



**HAL**  
open science

# Raisonnement qualitatif: application à l'aide à la supervision des procédés continus

Philippe Caloud

► **To cite this version:**

Philippe Caloud. Raisonnement qualitatif: application à l'aide à la supervision des procédés continus. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1988. Français. NNT: . tel-00330362

**HAL Id: tel-00330362**

**<https://theses.hal.science/tel-00330362>**

Submitted on 14 Oct 2008

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

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

719 4937

# THESE

*présentée par*

**Philippe CALOUD**

*pour obtenir le titre de DOCTEUR*

**de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

*(arrêté ministériel du 5 Juillet 1984)*

(Spécialité : Informatique)

◆◆◆◆  
**RAISONNEMENT QUALITATIF**  
**APPLICATION A L'AIDE A LA SUPERVISION DES**  
**PROCEDES CONTINUS**  
◆◆◆◆

**Thèse soutenue le 22 décembre 1988 devant la commission d'examen.**

<b>Mr J. MOSSIERE</b>	<b>Président</b>
<b>Mme S. GENTIL</b>	<b>Rapporteurs</b>
<b>Mr D. DUBOIS</b>	
<b>Mr Y. DESCOTTE</b>	<b>Examineurs</b>
<b>Mr M. GONDRAN</b>	
<b>Mr J.C. LATOMBE</b>	

**Thèse préparée au sein du Laboratoire LIFIA**



# INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

Président : Georges LESPINARD

Année 1988

## Professeurs des Universités

BARIBAUD Michel	ENSERG	JOUBERT Jean-Claude	ENSPG
BARRAUD Alain	ENSIEG	JOURDAIN Geneviève	ENSIEG
BAUDELET Bernard	ENSPG	LACOUME Jean-Louis	ENSIEG
BEAUFILS Jean-Pierre	ENSEEG	LESIEUR Marcel	ENSHMG
BLIMAN Samuel	ENSERG	LESPINARD Georges	ENSHMG
BLOCH Daniel	ENSPG	LONGEQUEUE Jean-Pierre	ENSPG
BOIS Philippe	ENSHMG	LOUCHET François	ENSIEG
BONNETAIN Lucien	ENSEEG	MASSE Philippe	ENSIEG
BOUVARD Maurice	ENSHMG	MASSELOT Christian	ENSIEG
BRISSONNEAU Pierre	ENSIEG	MAZARE Guy	ENSIMAG
BRUNET Yves	IUFA	MOREAU René	ENSHMG
CAILLERIE Denis	ENSHMG	MORET Roger	ENSIEG
CAVAIGNAC Jean-François	ENSPG	MOSSIERE Jacques	ENSIMAG
CHARTIER Germain	ENSPG	OBLED Charles	ENSHMG
CHENEVIER Pierre	ENSERG	OZIL Patrick	ENSEEG
CHERADAME Hervé	UFR PGP	PARIAUD Jean-Charles	ENSEEG
CHOVET Alain	ENSERG	PERRET René	ENSIEG
COHEN Joseph	ENSERG	PERRET Robert	ENSIEG
COUMES André	ENSERG	PIAU Jean-Michel	ENSHMG
DARVE Félix	ENSHMG	POUPOT Christian	ENSERG
DELLA-DORA Jean	ENSIMAG	RAMEAU Jean-Jacques	ENSEEG
DEPORTES Jacques	ENSPG	RENAUD Maurice	UFR PGP
DOLMAZON Jean-Marc	ENSERG	ROBERT André	UFR PGP
DURAND Francis	ENSEEG	ROBERT François	ENSIMAG
DURAND Jean-Louis	ENSIEG	SABONNADIÈRE Jean-Claude	ENSIEG
FOGGIA Albert	ENSIEG	SAUCIER Gabrielle	ENSIMAG
FONLUPT Jean	ENSIMAG	SCHLENKER Claire	ENSPG
FOULARD Claude	ENSIEG	SCHLENKER Michel	ENSPG
GANDINI Alessandro	UFR PGP	SILVY Jacques	UFR PGP
GAUBERT Claude	ENSPG	SIRIEYS Pierre	ENSHMG
GENTIL Pierre	ENSERG	SOHM Jean-Claude	ENSEEG
GREVEN Hélène	IUFA	SOLER Jean-Louis	ENSIMAG
GUERIN Bernard	ENSERG	SOUQUET Jean-Louis	ENSEEG
GUYOT Pierre	ENSEEG	TROMPETTE Philippe	ENSHMG
IVANES Marcel	ENSIEG	VEILLON Gérard	ENSIMAG
JAUSSAUD Pierre	ENSIEG	ZADWORNÝ François	ENSERG

**Professeur Université des Sciences  
Sociales  
( Grenoble II )**

BOLLIET Louis

**Personnes ayant obtenu le diplôme  
d'HABILITATION A DIRIGER DES  
RECHERCHES**

BECKER Monique  
BINDER Zdenek  
CHASSERY Jean-Marc  
CHOLLET Jean-Pierre  
COEY John  
COLINET Catherine  
COMMAULT Christian  
CORNUJOLS Gérard  
COULOMB Jean- Louis  
DALARD Francis  
DANES Florin  
DEROO Daniel  
DIARD Jean-Paul  
DION Jean-Michel  
DUGARD Luc  
DURAND Madeleine  
DURAND Robert  
GALERIE Alain  
GAUTHIER Jean-Paul  
GENTIL Sylviane  
GHIBAUDO Gérard  
HAMAR Sylvaine  
HAMAR Roger  
LADET Pierre  
LATOMBE Claudine  
LE GORREC Bernard  
MADAR Roland  
MULLER Jean  
NGUYEN TRONG Bernadette  
PASTUREL Alain  
PLA Fernand  
ROUGER Jean  
TCHUENTE Maurice  
VINCENT Henri

**Chercheurs du C.N.R.S  
Directeurs de recherche 1ère Classe**

CARRE René  
FRUCHART Robert  
HOPFINGER Emile  
JORRAND Philippe  
LANDAU Ioan  
VACHAUD Georges  
VERJUS Jean-Pierre

**Directeurs de recherche  
2ème Classe**

ALEMANY Antoine  
ALLIBERT Colette  
ALLIBERT Michel  
ANSARA Ibrahim  
ARMAND Michel  
BERNARD Claude  
BINDER Gilbert  
BONNET Roland  
BORNARD Guy  
CAILLET Marcel  
CALMET Jacques

COURTOIS Bernard  
DAVID René  
DRIOLE Jean  
ESCUDIER Pierre  
EUSTATHOPOULOS Nicolas  
GUELIN Pierre  
JOURD Jean-Charles  
KLEITZ Michel  
KOFMAN Walter  
KAMARINOS Georges  
LEJEUNE Gérard  
LE PROVOST Christian  
MADAR Roland  
MERMET Jean  
MICHEL Jean-Marie  
MUNIER Jacques  
PIAU Monique  
SENATEUR Jean-Pierre  
SIFAKIS Joseph  
SIMON Jean-Paul  
SUERY Michel  
TEODOSIU Christian  
VAUCLIN Michel  
WACK Bernard

**Personnalités agréées à titre  
permanent à diriger des travaux de  
recherche (décision du conseil  
scientifique)**

**E.N.S.E.E.G**

CHATILLON Christian  
HAMMOU Abdelkader  
MARTIN GARIN Régina  
SARRAZIN Pierre  
SIMON Jean-Paul

**E.N.S.E.R.G**

BOREL Joseph

**E.N.S.I.E.G**

DESCHIZEAUX Pierre  
GLANGEAUD François  
PERARD Jacques  
REINISCH Raymond

**E.N.S.H.G**

ROWE Alain

**E.N.S.I.M.A.G**

COURTIN Jacques

**E.F.P.**

CHARUEL Robert

**C.E.N.G**

CADET Jean  
COEURE Philippe  
DELHAYE Jean-Marc  
DUPUY Michel  
JOUVE Hubert  
NICOLAU Yvan  
NIFENECKER Hervé  
PERROUD Paul  
PEUZIN Jean-Claude  
TAIB Maurice  
VINCENDON Marc

**Laboratoires extérieurs  
C.N.E.T**

DEVINE Rodericq  
GERBER Roland  
MERCKEL Gérard  
PAULEAU Yves

## Résumé

Nous proposons dans ce mémoire de thèse des outils de modélisation et de simulation pour la supervision des procédés continus.

Nous abordons le problème de la supervision sous l'angle de la traduction automatique des données obtenues par les modélisations quantitatives utilisées en automatique en des données qualitatives plus facilement compréhensibles par les opérateurs du procédé ; un langage de modélisation déclarative permet de représenter un procédé sous la forme d'un graphe, dont les nœuds figurent les grandeurs auxquelles on s'intéresse et les arcs des relations de causalité entre ces grandeurs. Les nœuds sont des fonctions du temps qui représentent les évolutions des grandeurs à l'aide de plusieurs vocabulaires, aussi bien quantitatifs que qualitatifs. Bien que la forme syntaxique du modèle reste identique, l'emploi de différents vocabulaires définit en pratique des modèles différents, auxquels sont attachés des algorithmes spécifiques. Ainsi, avec l'aide de techniques de simulation utilisant un vocabulaire quantitatif, il est possible de prédire l'évolution du procédé modélisé. Des techniques d'interprétation traduisent les résultats obtenus dans les vocabulaires qualitatifs. On obtient alors des points de vue sur l'évolution du procédé qui sont adaptés à la résolution de problèmes particuliers, comme l'analyse des alarmes provenant du système de contrôle-commande, le diagnostic, etc. Enfin, nous avons développé des techniques de maintenance de cohérence des données sur l'évolution du procédé, et de contrôle du temps d'exécution des algorithmes. Ces techniques ont été utilisées pour l'implantation d'un système de supervision sur le site d'un procédé continu.

## Abstract

We propose modelling and simulation techniques for computer aided supervision of continuous processes. Our approach of the problem focuses mainly on the automatic translation of the quantitative data produced by the models used in control theory, to qualitative data which are more easily understood by the process operators; a graph-based declarative language is used to model the process, where the nodes are variables of time quantified by both quantitative and qualitative vocabularies and the edges are causal relations between the variables. This kind of model allows a rather precise prediction of the behaviour of the process and a qualitative explanation of the numerical results of the prediction. Truth maintenance techniques have been designed in order to re-insert the observed evolution of a variable in the data base when it does not fit that which has been predicted. Real time techniques have been used to implement a supervision system connected on-line to a real process.

**Mots clefs :** Représentations Quantitatives et Qualitatives, Fonctions de Transfert, Propagation de Contraintes, Simulation à Événements Discrets, Temps Réel, Intelligence Artificielle, Automatisation Intégrée, Supervision des Procédés Continus.



