \emptyset$.
 - $PHD = \emptyset$.
- $PHC = \{PH1, PH3', PH9\}$ qui se décompose en :
 - $PHR = \{PH1, PH3', PH9\}$.
 - $PHJC = \emptyset$.
- $PRA = \{H1, H7, H3', H4', M1, M3\}$.
- $PRE = \emptyset$.

Il n'est pas possible de construire de conflit de phénomènes puisque PHPI et PH?D sont vides. De même, il n'est pas possible de construire de conflit de processus puisque PRPI et PR?D sont vides. Comme il n'existe pas de conflits de processus il ne peut exister de conflits de rôles fonctionnels.

La panne est explicitement identifiée. En effet, PH9 correspond au colmatage du joint entraînant, dans le domaine mécanique, une perte de la capacité représentant la raideur hydraulique. PH9 entraîne l'activité du processus H3'. Parallèlement, H7 correspond au colmatage du joint entraînant une résistance du joint infinie. H7 et H3' ont pour effet de réduire Q_{jt1} , ce qui correspond à la condition de fonctionnement de H4' et permet donc d'expliquer que Q_{jt1} et Q_{jt2} tendent vers zéro.

7

Conclusion

Du point de vue de la modélisation, nous avons vu que nous pouvions :

- Construire les modèles fonctionnels du système à partir du bond-graph représentant son comportement. La description de ce comportement, bien que difficile à réaliser, permet ensuite de disposer des informations nécessaires à la construction des autres modèles.
- Décrire les pannes définies dans DIAPO, relatives à l'ensemble injection RCV et joints dans le domaine hydraulique, et les associer (sous forme d'alternatives) aux phénomènes et processus qu'elles influencent.
- Intégrer les dysfonctionnements provenant du domaine mécanique et les décrire comme des alternatives au fonctionnement normal des phénomènes et des processus. D'autres domaines physiques pourraient être pris en compte facilement. Par exemple, pour décrire l'aspect thermique, il suffirait de décrire la viscosité comme un paramètre de R_{jH} pour spécifier que la résistance varie en fonction de la température et par voie de conséquence que le débit du joint varie en fonction de la température. Ceci peut être représenté sous la forme d'un phénomène appartenant au support de PH3.

L'exemple que nous avons traité dans cette partie nous a permis d'illustrer notre procédure de raisonnement. Dans un premier temps, nous avons pu identifier le comportement du système en fonctionnement normal. L'introduction d'observations simulant la panne du joint nous a permis de localiser la défaillance puis de l'expliquer. L'approche multi-modèles semble donc être une démarche de modélisation adaptée à la recherche de diagnostic. L'utilisation combinée du modèle des phénomènes et du modèle des processus permet de prendre en compte facilement les modifications du comportement en cas de pannes, et permet de plus de fournir une explication partielle. Elle nous permet en particulier de décrire simplement l'influence de l'aspect mécanique du fonctionnement du joint sur son aspect hydraulique. Les résultats que nous obtenons n'expliquent pas les défaillances avec autant de précision que peut le faire une modélisation des pannes

comme celle de DIAPO. Nous identifions clairement la défaillance, par exemple le colmatage, mais nous ne fournissons pas d'explications de cette défaillance (arrivée de particules provenant de la présence de particules dans l'eau ou d'une filtration incorrecte de l'eau injectée).

Toutefois, cette application ne s'est pas avérée suffisamment significative pour valider notre méthode. En particulier, les données disponibles ne nous ont pas permis de valider l'utilisation des alternatives au niveau des processus. Un exemple plus complet devra être trouvé pour permettre de tester plus précisément notre démarche.

Enfin, l'exemple que nous avons utilisé est de nature plutôt statique. Si l'on compare notre prise en compte du temps aux formalisations proposées dans [Console et Theseider Dupré(1998)], elle s'apparente à une « *atemporal single snapshot approach* ». C'est-à-dire que le diagnostic est effectué à partir d'un ensemble d'observations collecté pour un intervalle de temps donné. C'est le changement du signe ou du sens de variation d'une des variables mesurées qui entraînera la prise en compte d'un nouvel ensemble d'observations qui, lui même, conduira à recommencer la démarche de diagnostic à partir du départ.