# Remerciements

Je remercie les membres du jury de me faire l'honneur de juger cette thèse :

- Monsieur Jacques Mossière, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées,
- Madame Sylviane Gentil, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble,
- Monsieur Didier Dubois, Chargé de Recherche du CNRS au LSI de l'Université Paul Sabatier de Toulouse,
- Monsieur Yannick Descotte, Directeur du Département Recherches de la société ITMI, qui a assuré une grande partie de l'encadrement de ce travail,
- Monsieur Michel Gondran, Directeur du Département Traitement de l'Information et Etudes Mathématiques d'EDF à Clamart,
- Monsieur Jean-Claude Latombe, Professeur à l'Université de Stanford, qui m'a accueilli dans son équipe lorsqu'il était au LIFIA, et a dirigé ce travail avant son départ.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'ANRT, le LIFIA et la société ITMI dont je remercie les dirigeants, J.C. Latombe, puis G. Mezin pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires à son achèvement. Je tiens à remercier tout particulièrement Y. Descotte pour m'avoir formé à la recherche et donné l'exemple quotidien d'une grande rigueur intellectuelle. Ce travail a eu pour cadre le projet ALLIANCE<sup>1</sup>. Ce projet a été l'occasion d'une profonde collaboration avec des automaticiens du LAG, S. Gentil et S. Féray Beaumont, que je remercie pour m'avoir fait découvrir ce domaine. Merci aussi à

---

<sup>1</sup>La réalisation du projet ALLIANCE a été permise grâce à une aide du Ministère de la Recherche et de la Technologie (sous l'égide du comité "Automatisation des Procédés Continus") et d'Electricité de France. Le programme a été conduit par un Consortium constitué des partenaires suivants :

- maîtres d'ouvrages et utilisateurs : Commissariat à l'Energie Atomique, Electricité de France,
- industriels fournisseurs : Société Générale pour les Techniques Nouvelles, Industrie et Technologie de la Machine Inteligente,
- centres de recherche : Institut International de Robotique et d'Intelligence Artificielle de Marseille, SHELL-Recherche,
- laboratoires de recherche publique : Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Laboratoire d'Automatique Industrielle et Humaine de Valenciennes.



T. Chiche et B. Bouyssounouse pour l'aide qu'ils ont apportée à l'implantation du superviseur du système.

Ce travail de thèse a grandement bénéficié de l'environnement de recherche apporté par le LIFIA. Je sais gré à mon directeur de thèse, A. Lux, responsable de l'équipe IA, ainsi qu'à tous ses membres d'avoir œuvré à cet environnement. Je pense plus particulièrement à T. Granier et J.F. Rit avec qui j'ai longtemps partagé un intérêt pour les représentations du temps en Intelligence Artificielle.

Je remercie les personnes non déjà citées qui ont eu la gentillesse de lire et commenter avec compétence le manuscrit de cette thèse, Pierre Bessière, Hervé Delesalle, Yves Demazeau et Yves Lagoude.

Enfin, je remercie ma famille et particulièrement Jocelyne pour m'avoir aidé à passer le cap difficile de la rédaction.

Philippe Caloud

---

---

# Sommaire

---

---

<b>Sommaire</b>	<b>i</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>v</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1 Présentation du problème . . . . .	1
2 La contribution de notre travail : un système d'aide à la supervision des procédés continus . . . . .	4
2.1 L'application . . . . .	4
2.2 L'approche : l'interprétation qualitative de résultats numériques . . .	5
3 L'organisation du rapport . . . . .	6
<b>Chapitre 1 : Le raisonnement qualitatif en IA</b>	<b>7</b>
1 La Physique Qualitative . . . . .	8
1.1 Les motivations initiales . . . . .	8
1.2 Les objectifs . . . . .	9
1.3 Les modélisations proposées en Physique Qualitative . . . . .	10
1.4 Techniques de calcul qualitatif . . . . .	13
1.5 Les problèmes non résolus . . . . .	19
2 Les approches alternatives du raisonnement qualitatif en IA . . . . .	23
2.1 Interprétation causale de simulation . . . . .	23
2.2 L'interprétation du comportement de systèmes non linéaires . . . . .	25
3 Conclusion . . . . .	26

<b>Chapitre 2 : Le raisonnement qualitatif. Premières définitions.</b>	<b>29</b>
1 Le raisonnement qualitatif . . . . .	30
1.1 Une première définition . . . . .	30
1.2 Les liens avec d'autres disciplines . . . . .	32
2 Les concepts de l'approche . . . . .	34
2.1 Quelques définitions . . . . .	34
2.2 Exemples . . . . .	38
3 Discussion de l'approche présentée . . . . .	41
3.1 Pourquoi une approche multi-modèles pour la supervision . . . . .	41
3.2 Les conditions de passage entre vues depuis des modèles . . . . .	51
3.3 Comparaison avec l'approche de "l'ordonnancement causal" . . . . .	52
<b>Chapitre 3 : Le raisonnement qualitatif. Une étude de cas.</b>	<b>55</b>
1 Les différents vocabulaires employés . . . . .	56
2 Modélisation de la dynamique d'un système physique . . . . .	58
2.1 Introduction . . . . .	58
2.2 Fonctions de Transfert Qualitatives . . . . .	59
3 Un exemple simple de modélisation . . . . .	65
4 Les limites de la modélisation proposée . . . . .	71
5 Techniques de simulation . . . . .	73
5.1 Les objectifs d'un algorithme simple de gestion d'épisodes . . . . .	73
5.2 Structures de données . . . . .	74
5.3 Un algorithme simple de gestion d'épisodes pour la simulation . . . . .	76
5.4 Les limites de ce type d'algorithme . . . . .	84
6 Techniques d'interprétation . . . . .	85
6.1 Création des nœuds d'une vue obtenue par interprétation . . . . .	86
6.2 Création des arcs d'une vue obtenue par interprétation . . . . .	88
7 Résumé des choix techniques de l'implantation . . . . .	88
<b>Chapitre 4 : Modélisation Qualitative et Automatique</b>	<b>91</b>
1 L'Automatique Qualitative . . . . .	92
1.1 Les motivations d'une approche qualitative en Automatique . . . . .	92
1.2 Des techniques de modélisation et leurs limites . . . . .	95
2 Application à l'aide à la conduite d'un procédé continu . . . . .	99
2.1 Modélisation du procédé étudié . . . . .	99
2.2 Expérimentations . . . . .	99
<b>Chapitre 5 : Méthodes pour la supervision en ligne de procédés conti-</b>	
<b>nus</b>	<b>103</b>

---

1	Introduction . . . . .	104
2	L'architecture du système de supervision . . . . .	106
2.1	Quels types d'architecture pour des systèmes d'IA en ligne ? . . . . .	106
2.2	Les principes généraux de l'architecture du système implanté . . . . .	109
3	Techniques de maintien de cohérence d'une vue au cours du temps . . . . .	112
3.1	Maintenance de vérité temporelle d'une vue . . . . .	113
3.2	Comparaison entre évolutions de variables prédites et mesurées . . . . .	117
4	Techniques de contrôle d'exécution des tâches . . . . .	121
4.1	Mesure de la performance d'une prédiction . . . . .	121
4.2	Compromis entre coût de simulation et qualité de résultats . . . . .	122
4.3	Interruption de la tâche de prédiction . . . . .	124
	<b>Conclusion</b> . . . . .	<b>127</b>
1	Traduction de données quantitatives en données qualitatives pour l'aide à la supervision . . . . .	127
2	Implantation d'un système d'aide à la supervision . . . . .	129
3	Un bilan de notre travail . . . . .	131
3.1	Du point de vue de l'automatique . . . . .	131
3.2	Du point de vue de l'IA . . . . .	131
	<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>133</b>
	<b>Annexe A : Remarques sur les FTQs</b> . . . . .	<b>139</b>
1	L'utilisation du principe de superposition . . . . .	139
2	Résultats . . . . .	142
	<b>Annexe B : Une trace de simulation</b> . . . . .	<b>145</b>



---

---

# Liste des Figures

---

---

1.1	La physique qualitative vue par B. Kuipers. . . . .	9
1.2	Quelques contraintes qualitatives. . . . .	12
1.3	Filtrage de Waltz sur les n-uplets solutions de contraintes et création de l'ensemble des affectations cohérentes de valeurs aux dérivées des variables. . . . .	15
1.4	Deux modélisations d'un tuyau qui devraient permettre de faire apparaître l'effet d'une perturbation de pression en entrée du tuyau. . . . .	20
2.1	Deux ensembles de variables décrivant des systèmes dynamiques. . . . .	38
2.2	Les modèles complets des deux systèmes, qui détaillent les influences causales entre les variables. . . . .	39
2.3	Trois décompositions en épisodes d'une même évolution. . . . .	40
2.4	Un exemple de vues. . . . .	42
2.5	Techniques pour le suivi d'évolution d'un système physique dans le cadre d'un modèle qualitatif unique. . . . .	44
2.6	Décomposition séquentielle en épisodes d'une évolution mesurée. . . . .	45
2.7	Diverses décompositions en épisodes d'un signal lorsque le vocabulaire de description choisi ne définit pas une "base". . . . .	47
2.8	Le suivi avec une approche multi-modèles. . . . .	49
2.9	Une illustration de la notion de Résolution Qualitative. . . . .	53
3.1	Episodes et influences. . . . .	60
3.2	Structure d'une FTQ. . . . .	63

3.3	Syntaxe d'implantation d'une Fonction de Transfert Qualitative.....	64
3.4	Un exemple simple de système dynamique, un circuit RC. ....	65
3.5	Deux influences possibles sur $Q$ . ....	66
3.6	Deux comportements dynamiques possibles. ....	68
3.7	Des réponses à une entrée non périodique. ....	69
3.8	Un exemple illustrant l'utilisation des structures de données par l'algorithme. ....	75
3.9	Structures de données. ....	76
3.10	Un exemple de l'ordre de calcul d'épisodes. ....	81
3.11	Calcul de courbure discrète avec une "longueur" de demi-tangente égale à 5. ....	87
4.1	Deux modèles "causaux" d'une variable régulée. ....	96
4.2	Une représentation qualitative "acausale" de variable régulée. ....	96
4.3	L'élimination de la boucle dans un schéma fonctionnel. ....	97
4.4	Une représentation "acausale" d'un équilibre entre deux variables. ....	98
4.5	Schéma simpliste du procédé étudié. ....	100
4.6	Le modèle qualitatif du procédé. ....	101
5.1	L'architecture du système en termes de tâches. ....	109
5.2	La nature des relations entre épisodes dans le temps. ....	114
5.3	Un exemple de répartition du coût de simulation en fonction du domaine temporel simulé. ....	122
5.4	L'influence instantanée de la granularité sur le coût de la simulation. . .	123
5.5	L'influence de la granularité sur le coût de la simulation en moyenne. . .	124
A.1	La décomposition d'un épisode faite par les FTQs . . . . .	140
A.2	Les réponses aux composantes d'un épisode . . . . .	141
A.3	Temps d'exécution de simulations suivant la nature des FTQs . . . . .	142
A.4	Nombre d'appels aux FTQs suivant leur nature . . . . .	143
B.1	Le modèle pris comme exemple pour donner une trace de simulation . . .	146
B.2	Historiques et agendas des variables V1 et V2 . . . . .	149

---

---

# Introduction

---

---

## 1 Présentation du problème

Dans cette thèse, nous proposons des outils informatiques qui permettent d'implanter des modèles qualitatifs simples de systèmes physiques dans le but de leur supervision. Nous étudions les relations qui peuvent exister entre les versions quantitatives et qualitatives d'un même modèle d'un système physique et comment les exploiter pour combiner les avantages de ces deux types de représentation. Le travail présenté porte plus particulièrement sur le problème de la modélisation qualitative des procédés industriels continus, avec le développement d'un système informatique d'aide à la conduite pour les opérateurs.

L'adjectif "qualitatif" a souvent un petit côté péjoratif quand il est employé dans le domaine des sciences exactes. Le physicien anglais Rutherford, cité par R. Thom dans [Tho77], n'affirmait-il pas : "Qualitative is nothing but poor quantitative". Certes, seule la quantification numérique des grandeurs physiques auxquelles on s'intéresse permet de construire des modèles donnant des résultats précis.

Mais construire et utiliser un modèle quantitatif demande au préalable une connaissance **qualitative** du phénomène modélisé. C'est cette connaissance qui permet la construction du modèle dans un but donné, en guidant par exemple le choix des variables intéressantes. Elle guide aussi l'interprétation des résultats, et d'éventuelles adaptations du modèle lorsqu'il est mis en défaut.

Il est par exemple courant d'éliminer des solutions au cours d'un calcul parce qu'on sait qu'elles n'ont pas de sens (par exemple des temps négatifs en mécanique du point).



Mais on peut aussi faire des approximations pour simplifier des systèmes d'équations et les résoudre formellement, comme pour les calculs de PH en chimie. Enfin, le critère de comparaison entre résultats calculés et mesurés peut inclure plus ou moins d'arbitraire : un bon accord entre prédiction et mesure peut être mieux indiqué par l'allure "semblable" de courbes que par un test numérique strict. Le concepteur d'un modèle a donc en tête une représentation qualitative du phénomène modélisé qui lui permet de gérer efficacement l'approximation qu'est un modèle mathématique.

Mais lorsqu'on utilise une modélisation d'un système physique sans avoir conçu soi-même le modèle, il est plus difficile d'avoir une bonne représentation qualitative de ce qu'un modèle mathématique de ce système représente. Les progrès de l'informatique permettent l'utilisation de modèles quantitatifs souvent très complexes sans avoir aucune idée de la forme du modèle qui est codé en machine. Il faut se contenter de résultats numériques bruts, sous des formes plus ou moins élaborées qui ne changent rien au problème de fond. Dans ce cas, une connaissance simplement qualitative du phénomène modélisé fait cruellement défaut.

Prenons l'exemple de l'automatisation des procédés continus, comme les papeteries, les centrales de production d'énergie, les raffineries, etc. Dans la grande majorité des cas, l'automatisation ne peut pas être complète ; des opérateurs humains doivent superviser les équipements de contrôle-commande, parce que les hypothèses de modélisation sont trop restrictives. Il est souvent difficile de trouver une approximation unique valable sur toute la plage de fonctionnement du système modélisé. Il faut alors approximer son comportement par plusieurs modèles. De plus, l'efficacité de l'automatisation dépend de manière cruciale de la validité des hypothèses simplificatrices faites pour permettre une modélisation. Des pannes importantes, qui changent la structure du système modélisé, peuvent rendre le modèle caduque. Dans tous ces cas, les opérateurs humains doivent se rendre compte du problème et être capables de prendre la relève des automatismes, en prenant des décisions qui permettent de garder le contrôle du système surveillé.

Assurer la tâche de supervision d'un système physique automatisé n'est pas simple, essentiellement pour les raisons suivantes :

- La personne qui supervise un système automatisé n'est pas celle qui l'a conçu. Elle n'a donc pas forcément la même compréhension des phénomènes mis en jeu que celle qui a permis au concepteur d'approximer le système physique par un modèle mathématique numérique. Cette différence de point de vue peut être à l'origine d'une mauvaise interprétation du comportement des automatismes et de prises de décisions erronées. Ce problème est maintenant reconnu comme la

cause principale des accidents de conduite, comme celui de la centrale nucléaire de Three Miles Island (voir [Nel82]), mais aussi des erreurs de pilotage sur les avions de ligne (voir [Bai83], [CN85]).

- Le fonctionnement en “boucle fermée” d’un système automatisé rend son comportement difficile à analyser. Effectivement, toute commande a pour objectif de modifier le comportement du système vu par un observateur, pour le ramener à un comportement nominal. Il est donc très difficile pour l’observateur de déduire un comportement en boucle ouverte (celui du système physique seul) de celui en boucle fermée qui est observé (celui du système physique soumis à sa commande). En bref, c’est le comportement global du système physique et de son asservissement qui doit être surveillé.

Nous soutenons ici la thèse suivant laquelle ces problèmes peuvent trouver une solution grâce à la création d’outils de modélisation qualitative de systèmes physiques. Ces outils doivent permettre d’explicitier et d’exploiter l’information “cachée” présente dans un modèle quantitatif. Ils permettront ainsi d’aider à combler le vide entre la compréhension qualitative que l’on a des phénomènes physiques et les données numériques calculées grâce à un modèle quantitatif.

Plus précisément, la thèse que nous défendons est qu’il faut combiner les avantages des deux types de représentation. Une représentation quantitative et continue d’un système physique, construite à partir d’outils de modélisation numérique, permet de prédire de façon précise le comportement du système modélisé. D’un autre côté, une représentation qualitative et donc discrète permet de réduire l’information disponible sur l’évolution du système aux seules données “pertinentes”, c’est-à-dire adaptées à des types particuliers de déduction logique, comme le diagnostic, le filtrage d’alarmes, etc. Il faut donc définir un cadre de traduction des données quantitatives obtenues depuis les représentations continues en données qualitatives exprimées dans des modèles discrets.

Ce but est ambitieux car il implique une démarche de modélisation unique, depuis les connaissances de “bon sens” qui permettent d’expliquer qualitativement le comportement d’un système jusqu’aux paramètres numériques qui permettent de prédire avec précision ce comportement. Mais nous ne prétendons appliquer cette démarche qu’à des systèmes d’aide à la supervision. Et nous n’avons fait que l’aborder partiellement, en adoptant des hypothèses simplificatrices qui ont permis le développement d’un système informatique opérationnel.

## 2 La contribution de notre travail : un système d'aide à la supervision des procédés continus

### 2.1 L'application

Notre travail a pour objectif le développement d'un système informatique d'aide à la supervision des procédés continus.

Le but d'un tel système n'est pas de commander directement le procédé étudié, mais d'expliquer son comportement et de donner des conseils aux opérateurs. Le cœur du système est constitué d'un modèle du procédé. Ce modèle définit une norme de comportements qui sert de référence à la supervision. Il permet de prédire l'évolution du procédé et de l'expliquer en termes de relations causales entre les grandeurs physiques qui sont particulièrement surveillées par les opérateurs. Un premier intérêt du système est donc d'ordre pédagogique. Il doit permettre aux opérateurs d'acquérir et de garder une bonne connaissance qualitative des phénomènes qui gouvernent le comportement du procédé (plus précisément, de la manière dont ces phénomènes sont approximés par le modèle utilisé par le système de contrôle-commande). La capacité de prédiction du système est aussi utilisée pour anticiper d'éventuels problèmes : lorsqu'une perturbation importante ne peut pas être amortie par les équipements de contrôle-commande, des conseils d'action peuvent être donnés aux opérateurs qui indiquent des stratégies de reprise en main du procédé (ces techniques ne seront pas présentées dans ce rapport, voir [Bea89]). Enfin, par comparaison entre comportements prédits et observés, le système peut vérifier la validité du modèle. Lorsqu'un comportement observé n'est pas compréhensible d'après le modèle, le système peut préciser à l'opérateur dans quelle partie du procédé se pose le problème, ce qui revient souvent à le résoudre en grande partie.

Le système de supervision développé implante donc d'une certaine manière un "opérateur automatique", sans toutefois la capacité d'agir directement sur le procédé surveillé. Bien que la sécurité des procédés continus soit généralement assurée par des automatismes simples et fiables, la plupart des accidents de conduite graves sont dus à des erreurs humaines. Grâce à ses conseils, un système de supervision peut éviter des erreurs de jugement graves des opérateurs qui pourraient les conduire à prendre des mesures dangereuses). Mais l'intérêt essentiel du système est plus d'ordre économique, car on peut espérer éviter de longs et coûteux arrêts automatiques du procédé causés par une mauvaise conduite.

Les techniques de modélisation qualitatives présentées ont été utilisées pour constru-

ire des modèles de plusieurs procédés. Leur comportement dans certaines conditions a été simulé et donne un bon accord avec les mesures. Les outils développés ont donc fait la preuve d'une certaine généralité, du point de vue de la simulation. Par contre, le système complet de supervision est encore en cours d'implantation sur site. L'aide réelle apportée à l'opérateur n'a donc pas pu être évaluée. De plus, elle dépend beaucoup des qualités ergonomiques du système de supervision, ce qui sort du cadre de notre travail.

## **2.2 L'approche : l'interprétation qualitative de résultats numériques**

L'implantation d'un système opérationnel a permis de tirer des enseignements généraux :

- Nous avons défini une démarche de modélisation des systèmes physiques par des graphes dont les nœuds figurent les grandeurs auxquelles on s'intéresse et les arcs les relations de causalité entre ces grandeurs. Les nœuds sont des fonctions du temps qui représentent l'évolution des grandeurs physiques à l'aide de plusieurs vocabulaires, aussi bien quantitatifs que qualitatifs. Avec l'aide de techniques de simulation utilisant un vocabulaire quantitatif, il est possible de prédire l'évolution du système modélisé. Des techniques d'interprétation traduisent les résultats obtenus dans les vocabulaires qualitatifs. Elles permettent d'obtenir des points de vue de l'évolution du système adaptés à des tâches de natures différentes. Cette démarche de modélisation et de programmation est décrite dans les articles [Cal87] et [PCG87].
- Nous proposons par ailleurs un type d'architecture de système informatique de supervision qui permet de satisfaire des contraintes temporelles. Il est en effet impératif que le système soit capable de fournir à temps des explications et des conseils d'actions à l'opérateur, c'est-à-dire suffisamment vite pour qu'il puisse les utiliser et prendre des décisions adéquates. L'architecture proposée gère des "tâches" qui sont des ensembles d'algorithmes associés au traitement d'un problème particulier. A l'intérieur d'une tâche, des outils de contrôle établissent un compromis entre la rapidité de l'exécution et la "qualité" des résultats fournis. Des outils de maintenance de cohérence des données du système permettent de pallier les faiblesses de modélisation grâce à un recalage périodique par rapport aux données mesurées sur le procédé.

### 3 L'organisation du rapport

Dans le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique des travaux en Intelligence Artificielle (IA) qui proposent des outils pour une modélisation qualitative de systèmes physiques. Cette étude permet de positionner le problème du “qualitatif” et de mettre en évidence les nombreuses difficultés techniques rencontrées.

Nous définissons les concepts importants de notre approche de modélisation dans le second chapitre. Les raisons des choix techniques effectués sont discutées, et l'approche générale est comparée à des approches similaires dans d'autres domaines.

Le troisième chapitre décrit les outils informatiques développés pour la modélisation qualitative de procédés continus. Un algorithme simple de simulation est présenté ainsi que des techniques de traduction dans une forme qualitative des résultats obtenus. Cette présentation est illustrée par un exemple simple.

Les deuxième et troisième chapitres présentent une démarche de modélisation et des outils informatiques qui peuvent avoir un intérêt en dehors de l'application aux procédés continus. Le quatrième chapitre fait la transition avec l'application proprement dite. Il détaille l'intérêt de l'emploi de modèles qualitatifs en automatique et décrit les techniques de modélisation spécifiques aux procédés continus.

Finalement, l'architecture du système de supervision est présentée dans le cinquième chapitre. Nous y donnons les principes des algorithmes qui assurent le maintien de cohérence des données au cours du temps. La décomposition du système en tâches est détaillée, ainsi que les outils de contrôle temporel de l'une d'entre elles.

#### *Guide de Lecture*

*En tête de chaque chapitre figure un “guide de lecture”. Nous y donnons des indications sur les sections qui peuvent être ignorées, suivant le mode de lecture choisi. Ainsi le lecteur voulant simplement parcourir la thèse pourra suivre les indications données avec l'étiquette “lecture rapide”. En “première lecture”, il est déjà possible de se faire une idée complète du travail présenté dans ce rapport.*

---

---

# Chapitre 1

## Le raisonnement qualitatif en IA

---

---

*Nous présentons dans ce chapitre une rapide bibliographie de travaux qui peuvent être placés dans le cadre du “raisonnement qualitatif”. Nous plaçons sous le terme de “raisonnement qualitatif” tout ensemble de techniques informatiques permettant d’obtenir des explications utilisant un vocabulaire symbolique et fini sur l’évolution d’un système physique. Ces techniques peuvent inclure un système d’inférence permettant de simuler l’évolution du système physique ; mais elles peuvent tout aussi bien se limiter à des outils de traduction de données quantitatives, obtenues par des mesures ou par l’emploi de techniques classiques de simulation. Cette présentation distingue deux grandes classes de travaux.*

*Dans une première partie, nous présentons la plus importante par le nombre de publications de ces deux classes, qui s’appelle la “Physique Qualitative”. La Physique Qualitative propose des techniques de modélisation et un calcul (qui est appelé “calcul qualitatif”) permettant de décrire par des symboles les comportements possibles d’un système physique modélisé.*

*La deuxième partie présente des travaux qui ne sont pas encore regroupés sous une dénomination précise. Ils admettent tous comme point commun de proposer des techniques d’interprétation de données quantitatives obtenues par simulation.*

*Guide de Lecture*

*En lecture rapide, les sections 1.3 et 1.4 permettent de se faire une idée des techniques développées en IA pour mécaniser un raisonnement qualitatif.*

# 1 La Physique Qualitative

## 1.1 Les motivations initiales

La Physique Qualitative est née du désir de combler à la fois certains manques des techniques quantitatives classiques et ceux des techniques de l'Intelligence Artificielle des années 1970.