Conclusions et perspectives

Conclusions

L'utilisation d'outils d'aide à la décision est une aide indispensable à la gestion et à la supervision d'installations industrielles. Ces outils nécessitent d'une part une modélisation qui, tout en représentant le comportement du système, puisse évoluer facilement pour prendre en compte les évolutions de l'installation et d'autre part des méthodes de raisonnement permettant d'identifier le fonctionnement du système. Notre apport est donc double, il porte sur la démarche de construction des différents modèles décrits dans l'approche multi-modèles et sur la méthode de raisonnement reposant sur cette modélisation. Du point de vue modélisation, nous avons montré qu'une modélisation du comportement à base de bond-graphs permet, en plus de la construction automatique du modèle des rôles fonctionnels, de générer une grande partie du modèle des processus. En particulier elle permet de :

- Générer automatiquement les cofonctions des processus représentant des comportements normaux du système.
- Fournir un guide pour la définition des conditions d'activation des processus en fonction de leur cofonction. La description explicite de ces conditions nécessite néanmoins une phase d'expertise pour particulariser ces conditions en fonction de l'application.

Une modification du modèle comportemental peut donc être facilement propagée à travers les différents modèles ce qui assure une bonne évolutivité de la multi-modélisation. De plus, cette architecture de représentation des connaissances permet une représentation du fonctionnement du système (normal ou non) dans différents contextes (désirés ou non). Cette représentation peut être effectuée à différents niveaux (phénomènes, processus ou rôles fonctionnels) et peut être facilement étendue en introduisant de nouveaux comportements sous la forme d'alternatives aux phénomènes ou aux processus déjà décrits.

Du point de vue du diagnostic notre apport majeur est l'élaboration d'une nouvelle méthode reposant sur l'utilisation de cette modélisation. Cette méthode repose sur l'utilisation de l'aspect hiérarchique des modèles, de l'hypothèse de

non-compensation des défaillances et des alternatives au comportement normal. L'hypothèse de non compensation permet l'utilisation de la hiérarchie des modèles pour exonérer les processus et les rôles fonctionnels. Cette hypothèse est réaliste pour le type de système étudié. Dans la pratique, la réalisation d'un effet attendu par une conjonction de pannes est fortement improbable. L'utilisation des alternatives permet d'identifier les défaillances « au plus tôt » et évite ainsi d'explorer les modèles alternatifs des processus de l'organisation d'un phénomène ou de construire inutilement des conflits à partir des organisations ou des cofonctions des phénomènes et des processus défaillants.

Cette méthode permet d'expliquer une partie des observations. Elle fournit un diagnostic spécifiant les phénomènes et les processus (normaux ou alternatifs) dont le fonctionnement est vérifié et des diagnostics noyaux contenant les composants dont le comportement normal est en conflit avec les observations. L'avantage principal de cette méthode par rapport à des méthodes classiques par consistance tient à la simulation hors ligne des comportements des phénomènes et des processus et à la précompilation partielle des conflits. Cette procédure de diagnostic, appliquée au fonctionnement de l'ensemble injection RCV et joints du GMPP, nous a permis d'identifier le comportement normal de ce système et de diagnostiquer une défaillance simulée.

Cependant, deux problèmes peuvent apparaître lors de sa mise en oeuvre. Tout d'abord, la construction du modèle comportemental est une étape fondamentale de notre approche, c'est elle qui nous permettra de générer les modèles sur lesquels le raisonnement repose. Cette étape nécessite de nombreux efforts de modélisation pour obtenir une interprétation du comportement du système qui, sous forme de bond-graph, permettra la construction de modèles fonctionnels exploitables. Il n'existe pas de méthode permettant de définir, a priori, le niveau de détail et les variables qui sont nécessaires pour le diagnostic. Enfin, cette méthode suppose que l'on dispose de suffisamment de mesures pour discriminer et identifier les phénomènes et les processus réalisés (attendus ou alternatifs). Ce critère de « diagnosticabilité » peut être difficile à atteindre (comme on a pu le voir dans notre application).