Les reproches faits aux modélisations quantitatives classiques utilisées en physique ou en automatique ne concernent pas les performances de ces outils. Ils permettent en effet de créer des modèles qui ont un caractère prédictif, utilisés en Physique pour **décrire** le plus fidèlement possible le comportement d'un phénomène, ou en Automatique pour **contrôler** un système physique. Par contre, les implantations informatiques de modèles quantitatifs font encore souvent l'économie de techniques spécifiques de mise en forme des résultats, qui permettent pourtant de donner des explications adaptées aux besoins de l'utilisateur. Un physicien peut probablement interpréter sans problèmes les données numériques fournies par une simulation, lorsqu'elles ne sont pas en trop grand nombre. Mais il existe aussi des cas d'utilisation de modèles quantitatifs où l'utilisateur ne peut pas, ou ne veut pas, se contenter de résultats bruts.

Par exemple, si l'utilisateur du système informatique n'est pas le concepteur des modèles qui sont codés, il peut lui être difficile de comprendre les relations qui lient les données produites entre elles. Par ailleurs, dans toutes les applications qui demandent une compréhension en temps réel des résultats obtenus à partir d'un modèle, l'utilisateur n'a pas le temps de synthétiser lui-même l'information numérique produite par l'ordinateur.

L'apport majeur des techniques informatiques développées en IA est de permettre de coder des connaissances difficilement formalisables dans un cadre général. Ainsi, les systèmes "experts" permettent d'implanter dans un ordinateur des connaissances associatives qui représentent généralement des **savoir-faire** liés à des domaines bien particuliers. On peut citer en exemple le savoir-faire du diagnostic en médecine, ou celui de l'élaboration de gammes d'usinage en mécanique. Mais pour certains domaines d'application, il existe des modèles au moins partiels qui permettent de formaliser de manière économique<sup>1</sup> le problème abordé. Dans ce cas, il est délicat de faire la distinction entre les connaissances qui relèvent d'un simple savoir-faire et celles qui

---

<sup>1</sup>C'est l'économie de modélisation qui permet, après la qualité des résultats obtenus, de départager des outils de modélisation. On peut toujours imaginer modéliser combinatoirement grâce à des règles de production l'ensemble des comportements possibles d'un système physique. Cela ne présente pas d'intérêt si cet ensemble est aussi bien représenté par une simple équation.

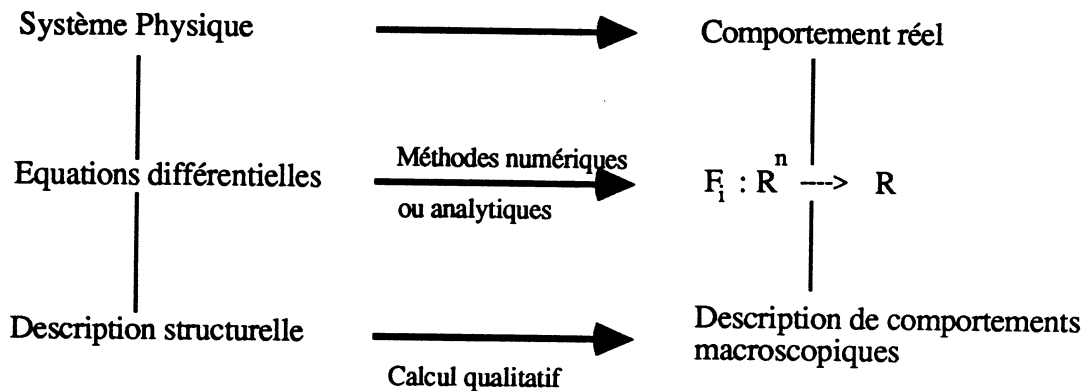


Figure 1.1 : La physique qualitative vue par B. Kuipers.

traduisent un réel savoir. On peut admettre que les connaissances d'un savoir-faire sont moins générales que celles d'un savoir, c'est-à-dire ont un domaine de validité plus restreint, car elles codent des techniques qui permettent l'exécution d'une tâche bien précise.

Très vite, les chercheurs en IA ont essayé de proposer des techniques permettant de coder de réels savoirs, même limités à des domaines très simples. La Physique a alors fourni un cadre d'étude privilégié. Dès 1977, C. Rieger publie des résultats concernant un système de raisonnement sur les mécanismes de cause à effet qu'il est possible d'identifier dans le fonctionnement de systèmes physiques conçus par l'homme (voir [RG77]). En 1979, P. Hayes propose de mécaniser un raisonnement de sens commun appliqué à des systèmes physiques réels (le "Naïve Physics Manifesto" [Hay79]). Pour cela, il suggère de construire des modèles suffisamment élaborés, c'est-à-dire introduisant un nombre de concepts suffisants pour décrire les systèmes physiques modélisés de manière assez précise. Il s'agit de créer des outils pour une modélisation du monde qui reste "naïve" et donc "intelligible" mais qui ait d'autre part un vrai caractère prédictif.

## 1.2 Les objectifs

Le but de la physique qualitative est de développer de nouveaux outils de modélisation et de calcul permettant de prédire et d'expliquer les comportements possibles d'un système physique lorsque suffisamment de conditions initiales sont connues. La figure 1.1 (tirée de [Kui85]) résume bien ce point de vue : la physique qualitative propose de nouveaux outils de description structurelle d'un système physique. Ces outils ser-



vent à construire des modèles d'une manière plus intuitive et plus concrète que les mathématiques du continu. Par exemple, on veut manipuler des objets qui aient une existence réelle, comme les composants du système physique (dans le cas d'un procédé industriel, des tuyaux, des vannes, etc) et ne pas se limiter à une description abstraite en termes de variables. Le modèle doit traduire d'une certaine manière une "structure" du système physique étudié. De plus, la Physique Qualitative se donne comme objectif de définir un calcul général qui permette, étant donné un modèle quelconque, de simuler le comportement dynamique du système modélisé. Les résultats d'une simulation doivent être facilement compréhensibles. Les évolutions des concepts qui caractérisent le système sont décrites à l'aide d'un vocabulaire fini et très simple.

Bien que les techniques et surtout le vocabulaire employé divergent beaucoup suivant les travaux, nous allons essayer de présenter dans les paragraphes qui suivent les différentes modélisations de la physique qualitative et les grands principes du calcul qualitatif<sup>2</sup>. Un dernier paragraphe fera le point sur les nombreux problèmes non résolus.

### 1.3 Les modélisations proposées en Physique Qualitative

Nous présentons dans cette section les outils de modélisation utilisés en Physique Qualitative. Il faut distinguer deux classes d'outils de modélisation :

- A un premier niveau, des outils de base sont utilisés pour définir un calcul qualitatif. Ils comprennent des variables qui représentent les grandeurs importantes du système modélisé, ainsi qu'un vocabulaire fini qui sert à quantifier les variables. Un calcul peut alors être défini par la donnée d'opérations portant sur les éléments du vocabulaire.
- A un deuxième niveau, des outils de description plus "structurelle" des systèmes physiques sont proposés. Ils permettent de définir des entités de description plus complexes que de simples variables. Ces entités peuvent être des composants associés à des fonctions lorsque le système étudié est conçu par l'homme. Mais elles peuvent aussi décrire des "processus" physiques particuliers. Un modèle est construit par assemblage de ces entités.

---

<sup>2</sup>Pour en donner une vue unifiée, certaines particularités de telle ou telle approche ont été volontairement gommées.

### 1.3.1 Les outils de base

L'élément atomique de tous les travaux en Physique Qualitative est la variable qualitative, qui permet de représenter les grandeurs importantes d'un système physique. L'amplitude de variation de ces variables est quantifiée dans un ensemble de symboles décrivant des valeurs remarquables de la variable. Cet ensemble peut être extrêmement simple, comme  $\{-1, 0, 1\}$  pour décrire deux zones temporelles qualitatives séparées par une valeur particulière (dans ce cas la représentation confond points et intervalles). Par exemple, 0 peut figurer le point d'ébullition de l'eau,  $-1$  les phases solide et liquide, et 1 la phase vapeur. Il s'agit surtout d'un vocabulaire de signe de perturbations,  $-1$  et 1 représentant des écarts de la valeur réelle de la variable par rapport à une valeur nominale, ou d'équilibre, qui est figurée par 0.

L'ensemble  $\{-1, 0, 1\}$  est utilisé de manière générale pour quantifier les dérivées des variables par rapport au temps. Ce vocabulaire peut alors aussi s'exprimer par  $\{\text{décroissant}, \text{constant}, \text{croissant}\}$ . J. de Kleer utilise aussi cet ensemble pour décrire les évolutions des variables par leur signe (voir [dKB83],[dKB84b]). Des vocabulaires plus élaborés sont utilisés par B. Kuipers et K. Forbus (dans [Kui84], [Kui85], [Kui86], [For84]) : à chaque variable est associé un ensemble ordonné de valeurs remarquables, appelé *espace quantité*, incluant  $\{-\infty, 0, +\infty\}$ .

Un *état qualitatif* est alors défini pour la variable comme le couple (*valeur<sub>variable</sub>*, *valeur<sub>dérivée</sub>*) où *valeur<sub>variable</sub>* est un symbole de l'espace quantité ou un intervalle borné par deux symboles se succédant, et *valeur<sub>dérivée</sub>* un élément de  $\{-1, 0, 1\}$ . De nouvelles valeurs remarquables des variables peuvent être calculées par des simulations et elles sont alors insérées dans l'espace quantité. Un état global d'un système physique est spécifié par un vecteur qualitatif donnant les états qualitatifs de toutes les variables décrivant le système à un instant donné.

Il faut souligner que la représentation du temps qui est adoptée n'est pas numérique. Une évolution de variable en fonction du temps n'est définie que par une chronologie d'événements, c'est-à-dire une suite de changements de l'état qualitatif de la variable. Le temps qui sépare deux états consécutifs n'est pas quantifié. Il correspond en fait à un pas de l'algorithme de simulation événementielle qui est défini plus loin.

Le calcul qualitatif est défini par des contraintes entre les dérivées des variables par rapport au temps, qui ne les autorisent à prendre simultanément qu'un sous-ensemble de valeurs dans  $\{-1, 0, 1\}$ . Ces contraintes peuvent être n-aires, mais sont plus souvent binaires, reflétant les influences causales de variable à variable. La différence essentielle avec les équations traditionnelles de la physique est qu'il est possible de définir les contraintes exhaustivement par des tables. La plupart des contraintes utilisées cor-

Contrainte "plus(x,y,z)" :  
( $z = x + y$ )

	$x'$			
$y'$		+	0	-
	+	+	+	?
	0	+	0	-
	-	?	-	-

Contrainte "multiple(x,y,z)" :  
( $z = x * y$ )

(dans le cas où  $x < 0$  et  $y > 0$ ; les tables de cette contrainte sont obtenues depuis l'égalité  $(xy)' = x'y + xy'$ )

	$x'$			
$y'$		+	0	-
	+	?	-	-
	0	+	0	-
	-	+	+	?

+, 0 et - représentent les signes des dérivées des variables par rapport au temps. Les tables donnent le signe de la dérivée de z en fonction de ceux des dérivées de x et y. L'élément indéterminé ? n'a pas été représenté en entrée des tables ; c'est l'élément absorbant pour toutes les lois du calcul qualitatif.

Figure 1.2 : Quelques contraintes qualitatives.

respondent à des opérateurs très simples de l'arithmétique usuelle. La figure 1.2 donne quelque-unes de ces tables.

A un bas niveau, un système physique est donc modélisé par un ensemble de variables liées par plusieurs ensembles de contraintes. Un changement des contraintes qui lient les variables peut intervenir lors du passage d'une ou de plusieurs variables par une valeur remarquable de leur espace quantité. Cette modélisation "par morceaux" permet en théorie de pallier la très grande abstraction et donc le manque de précision des outils de modélisation utilisés.

### 1.3.2 Les outils de description structurelle

A un niveau de modélisation plus élevé, des entités regroupent des sous-ensembles de variables du modèle, avec les contraintes qui les lient. Ce sont ces entités qui sont utilisées pour modéliser un système physique. La démarche de modélisation est donc d'une certaine manière hiérarchique : on s'intéresse d'abord à décrire le système en termes d'entités puis les entités en termes de variables.

Un premier type d'entité que l'on peut citer est le "processus" physique, utilisé par K. Forbus (voir [For84]). Il définit le processus comme mode d'expression de la

causalité. Si, par exemple, une casserole contenant un liquide est posée sur une source chaude, le phénomène d'échauffement peut être décrit comme un processus qui fait interagir causalement un certain nombre de paramètres physiques, ici les températures de la source chaude et du liquide. Un processus est un objet atemporel qui s'instancie dans le temps lorsque les préconditions qui lui sont attachées sont satisfaites (la température de la source doit être plus élevée que celle du liquide dans l'exemple précédent). Il décrit alors le phénomène physique grâce à des contraintes causales décrivant l'influence du processus sur les variables (influence négative sur la source qui perd de la chaleur, positive sur le liquide qui en gagne). Cette approche peut donc être qualifiée de "descriptive", parce qu'elle postule l'existence de phénomènes causaux, locaux<sup>3</sup> et connus a priori.

J. de Kleer prétend quant à lui (dans [dK84]) modéliser de manière indépendante les "composants" élémentaires constituant le système physique. Le concept de composant n'est pas clairement défini, et dépend fortement du niveau de modélisation choisi. En pratique, la notion de composant est attachée à l'idée de fonction : on suppose qu'un système conçu pour réaliser une fonction donnée peut être réalisé par assemblage d'équipements participant chacun à sa réalisation. Une fonction globale peut donc être décomposée en sous-fonctions, réalisées par les composants. Un composant est décrit de manière indépendante de son utilisation par un ensemble de variables liées par des contraintes. Ceci laisse donc la porte ouverte à une certaine automatisation du processus de modélisation d'un système physique vu comme une assemblée de composants.

## 1.4 Techniques de calcul qualitatif

Le calcul qualitatif peut être vu comme un calcul de propagation causale d'évolutions des variables d'entrées du modèle sur les autres variables du modèle. Il peut être séparé en deux parties :

- Le calcul des petites variations autour de leurs points d'équilibre pour toutes les variables du modèle, qui soient compatibles avec les contraintes, les variations des variables d'entrée étant prises comme conditions initiales. Ces variations sont données par la valeur dans  $\{-1, 0, +1\}$  des dérivées par rapport au temps des variables. En général, il n'est pas possible d'obtenir un ensemble unique de variations autour de l'équilibre pour toutes les variables du modèle, mais seulement plusieurs ensembles de variations compatibles entre elles.

---

<sup>3</sup>Plusieurs processus peuvent néanmoins partager des variables.

- L'intégration des variations des variables en calculant les valeurs atteintes par toutes les variables dans leur espace quantité.

Nous allons brièvement détailler ces techniques et leurs alternatives les plus récentes.

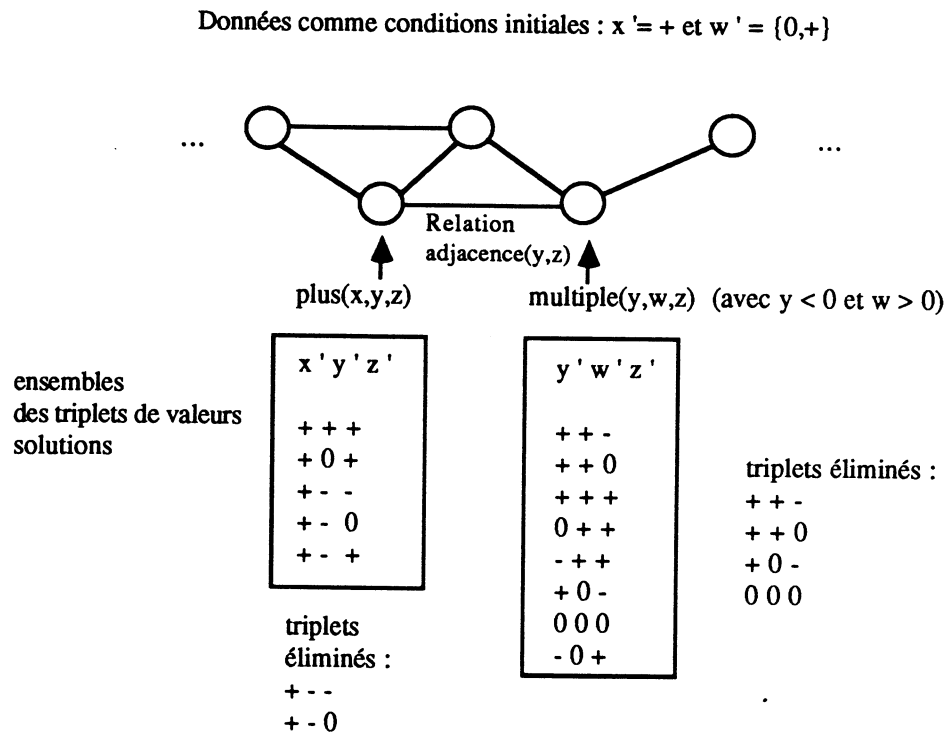
#### 1.4.1 Propagation de contraintes sur des variations autour de l'équilibre

Le problème posé est de trouver tous les ensembles de valeurs qualitatives compatibles des dérivées des variables du modèle, étant donné un certain nombre de valeurs représentant les variations des variables aux entrées du système. La technique la plus largement employée est celle de la propagation de contraintes sur des variables étiquetées par des ensembles de valeurs possibles : les valeurs des variables déjà déterminées sont substituées dans toutes les contraintes dans lesquelles elles apparaissent ; de nouvelles valeurs sont déduites pour d'autres variables, ou des contradictions peuvent être rencontrées (pour plus de détails sur la propagation de contraintes, voir par exemple [SJ80], ou [Dav87]).

Un ensemble de contraintes sur des variables définit un système linéaire, chaque contrainte équivalent à une équation. La technique de résolution par propagation de contraintes revient à une résolution du système linéaire par simple application de substitutions de valeurs aux variables dans les équations, en partant des valeurs des variables aux entrées du système. Mais cette technique élémentaire de substitution ne permet pas de résoudre des systèmes linéaires non triangulaires. Aucune technique n'est en effet prévue pour relancer la propagation de contraintes lorsqu'une valeur de variable ne peut être calculée par simple substitution, soit parce que le système n'est pas triangulaire, soit parce qu'il existe une indétermination due à un manque de conditions initiales. Des méthodes de génération d'hypothèses sont donc utilisées, qui permettent de gérer des ensembles de valeurs possibles pour les variables indéterminées. Ces valeurs sont compatibles avec les contraintes. La nécessité de gestion en parallèle d'hypothèses concurrentes conduit à l'élaboration de systèmes de maintenance de la cohérence des données qui sont appelés A.T.M.S. (pour Assumption-based Truth Maintenance Systems ; voir [dK84], [dK86]).

Les techniques employées pour la propagation de contraintes sont du type du "filtrage de Waltz". Dans l'algorithme QSIM de Kuipers [Kui86], le filtrage se fait à deux niveaux successifs :

1. Pour chaque contrainte n-aire, créer l'ensemble des n-uplets candidats à partir des ensembles de valeurs qualitatives admises pour les dérivées des variables (nous verrons au paragraphe suivant comment ces ensembles sont déterminés). Parmi ces n-uplets, ne retenir que ceux qui satisfont la contrainte.



Il y a donc quatre vecteurs des dérivées de  $(x,y,w,z)$  compatibles avec les deux contraintes :  $(+,+,+,+)$   $(+,0,+,+)$   $(+,-,+,+)$   $(+,-,0,+)$

Figure 1.3 : Filtrage de Waltz sur les n-uplets solutions de contraintes et création de l'ensemble des affectations cohérentes de valeurs aux dérivées des variables.

2. Considérons le graphe dont les nœuds sont les contraintes et les arcs traduisent la relation d'adjacence entre contraintes. Deux contraintes sont adjacentes si elles partagent au moins une variable. Appliquer un filtrage de Waltz, c'est rendre ce graphe 2-consistant : il faut pour cela supprimer sur toutes les contraintes les n-uplets solutions pour lesquels il n'est pas possible de trouver un n-uplet compatible sur une des contraintes adjacentes (deux n-uplets de valeurs de variables sont compatibles si les variables qu'ils admettent en commun ont les même valeurs). On obtient alors facilement l'ensemble des interprétations possibles de l'évolution du système, par parcours combinatoire de l'ensemble des n-uplets solutions compatibles deux à deux. Ce traitement d'énumération de toutes les affectations de valeurs cohérentes à l'ensemble des variables figurant dans les contraintes permet d'éliminer les inconsistances qui auraient échappé au filtrage de Waltz.

La figure 1.3 donne un exemple de ce traitement pour deux nœuds d'un graphe

de contraintes, qui sont  $\text{plus}(x,y,z)$ <sup>4</sup> et  $\text{multiple}(y,w,z)$ <sup>5</sup>. On peut noter que pour les variables indéterminées, comme  $y$  dans  $\text{plus}(x,y,z)$  et  $w$  dans  $\text{multiple}(y,w,z)$ , toutes les évolutions possibles de ces variables sont envisagées. Les triplets  $(+, -, 0)$  et  $(+, -, -)$  sont éliminés des triplets solutions de  $\text{plus}(x,y,z)$ , parce qu'ils ne sont pas compatibles avec l'ensemble des triplets solutions de  $\text{multiple}(x,y,z)$ .

Il faut remarquer que les mécanismes de gestion d'hypothèses comme les ATMS permettent de traiter combinatoirement des ambiguïtés qui peuvent avoir des origines très différentes. Certaines de ces ambiguïtés ne sont pas évitables, car dues à un ensemble insuffisant de conditions initiales ou à l'ambiguïté du calcul qualitatif. D'autres ne sont liées qu'à l'emploi de techniques de substitution pour la résolution d'un système de contraintes qualitatives. Dans ce cas, l'emploi de techniques de calcul qualitatif formel peut permettre d'éliminer certaines variables entre des contraintes et donc d'engendrer moins d'hypothèses (voir la thèse de J.L. Dormoy [Dor87]).