Perspectives

Le principal prolongement de ces travaux concerne la mise en oeuvre de notre méthode sur un exemple plus consistant. En effet, l'application que nous avons retenue ne nous a pas permis de valider complètement notre approche. Pour vérifier totalement notre méthode, il faudrait disposer d'une application pour laquelle plus de données seraient disponibles. Ces données pourraient être issues de mesures réelles des dysfonctionnements du système ou d'une simulation des défaillances potentielles. Cette application pourrait porter sur l'ensemble injection joints que nous avons présenté dans ce rapport, ou sur une partie du circuit pri-

maire d'un REP (la modélisation du REP peut être trouvée dans [Zouaoui(1998)] ou bien encore sur un nouveau système dont le comportement pourrait être décrit en terme d'effort et de flux généralisés (pour pouvoir le représenter sous forme de bond-graph).

Une autre perspective concerne la prise en compte des changements de comportement au niveau des rôles fonctionnels. Ces changements entraînent normalement un changement du modèle comportemental. De tels changements ne sont envisagés dans notre approche que si nous pouvons les décrire par un changement de cofonction dans un processus alternatif. On pourrait s'intéresser à l'étude exhaustive des comportements des rôles fonctionnels (qui n'ont pas été exonérés par un processus actif), pour déterminer leur état (hors contexte, normal, défaillant, etc ...) et étudier ensuite leurs comportements alternatifs.

Deux autres perspectives à plus long terme semblent intéressantes :

- La prise en compte du temps : Elle n'a pas un effet crucial dans notre application. Pourtant, il serait intéressant d'examiner les possibilités de prise en compte explicite de l'aspect temporel du comportement des composants.
- Les notions de commandabilité et d'observabilité : dans [Borne et al.(1992)], il semble que les notions de chemin causal et de boucle causale puissent être reliées aux notions de commandabilité et d'observabilité d'un système utilisées en automatique. Il faudrait préciser les liens entre ces différentes notions et voir si ces liens peuvent permettre de fournir une aide pour la reconfiguration du système après une défaillance.

Bibliographie

- [Allouche et al.(1997)] M. Allouche, S. Bibas, S. Cauvin, M-O. Cordier, P. Dague, G. Deflandre, C. Dousson, M. Dumas, D. Fontaine, S. Gentil, P. Laborie, F. Lévy, J. Montmain, M. Porcheron, G. Ramaux, L. Rozé, C. Sayettat, I. Servet, et L. Travé-Massuyès. Surveillance et interprétation d'alarmes en milieu industriel. Technical report, Rapport d'activité du groupe "Alarme, France, 1997.
- [Borne et al.(1992)] Pierre Borne, Geneviève Dauphin-Tanguy, Jean Pierre Richard, Frédéric Rotella, et Irène Zambettakis. *Modélisation et identification des processus*, volume 2 of *Readings in*. TECHNIP, Paris, 1992.
- [Cassar et al.(1994)] Jean-Philippe Cassar, Robert-Georges Litwak, Vincent Cocquempot, et Marcel Staroswiecki. Approche structurelle de la conception de systèmes de surveillance pour des procédés industriels complexes. *Diagnostic et sûreté de fonctionnement*, 4(2):179-202, 1994.
- [Chatain(1991)] J.P. Chatain. *Maintenance corrective par système expert, application au métro de Lyon*. PhD Thesis, Université Claude Bernard - Lyon 1, 1991.
- [Chevalier(1994)] R. Chevalier. SAMT Tricastin 2: analyse du retour d'expérience. Technical report der-edf 1994 hp-65/94/081, Electricité de France, France, 1994.
- [Chittaro(1995)] L. Chittaro. Functional diagnosis and prescription of measurements using effort and flow variables. *IEEE Proc.-Control Theory Appl.*, 142, n 5, 1995.
- [Chittaro et al.(1993)] L. Chittaro, G. Guida, C. Tasso, et E. Toppano. Functional and Teleological Knowledge in the Multimodeling Approach for Reasoning About Physical Systems: A Case Study in Diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23, n 6, 1993.
- [Chittaro et Ranon(1996)] L. Chittaro et R. Ranon. Augmenting the diagnostic power of flow-based approaches to functional reasoning. In *Proc. of AAAI-96, 13th National Conference on Artificial Intelligence*, 1996.