#### 1.4.2 Simulation de la dynamique d'un système

La physique qualitative s'est donné un but plus ambitieux que celui de déterminer des directions possibles d'évolution d'un système physique à partir d'un équilibre. Elle vise à fournir des descriptions de comportements dynamiques de ces systèmes. Chaque variable est décrite par des historiques qui sont des successions de valeurs qualitatives. Le comportement d'un système est une chronologie de changements de valeurs de variables dans leurs espaces quantités et/ou de changement de signe de leurs dérivées.

Cette description très simple est implantée grâce à des lois d'intégration et de description du comportement des fonctions continues. Les premières permettent de déduire à partir de la valeur qualitative d'une variable et de sa dérivée quelle sera la prochaine valeur remarquable de son espace quantité qui sera atteinte (par exemple, si  $(A < X < B)$ ,  $B \neq +\infty$ , et  $\partial X = +$ , alors dans l'état suivant de la simulation on aura  $X = B$ ). Les lois qualitatives de continuité sont traduites des théorèmes classiques de l'analyse, comme le théorème des valeurs intermédiaires, et permettent de limiter a priori la combinatoire des évolutions possibles des variables à partir d'un état donné (par exemple, on ne peut avoir succession de deux états dans lesquels on ait successivement  $\partial X = +$  puis  $\partial X = -$  ; il faut un passage par un maximum local et donc un état intermédiaire dans lequel  $\partial X = 0$ ; voir [Wil84] et [Kui86] pour plus de détails). Un algorithme complet de simulation qualitative peut alors être brièvement donné par :

---


$$^4 z = x + y$$

$$^5 z = x \times y$$

1. Sélectionner un état dans la liste des états courants du système. Un état est l'affectation de valeurs particulières pour toutes les variables et leurs dérivées. Déterminer l'ensemble des transitions possibles vers d'autres états : pour chaque variable, déterminer l'ensemble des nouvelles valeurs possibles de sa dérivée en utilisant les règles de continuité.
2. Il est alors possible d'engendrer combinatoirement tous les ensembles de  $n$ -uplets associés aux contraintes liant les variables.  
Appeler l'algorithme décrit au paragraphe précédent pour filtrer les ensembles de  $n$ -uplets et créer  $p$  vecteurs de valeurs pour les dérivées des variables.
3. Par intégration et en appliquant à nouveau des règles de continuité, déterminer les  $m$  états successeurs possibles à partir des  $p$  vecteurs de dérivées. Par exemple, seules les variables de dérivée non nulle dans l'état précédent et qui voient leur dérivée s'annuler peuvent changer de valeur dans leur espace quantité. Malgré l'utilisation des règles de continuité, déterminer des états successeurs à partir d'un état et d'un vecteur de valeurs de dérivées reste une opération délicate. Comme on n'a pas d'idée des ordres de grandeur des valeurs des dérivées, il n'est en général pas possible d'ordonner les transitions de variables différentes. Par exemple, si  $\partial A = +$ ,  $A < v_a$  et  $\partial B = +$ ,  $B < v_b$  on peut avoir dans l'état suivant  $A = v_a$  ou  $B = v_b$  ou les deux. Ce problème (appelé "transition ordering" dans la littérature, voir par exemple [Wil84]) augmente encore le nombre d'états successeurs possibles.

La suite du traitement est la suivante : noter parmi ces états, ceux contenant une variable atteignant  $+\infty$  ou  $-\infty$  (évolution divergente), ceux déjà rencontrés (et qui indiquent donc des cycles d'évolution du système), ceux identiques à l'état précédent (situation stationnaire). Il ne faut pas poursuivre de simulation depuis ces états, puisque dans le premier cas des limites sont atteintes pour certaines des variables, et que dans les deux autres cas l'algorithme bouclerait. Inclure tous les autres états dans la liste des états courants et aller au 1).

Cette simulation produit un arbre d'états décrivant les évolutions possibles du système physique dans le temps qui est appelé "envisonment" dans la littérature .

### 1.4.3 Les approches variantes

Une première variante à ces techniques de simulation qualitative a été proposée par J. de Kleer pour pallier leur trop grande exhaustivité, liée au caractère combinatoire de la simulation par création d'hypothèses, et donc à ses yeux, leur trop faible capacité



d'explication causale.

Il a donc proposé de guider les propagations de petites variations des variables à travers tout le modèle en utilisant des heuristiques qui traduisent de manière intuitive sa notion de la causalité. Ces heuristiques, qui permettent de ne déduire qu'un comportement causal unique :

- codent des connaissances a priori sur les évolutions des variables. Par exemple, si un composant a propagé une augmentation de débit dans un conduit, l'heuristique permet de déduire que la pression va augmenter dans le conduit.
- permettent dans certains cas de considérer comme nulles les valeurs de variables indéterminées.

Ces techniques souffrent bien sûr de problèmes de cohérence et de complétude. Elles sont liées à une certaine philosophie de la causalité présentée par J. de Kleer dans ses articles [dKB83] et [dKB84b]. Il adopte une vue extrêmement réductionniste dans laquelle le monde est assimilé à une énorme machine constituée de composants élémentaires. Cette machine se comporte de manière complètement déterministe : il est par exemple possible de suivre la propagation d'une perturbation aux bornes d'un système qui gagne peu à peu tous les composants. Une distinction est faite entre la "matière", "comme l'air, l'eau, les électrons", les "composants" qui changent les caractéristiques de cette matière, et les "conduits" qui la transportent sans plus d'effets. Tout phénomène physique étant décomposable en relations causales élémentaires, il devient possible d'assimiler le phénomène réel à sa simulation ([dKB83]) :

"... nous aurions alors les bases d'une nouvelle branche de la physique, dans laquelle les échanges d'information joueraient un rôle aussi fondamental que les flux d'énergie et de mouvement."

Un type d'approche équivalent est représenté par les modélisations de fluides faisant intervenir des interactions causales entre molécules constituantes ([Ga86], [CF87]). Il est clair que ce point de vue n'est plus du tout celui de la physique moderne, pour qui la notion de causalité est complètement indépendante de l'aspect mathématique d'une modélisation. Les phénomènes macroscopiques sont maintenant considérés comme des intégrations de phénomènes microscopiques dont les lois de description sont essentiellement probabilistes et non pas déterministes et causales (cf. la mécanique quantique). L'article de B. Saint-Servin sur la causalité dans l'Encyclopaedia Universalis [Sai85] résume très bien ce point de vue :

"... L'hypothèse du déterminisme repose sur cette conception sémantique qui revient à affirmer que l'ordre des enchaînements mathématiquement

calculables dans la théorie et l'ordre des phénomènes sont semblables ... Ce qui a été décisif, dans cette évolution de la mécanique, c'est l'abandon de l'ambition de décrire un système physique, à partir de ses éléments, par des lois de composition (...) Après les travaux de Maxwell, avec la mécanique statistique et en fait avec la physique quantique, cette ambition d'une analyse pièce par pièce des systèmes physiques est apparue impossible ou révolue ; et la notion de causalité, qui était liée à la notion de substance matérielle en a été ébranlée."

Mais l'effort principal des chercheurs dans le domaine de la Physique Qualitative porte plus sur les problèmes techniques que sur les philosophies qu'il est toujours possible de leur attacher.

Une avancée notable dans les techniques de modélisation a été apportée par O. Raiman (voir [Rai84], [Ra86] et [Rai86b]) avec l'introduction de la notion d'ordre de grandeur. Les autres travaux concernent surtout l'amélioration des techniques du calcul qualitatif, avec l'introduction de dérivées d'ordre supérieur ([dKB84a], [CK87], [Mor87]), du calcul flou ([DAm87]), d'une représentation du temps numérique ([Wil86]), de techniques issues de l'apprentissage par induction ([Wel86]) et une étude très formelle des méthodes de résolution de systèmes linéaires qualitatifs employant une règle de Gauss-Seidel adaptée ([Rai86a], [Dor87]). Enfin, des mathématiciens s'intéressent aussi à formaliser les principes du calcul qualitatif, tel qu'il a été défini de manière un peu empirique par les chercheurs en IA (voir [Aub87]).

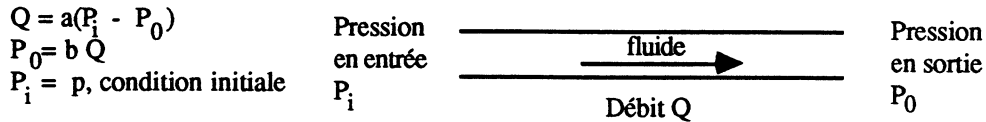
## 1.5 Les problèmes non résolus

De nombreux problèmes ont été soulevés dans le développement de techniques de raisonnement qualitatif. Parmi ceux-ci, un certain nombre d'entre eux n'ont toujours pas reçu de réponses convaincantes :

- Les techniques de modélisation de la Physique Qualitative ne mettent pas en avant une méthodologie très claire : en pratique, un système est modélisé en incorporant des versions dégradées de lois physiques classiques et des connaissances de "bon sens", qui sont souvent des a priori sur le fonctionnement du système. Un des buts initiaux de la Physique Qualitative était d'introduire dans le domaine de l'IA des techniques générales de modélisation, par opposition aux connaissances associatives des systèmes experts, qui codent des savoir-faire.

Mais dans bien des exemples, les connaissances sont codées dans un modèle qualitatif de telle manière que le calcul qualitatif permette de retrouver des résultats connus par avance. On peut citer la modélisation d'un tuyau parcouru par un

Le modèle du tuyau proposé par Y. Iwasaki :



Le modèle qu'il faut construire pour obtenir des résultats avec l'emploi des heuristiques de J. de Kleer :

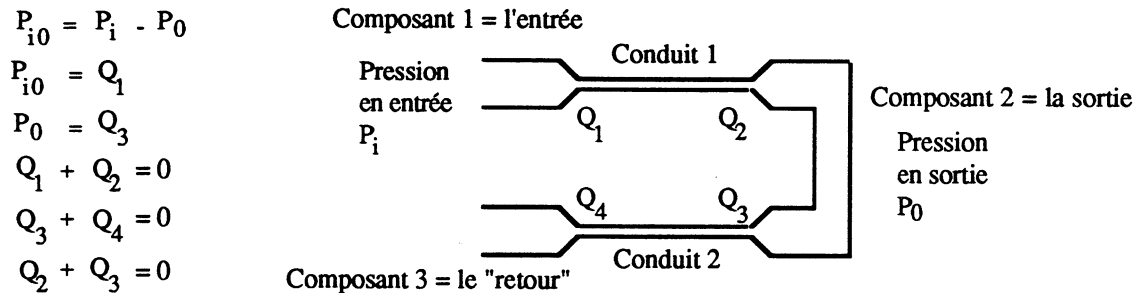


Figure 1.4 : Deux modélisations d'un tuyau qui devraient permettre de faire apparaître l'effet d'une perturbation de pression en entrée du tuyau.

fluide, donnée par J. de Kleer dans [dKB86]. Ce modèle doit permettre de rendre compte de l'effet d'une perturbation de la pression en entrée du tuyau. Si on admet que les équations

$$\begin{cases} 1) & Q = a(P_i - P_0) \\ 2) & P_0 = bQ \\ 3) & P_i = p \end{cases}$$

données par Y. Iwasaki et H. Simon dans [IS86a] modélisent de manière correcte le tuyau, alors les heuristiques données par J. de Kleer ne permettent pas de simuler correctement le comportement du système<sup>6</sup>. J. de Kleer prétend dans [dKB86] que cet échec des heuristiques de propagation causale est dû à une modélisation

<sup>6</sup>En effet, si on suppose que  $\partial P_i = +$  comme condition initiale, alors en utilisant une heuristique on peut ignorer la valeur de  $\partial P_0$  dans l'équation 1) ; on en déduit  $\partial Q = +$ , puis  $\partial P_0 = +$  d'après 2). Pour déterminer la rétroaction sur le débit de l'augmentation de pression en sortie, il faut remplacer  $P_i$  et  $P_0$  par leurs valeurs dans l'équation 1). L'ambiguïté du calcul qualitatif ne permet pas de déterminer une valeur unique pour  $Q$ . Il y a donc trois hypothèses à gérer. Dans chaque cas, on peut calculer la rétroaction de la pression en sortie sur le débit et on obtient des résultats différents, une rétroaction positive aussi bien que négative... On devrait pourtant être capable de déduire que dans un premier temps la différence de pression entre les deux extrémités du tuyau augmente, ainsi que le débit ; la pression en sortie augmente à son tour, après un délai qu'une modélisation

inadéquate. Il propose donc un modèle, décrit par la figure 1.4 qui est composé de trois “composants” et de deux “conduits”, dont la signification n’est vraiment pas évidente<sup>7</sup>. Cet exemple est révélateur du manque d’une méthodologie claire de formalisation qualitative de systèmes physiques. Il montre qu’il est difficile de modéliser un système physique sans tenir compte des faiblesses du calcul qualitatif. Apporter des améliorations à ce dernier pourrait peut être permettre de dégager une démarche de modélisation générale.

- La Physique Qualitative a voulu réinventer une nouvelle notion de la dynamique d’un système, qui lui soit propre. Les contraintes du calcul qualitatif permettent tout au plus de décrire comment un système peut se comporter au voisinage immédiat d’un équilibre. Mais leur utilisation pour simuler le comportement d’un système au cours du temps n’est guère convaincante : comme on l’a vu dans le paragraphe 1.4.2, la notion de temps est liée au pas de l’algorithme de simulation qui intègre de manière arbitraire les tendances d’évolution des variables, alors que des ordres de grandeur de la dynamique du système peuvent être bien connus, si le système est observable. Le développement de techniques d’analyse différentielle symbolique (avec l’introduction des dérivées d’ordre supérieur, du raisonnement sur les propriétés de continuité, etc) semble être une sophistication inutile : le calcul différentiel classique finira par être réinventé, mais sans donner plus de résultats, puisqu’appliqué à un niveau de modélisation inadéquat.

Finalement, ces problèmes peuvent être résumés par la question de l’adaptation de techniques de résolution et de modélisation à la finesse d’un modèle. Parce que le but de la physique qualitative était de créer une physique intelligible, où des résultats seraient expliqués en termes des étapes du calcul, des techniques ont été développées pour modéliser un système physique de manière concrète et intuitive. Un modèle qualitatif ne demande que peu de connaissances pour être construit ; il n’utilise que des variables représentant des grandeurs physiques dont le sens est évident, et évite la “tyrannie du détail” imposée par les modèles quantitatifs pour lesquels un grand nombre de paramètres doivent être précisément évalués. Mais cette facilité théorique de

---

qualitative ne permet pas d’évaluer, et la différence de pression diminue. Il y a rétroaction négative, et ce système physique est bien sûr stable !

<sup>7</sup>La vraie nature de la modélisation proposée par J. de Kleer n’est pas très claire. Elle permet d’appliquer des heuristiques qui, depuis la valeur de la perturbation initiale  $P_i = +$ , permettent de déduire que  $P_0 = +$  (voir [dKB86] pour plus de détails). Mais ce résultat est obtenu de manière beaucoup plus simple avec la modélisation précédente. Enfin, pour connaître finalement le sens de la rétroaction, il faut de la même manière que dans la modélisation plus “naturelle” proposée par I. Iwasaki résoudre la contrainte  $\partial P_{i0} = \partial P_i - \partial P_0$ . Quoi qu’en dise J. de Kleer, cette contrainte ne permet pas de déduire que la rétroaction est négative, parce qu’elle conduit à des résultats ambigus.

compréhension des résultats de simulation se paye par le manque de performance du calcul qualitatif. Cela se traduit par l'obtention de résultats ambigus (ambiguïté due à la trop grande abstraction des outils, mais aussi à leur caractère très local, ce qui rend l'expression de lois générales comme les lois de conservation d'énergie très difficile<sup>8</sup>, comme l'a bien montré B. Kuipers dans [Kui85]). Cette ambiguïté impose une interprétation des résultats, alors que c'est justement ce que voulait éviter la Physique Qualitative, reprochant aux techniques traditionnelles leur aspect "boîte noire".

Il nous semble irréaliste de vouloir à la fois obtenir des résultats pertinents et immédiatement intelligibles. La proposition d'introduire en IA des modèles symboliques "profonds" et de s'en limiter là semble donc être une impasse. Plutôt que de sophistication des outils existants, le raisonnement qualitatif devrait plutôt inclure des techniques d'interprétation de données, soit directement acquises depuis le monde réel, soit fournies par des modèles performants.

Enfin, peu d'efforts ont été fournis en vue d'une connexion directe des techniques de raisonnement qualitatif avec le monde réel. Pourtant, ce problème est déterminant : il s'agit de définir comment seront obtenues les données qualitatives à partir de mesures souvent bruitées, et en sortie comment seront comparés les résultats obtenus à l'évolution réelle du système modélisé (ce dernier problème a été abordé par K. Forbus dans [For86], mais n'a pas trouvé de solution satisfaisante).

En conclusion de ce bref exposé de notre vue de la Physique Qualitative, il nous faut tempérer les critiques qui ont été formulées plus haut. La Physique Qualitative est un domaine de l'IA qui a adopté une démarche scientifique classique, parce qu'elle s'intéresse "simplement" au monde physique et non pas à une modélisation d'un quelconque "agent intelligent" (sans aucunement préjuger de l'intérêt de cette dernière approche). Des techniques de modélisation et de calcul qualitatif ont été proposées puis testées sur de nombreux exemples simples. Les résultats obtenus sont facilement comparables à l'évolution réelle du système simulé, et les carences et les avantages des outils utilisés peuvent être clairement discutés.

---

<sup>8</sup>Ce point peut aussi expliquer l'étonnante importance accordée à la causalité en Physique Qualitative ; il est très difficile d'interpréter des lois globales et donc intégrales en termes d'interactions causales, alors qu'on peut beaucoup plus être tenté de le faire, mais sans plus de justifications, lorsque l'on s'intéresse à des lois différentielles.

## 2 Les approches alternatives du raisonnement qualitatif en IA

Face aux problèmes rencontrés par la Physique Qualitative, un certain nombre de chercheurs ont préféré aborder le raisonnement qualitatif sous un angle différent. Plutôt que vouloir utiliser uniquement des outils de calcul symbolique, ce qui aurait l'avantage d'éviter dans une certaine mesure une interprétation des résultats, la simulation d'un système physique complexe est laissée aux techniques classiques qui ont fait leurs preuves. La place du raisonnement qualitatif est alors dans l'interprétation des résultats fournis par la simulation. Les motivations de cette approche peuvent être de plusieurs ordres : de nombreux problèmes physiques sont trop complexes pour que leurs modélisations admettent des solutions formelles ; mais il est possible de les simuler numériquement et d'essayer d'interpréter des familles d'évolutions de même nature qualitative, dépendant des paramètres et des conditions initiales choisis. Dans d'autres cas, il est possible de résoudre formellement un système d'équations modélisant un système physique, mais sans arriver à juger si on peut interpréter à un niveau quelconque la manière dont le système est résolu. Il peut par exemple être intéressant, les variables d'entrée étant isolées, de comprendre comment la résolution du système d'équations peut expliquer un fonctionnement, en isolant par exemple des sous-modèles indépendants qui traduisent des "mécanismes" distincts intervenant dans l'évolution globale du système.

Cette nouvelle voie du raisonnement qualitatif est très récente et il n'est pas encore possible de distinguer des techniques communes. Nous citerons donc simplement deux axes de recherche représentatifs de l'approche.

### 2.1 Interprétation causale de simulation

Cette vue du raisonnement qualitatif est défendue par Y. Iwasaki et H. Simon dans une longue controverse avec J. de Kleer (voir les papiers [dKB86], [IS86a], [IS86b]). Leur but est de disposer de techniques permettant de trouver une interprétation causale à la résolution d'un ensemble d'équations décrivant un phénomène physique. Chaque équation doit si possible décrire un "mécanisme", c'est-à-dire une loi physique particulière liant un certain nombre de variables. Le concept de mécanisme peut aussi être attaché à celui de fonction, dans un système conçu par l'homme, mais semble surtout être employé en économie.

Comme le système initial n'est pas carré en général, il faut ajouter des équations en fixant de manière arbitraire les valeurs de certaines variables. Ces variables, qui sont ap-

pelées “exogènes”, sont les variables dont on peut supposer l’évolution indépendante de celle du système. Par exemple, des données météorologiques peuvent être considérées comme exogènes dans une modélisation du marché des céréales dans le monde. Ce choix, qui conditionne complètement l’explication causale obtenue, n’est pas automatisé. Les variables exogènes étant choisies, le but de la méthode proposée par Iwasaki et Simon est de noter dans quel ordre les valeurs des variables se déduisent les unes des autres au cours de la résolution. Cet ordre n’est en général que partiel. Le résultat de la méthode est un ordre entre des sous-ensembles disjoints de variables du système d’équations.

La relation entre deux ensembles disjoints successifs  $S_n$  et  $S_{n+1}$  est : les variables de  $S_n$  étant calculées et leurs valeurs substituées dans le système d’équations, il est possible en employant une technique de résolution quelconque de résoudre une partie du système restant de manière à calculer les valeurs des variables de  $S_{n+1}$ . L’algorithme permettant de trouver une interprétation causale complète à la résolution d’un système est :

$i := 1$  ;

Tant que le système n’est pas complètement résolu, faire

1. Trouver l’ensemble  $S_i$  des sous-systèmes carrés minimaux du système (un système carré minimal admet  $n$  inconnues pour  $n$  équations et ne contient pas de système carré).
2. Résoudre d’une manière numérique tous les systèmes carrés de  $S_i$  si cela est possible. Substituer les valeurs obtenues dans le système complet.  
 $i := i + 1$  ; Retourner au 1).

L’interprétation fournie par cette technique se résume donc à rendre asymétrique un système d’équations symétrique. Un exemple trivial donné par les auteurs est celui du circuit électrique comprenant un interrupteur et une lampe témoin. Supposons que ce système soit modélisé par trois variables booléennes,  $s$  décrivant l’état de l’interrupteur,  $l$  celui de la lampe et  $i$  l’existence d’un courant dans le circuit. On a alors  $s = i$  et  $i = l$ . Mais c’est clairement  $s$  qui est la variable exogène de ce système. En fixant par exemple  $s = 1$  et en appliquant l’algorithme, trois ensembles sont trouvés,  $S_1 = \{s\}$ ,  $S_2 = \{i\}$ , et  $S_3 = \{l\}$ , ce qui traduit les relations asymétriques intuitives  $s \rightarrow i \rightarrow l$ .

Un grand avantage de cette méthode est son caractère global, qui peut être opposé au caractère local de la propagation de contraintes. En effet, les hypothèses nécessaires à la résolution d’un système sont faites en considérant le modèle dans son ensemble. Ce n’est par exemple pas le cas des heuristiques utilisées par J. de Kleer qui fixent

les valeurs de certaines variables à zéro, pendant la résolution par propagation de contraintes d'un système d'équations. Il s'agit donc d'un choix de variables exogènes, mais qui est fait de manière locale.

De plus, l'approche de Iwasaki et Simon semble plus réaliste que celle de la Physique Qualitative<sup>9</sup>. La première raison est que cette méthode ne propose pas un calcul qualifiant les variables, mais simplement une interprétation causale de la résolution d'un système. Il faut d'ailleurs noter que le système n'a pas à être linéaire : seule compte l'appartenance de chaque variable à tel sous-ensemble d'équations. Enfin, la notion de causalité est ici beaucoup plus mesurée que celle qui a longtemps prévalu en Physique Qualitative. Seules des relations de causalité entre ensembles de variables sont données ; en particulier, rien n'est dit sur des variables décrivant un équilibre ou un feedback, qui appartiennent nécessairement à un même ensemble.