- [Combes(1991)] M. Combes. Calcul des joints d'arbres et garnitures d'étanchéité hydrostatiques. *References Jeumont Schneider Industrie*, 1991.
- [Console et Theseider Dupré(1998)] L. Console et D. Theseider Dupré. On the dimensions of temporal model-based diagnosis. In *Ninth International Workshop on Principles of Diagnosis (Dx98)*, Cape Cod, Massachusetts, pages 16–23, 1998.
- [Console et al.(1989)] L. Console, D. Theseider Dupré, et P. Torasso. A theory of diagnosis for incomplete Causal Models. In *11th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Detroit*, pages 1311–1317, 1989.
- [Console et Torasso(1990)] L. Console et P. Torasso. Integrating Models of the correct behavior into Abductive Diagnosis. In *ECAI 1990*, 1990.
- [Console et Torasso(1992)] L. Console et P. Torasso. A spectrum of logical definitions of model-based diagnosis. *Readings in model Based Diagnosis*, pages 78–88, 1992.
- [Cordier(1998)] Marie Odile Cordier. When abductive diagnosis fails to explain too precise observations: an extended spectrum of definitions on abstracting observations. In *12th Workshop on Qualitative Reasoning QR'98, Cape Cod USA*, pages 24–31, 1998.
- [De Kleer(1986)] J. De Kleer. An Assumption-based TMS. *Artificial Intelligence*, 26 (2):127–162, 1986.
- [De Kleer et Williams(1986)] J. De Kleer et B.C. Williams. Reasoning about multiple faults. In *American Association for Artificial Intelligence, Philadelphia*, pages 132–139, 1986.
- [De Kleer et Williams(1987)] J. De Kleer et B.C. Williams. Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 32:97–130, 1987.
- [De Kleer et Williams(1989)] J. De Kleer et B.C. Williams. Diagnosis with Behavioral Modes. In *11th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Detroit*, pages 1324–1330, 1989.
- [De Kleer et al.(1992)] J. DeKleer, A.K. Mackworth et R. Reiter. Characterizing diagnoses and systems. *Artificial Intelligence*, 56 (2-3):197–222, 1992.
- [Dressler(1990)] O. Dressler. Problem solving with the NM-ATMS. In *European Conference on Artificial Intelligence*, pages 253–258, 1990.
- [Dressler et al.(1993)] O. Dressler, C. Böttcher, M. Montag, et A. Brinkop. Qualitative and Quantitative Models in a Model-based Diagnosis system for Ballast tank systems. In *International Conference on Fault Diagnosis (TOOL-DIAG)*, pages 397–405, 1993.

- [Dressler et Struss(1994)] O. Dressler et P. Struss. Model-based diagnosis with the default-based diagnosis engine: effective control strategies that work in practice. In *European Conference on Artificial Intelligence*, pages 677–681, 1994.
- [Dumas et al.(1996)] M. Dumas, R. Yacoub, et G. Arnaud. Stratégies de résolution pour focaliser un Système de Maintien de la Cohérence. Technical report cemif-cea 1996, Commissariat à l’Energie Atomique, France, 1996.
- [Greiner et al.(1989)] R. Greiner, B. Smith, et R.W. Wilkerson. A correction to the algorithm in Reiter’s theory of diagnosis. *Artificial Intelligence*, 41: 79–88, 1989.
- [Hawkins et al.(1994)] R. Hawkins, J. Sticklen, J. K. Mcdowell, P. Hill, et R. Boyer. Function-based Modeling and Troubleshooting. *Applied Artificial Intelligence*, 8:285-302, 1994.
- [Kean et Tsiknis(1988)] Kean et Tsiknis. An incremental method for generating prime implicants/implicates. Technical report tr-88-16, University of British Columbia, USA, 1988.
- [Larsson(1996)] J.E. Larsson. Diagnosis based on explicit means and models. *Artificial Intelligence*, 80:29-93, 1996.
- [Mosterman et al.(1997)] P. J. Mosterman, G. Biswas, et S. Narasimhan. Measurement Selection and Diagnosability of Complex Physical Systems. In *8th Workshop on Principles of Diagnosis DX’97, Mt St Michel France*, 1997.
- [Poole(1989)] D. Poole. Normality and faults in logic-based diagnosis. In *11th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Detroit*, pages 1304–1310, 1989.
- [Porcheron et Ricard(1993)] M. Porcheron et B. Ricard. DIAPO, an industrial application of advanced AI methods for the diagnosis of a complex system. In *International Conference on Fault Diagnosis TOOLDIAG’93, Toulouse*, 1993.
- [Porcheron et Ricard(1996)] M. Porcheron et B. Ricard. Diagnostic à base de modèles de pannes - Une caractérisation des méthodes mises en oeuvre dans les systèmes DIVA et DIAPO. Technical report der-edf 1994 hp-21/96/021/a, Electricité de France, France, 1996.
- [Porcheron et al.(1994)] M. Porcheron, B. Ricard, J.L. Busquet, et P. Parent. DIAPO, a case study in applying advanced AI techniques to the diagnosis of a complex system. In *11th European Conference on Artificial Intelligence, Amsterdam*, 1994.

- [Porcheron et Ricard(1997)] Marc Porcheron et Benoit Ricard. An Application of Abductive Diagnostic Methods to a Real-World Problem. In *Eighth International Workshop on Principle of Diagnosis, Mt St Michel, France, 1997*.
- [Reiter(1980)] R. Reiter. A logic for default reasoning. *Artificial Intelligence*, 13: 81–132, 1980.
- [Reiter(1987)] R. Reiter. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 32:57–95, 1987.
- [Reiter et De Kleer(1987)] R. Reiter et J. De Kleer. Foundations of Assumption-based Truth Maintenance Systems. In *American Association for Artificial Intelligence, Seattle*, pages 183–188, 1987.
- [Rémy(1995)] E. Rémy. Etude de l'application du diagnostic à base de modèles aux pompes primaires des centrales nucléaires. Technical report der-edf 1995 hp-28/95/024/a, Electricité de France, France, 1995.
- [Rosenberg et Karnopp(1983)] R.C. Rosenberg et D. C. Karnopp. *Introduction to Physical System Dynamics*. Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, New York, 1983.
- [Steels(1989)] L. Steels. Diagnosis with a Function-Fault Model. *Applied Artificial Intelligence*, 3:129-153, 1989.
- [Sticklen et Chandrasekaran(1989)] J. Sticklen et B. Chandrasekaran. Integrating Classification-based Compiled Level Reasoning with Function-based Deep Level Reasoning. *Applied Artificial Intelligence*, 3:191-220, 1989.
- [Struss(1992)] P. Struss. What in SD? Towards a Theory of Modeling for Diagnosis. *Readings in model Based Diagnosis*, pages 419–449, 1992.
- [Struss et Dressler(1989)] P. Struss et O. Dressler. Physical negation: Integrating fault models into the general diagnostic engine. In *11th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Detroit*, pages 1318–1323, 1989.
- [Tayrac(1990)] P. Tayrac. *Etude de nouvelles stratégies de résolution: Application à l'ATMS*. PhD Thesis, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1990.
- [Thétiot et al.(1998)] R. Thétiot, F. Zouaoui, M. Dumas, et P. Dague. Automatic Construction of Processes from a Bond Graph Representation. In *12th Workshop on Qualitative Reasoning QR'98, Cape Cod USA, 1998*.
- [Yacoub et al.(1996)] R. Yacoub, M. Dumas, et R. Thétiot. Focusing an RMS applied in Model Based Diagnosis. In *CESA'96 Symposium on Modelling, Analysis and Simulation, Lille*, volume 1, pages 523–528, 1996.

- [Zouaoui et al.(1997a)] F. Zouaoui, R. Thétiot, et M. Dumas. Multimodeling Representation for Physical Systems: Application to PWR Primary Coolant Loop. In *11th Workshop on Qualitative Reasoning QR'97, Cortona Italy*, 1997.
- [Zouaoui et al.(1997b)] F. Zouaoui, R. Thétiot, et M. Dumas. Multimodeling Representation of PWR Primary Coolant Loop. In *Poster Proceedings of IJCAI, Nagoya Japan*, 1997.
- [Zouaoui et al.(1998)] F. Zouaoui, R. Thétiot, et M. Dumas. Multimodeling Representation for Physical Systems: Application to PWR Primary Coolant Loop. In *Proceedings of 11th International Conference on Industrial Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA-AIE), Castellon (Espagne)*, volume 2, pages 242-251, 1998.
- [Zouaoui(1998)] Fakher Zouaoui. *Aide à l'interprétation du fonctionnement des systèmes physiques en utilisant une approche multi-modèles: Application au circuit primaire d'une centrale à eau pressurisée*. PhD Thesis, Université d'Orsay - Paris XI, 1998.