Malgré ses nombreux avantages, cette interprétation causale souffre d'en dire trop peu. En particulier, aucune information n'est disponible sur la nature des relations liant les variables du modèle. Seul compte l'ordre dans lequel les résultats sont obtenus et non leur forme qualitative, ce qui nécessiterait des techniques d'interprétation plus sophistiquées. Or, un des buts recherchés est d'être capable de raisonner sur les mécanismes impliqués dans le comportement d'un système complexe, en vérifiant qu'ils obéissent bien aux équations qui les décrivent. La méthode d'interprétation causale ne peut en aucun cas résoudre ce problème. Y. Iwasaki a choisi, dans une application récente de ce travail au diagnostic de systèmes physiques, de greffer le calcul qualitatif classique en aval de l'ordonnancement causal ([HLI87]). L'application retrouve alors tous les problèmes de la Physique Qualitative.

## 2.2 L'interprétation du comportement de systèmes non linéaires

De nombreux systèmes physiques sont modélisés par des familles d'équations différentielles non linéaires. E. Sacks et K. Yip se sont intéressés à l'interprétation des différents types d'évolutions qualitatives définis par ces modélisations non linéaires, lorsque des paramètres des équations et les conditions initiales varient (voir les articles

---

<sup>9</sup>Mais elle semble surtout présenter un intérêt pour des systèmes très "creux". Dans le cas contraire, on n'obtient qu'un petit nombre d'ensembles  $S_i$  comprenant beaucoup de variables, et la méthode n'explique pas grand chose.



[Yip87] et [Sac87]). Ainsi, K. Yip étudie le système d'équations aux différences

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n \cos \alpha - (y_n - x_n^2) \sin \alpha \\ y_{n+1} = y_n \sin \alpha - (y_n - x_n^2) \cos \alpha \end{cases}$$

De tels systèmes peuvent être étudiés, soit en les approximant localement par des systèmes linéaires, en résolvant formellement ces systèmes et en “raccordant” les solutions obtenues, ou plus généralement par des méthodes numériques, dites de “force brute”. Ces méthodes consistent à discrétiser l'espace d'état (dans l'exemple, le plan  $(x, y)$ ), les paramètres  $(\alpha)$ , et à simuler numériquement le système, les conditions initiales variant dans l'espace d'état discrétisé pour une valeur du paramètre fixée. Il est donc clair qu'une telle approche est extrêmement coûteuse.

L'idée de K. Yip est d'automatiser l'interprétation géométrique des trajectoires obtenues dans l'espace d'état. On connaît en effet a priori les indices géométriques, les “bifurcations”, qui caractérisent le passage d'une famille qualitative d'évolutions à une autre. En utilisant des techniques d'analyse d'images, en particulier la multi-résolution (voir [Wit83]), il est possible d'extraire ces indices géométriques des résultats d'une simulation. Cette connaissance permet donc d'implanter un certain contrôle de la simulation numérique : comme les formes géométriques de ces changements sont visibles sur un certain domaine de variation des paramètres, l'échantillonnage de la simulation peut être plus lâche. Lorsqu'un indice est reconnu, une simulation plus complète peut être lancée dans son voisinage (en termes des paramètres), afin de localiser plus précisément la bifurcation. Enfin, ces connaissances permettent d'établir un critère d'arrêt. La simulation est complète lorsque les transitions entre tous les comportements qualitatifs découverts ont été expliquées par des bifurcations connues.

Ce type d'approche souffre des problèmes classiques rencontrés en analyse d'images. En particulier, il est très difficile de trouver un bon compromis entre la robustesse des techniques d'interprétation et leur coût. Faire des hypothèses contraignantes sur le type des indices géométriques à reconnaître permet d'obtenir des résultats à faible coût, mais rend l'interprétation très dépendante du choix des paramètres des techniques employées. D'un autre côté, des techniques robustes comme la multi-résolution sont très coûteuses.

### 3 Conclusion

La Physique Qualitative s'est donné des buts très ambitieux : en affirmant d'une certaine manière que “quantitative is nothing but poor qualitative” cette discipline a voulu

inventer de nouveaux outils de modélisation et de simulation de systèmes physiques. Par exemple, S. Letovsky oppose quantitatif et qualitatif dans [Let83]. Mais construire des systèmes informatiques capables de simuler et d'expliquer les résultats obtenus dans un même langage n'est pas réaliste lorsque ce langage est celui de l'utilisateur. Très vite, les objectifs de la Physique Qualitative ont donc été ramenés à des dimensions plus modestes. Ainsi, la volonté de simuler la dynamique d'un système est généralement abandonnée par les chercheurs du domaine (voir [Dor87]).

D'un autre côté, il reste beaucoup à faire pour établir des ponts entre des représentations quantitatives et qualitatives. La deuxième classe des travaux présentés dans ce chapitre suit cet objectif. Notre propre travail s'inscrit dans cette démarche, et nous en présentons les grandes lignes dans le chapitre suivant.



---

---

## Chapitre 2

### Le raisonnement qualitatif. Premières définitions.

---

*Le but de ce chapitre est de présenter les concepts importants du Raisonnement Qualitatif en tant que direction de recherche en informatique.*

*Dans une première section, nous donnons une première définition informelle du raisonnement qualitatif. Le raisonnement qualitatif est une discipline naissante, en informatique. Il est donc utile de la situer par rapport aux approches similaires dans d'autres domaines, comme les mathématiques. En informatique, le Raisonnement Qualitatif présente de grandes similarités avec la Vision par Ordinateur. Ces points de convergence sont détaillés.*

*La deuxième section donne des définitions plus précises des concepts qui caractérisent notre approche.*

*La dernière section du chapitre présente des justifications des choix de modélisation de la section précédente, et de la démarche générale de recherche qui est défendue dans la thèse.*

*Guide de Lecture*

*En lecture rapide les première et troisième section pourront être ignorées. La deuxième section définit les concepts qui sont utilisés dans toute la suite de la thèse et doit donc être lue avant d'aborder les chapitres suivants, qui sont plus techniques.*

*En première lecture, la dernière section pourra être ignorée. On acceptera alors les choix de modélisation sans justifications.*

## 1 Le raisonnement qualitatif

### 1.1 Une première définition

Le **raisonnement qualitatif** est un domaine de l'informatique dont le but est de réunir des techniques de **modélisation**, de **simulation** et d'**interprétation** permettant à un ordinateur de proposer des explications de l'évolution passée et future de systèmes physiques complexes.

L'ensemble des techniques qui forment le raisonnement qualitatif peut être décrit par les trois mots clefs :

**Modélisation** Le raisonnement qualitatif doit permettre d'obtenir à la fois des résultats qui décrivent correctement l'évolution réelle du système physique modélisé, et l'explication causale de ces résultats. Un double objectif est donc poursuivi : fournir un outil de simulation, et le centre d'intérêt est alors le système physique, mais aussi présenter les résultats obtenus de manière aisément compréhensible, et le centre d'intérêt est alors l'utilisateur du système informatique. Cette démarche est le propre du raisonnement qualitatif, et fait son originalité par rapport aux techniques quantitatives classiques de modélisation. Néanmoins, il n'entre pas dans le cadre du raisonnement qualitatif de modéliser l'utilisateur du système pour pouvoir simuler son raisonnement, et lui fournir dynamiquement les seules informations dont il aurait besoin. Il faut pour l'instant se contenter d'un ensemble d'a priori sur les besoins d'un utilisateur d'un système de raisonnement qualitatif, en termes de la nature des informations qui doivent lui être présentées (d'où la mise entre guillemets de l'adjectif "intelligible" dans la définition).

**Pour répondre à ce double objectif, nous affirmons que dans le cadre du raisonnement qualitatif une modélisation doit être constituée d'un**

**ensemble de modèles de natures différentes.** Dans cet ensemble il doit exister deux classes de modèles :

- des modèles suffisamment “fins” qui ont un véritable caractère prédictif. Ils doivent permettre de coder des connaissances générales sur l’ensemble des évolutions possibles du système physique modélisé. En pratique ces modèles utilisent des outils de **représentation continue** (par exemple un ensemble d’équations différentielles).
- des modèles plus “abstraites” ou encore qualitatifs, qui permettent de limiter la quantité d’informations disponible sur un système à une vue la plus synthétique possible. Pour cela, ces modèles ne doivent coder que des concepts qui caractérisent l’évolution du système modélisé. Ils garderaient ainsi une sémantique claire pour un utilisateur. Ensuite, il faut à la fois limiter le nombre de ces concepts et restreindre le vocabulaire utilisé pour caractériser leurs évolutions (ce qui en pratique définit une **représentation discrète**). Ce vocabulaire doit lui aussi être adapté aux besoins connus a priori de l’utilisateur. Il peut par exemple caractériser un nombre fini de formes d’évolutions possibles des concepts manipulés. Un vocabulaire abstrait préfigure donc une classe de décisions, qui en découlent par déduction logique. Le choix d’un vocabulaire qualitatif est lié à la nature des raisonnements que doit accomplir l’utilisateur du système.

Les modèles qualitatifs doivent permettre de décrire les évolutions des concepts par des **épisodes**. Un épisode est un intervalle temporel associé à une description d’évolution unique dans le vocabulaire du modèle. Décomposer un historique en épisodes, c’est par exemple dire que telle pression a augmenté pendant dix minutes, s’est stabilisée dans les cinq minutes suivantes puis a suivi un régime oscillant amorti pendant encore dix minutes. Mais les modèles qualitatifs doivent aussi permettre d’obtenir des relations de cause à effet entre épisodes de divers concepts. L’augmentation de pression pendant dix minutes est la cause d’une augmentation de débit pendant un intervalle de temps identique. Ces relations causales constituent la matière première des explications de l’évolution du système physique modélisé. Nous appelons une **vue depuis un modèle** du système physique tout ensemble d’épisodes des concepts du modèle liés par des relations de causalité.

**Simulation** Les modèles fins codent des connaissances générales. Des techniques de simulation peuvent donc leur être associées. A partir d’un ensemble de conditions initiales, une simulation permet d’obtenir une vue du système modélisé.

**Interprétation** Les modèles qualitatifs codent des connaissances abstraites qui peuvent être incomplètes. En général il n'est donc pas possible d'obtenir des vues grâce à ces seuls modèles. Une interprétation permet de créer une vue depuis un modèle qualitatif à partir d'une vue depuis un modèle fin, obtenue par simulation. L'interprétation de vues pose le problème du passage de modèles utilisant des outils de représentation continue à des modèles utilisant des outils de représentation discrète.

Il est question de "causalité" dans les premières définitions qui viennent d'être données. Nous avons adopté une définition très modeste de la causalité, liée essentiellement à la notion de fonction. Effectivement, le travail présenté dans cette thèse s'applique essentiellement à des systèmes conçus par l'homme, où il est possible d'identifier un certain nombre d'équipements assurant des fonctions bien précises. Il est souvent possible d'associer à ces équipements un certain nombre d'entrées et de sorties, liées par des lois qui traduisent la fonction assurée. Ces lois permettent de déterminer les valeurs des sorties à un temps  $t$  donné lorsque les valeurs des entrées sont connues à des temps inférieurs ou égaux à  $t$ . Lorsque les entrées et les sorties observées se comportent en accord avec le modèle, le comportement des sorties peut être qualifié de causal. Il obéit en effet à une relation de cause à effet qui a été prévue par le concepteur du système physique. Ainsi, l'amortissement d'une perturbation dans une boucle de régulation est un comportement causal. Dans le cas d'une perturbation non amortie, il est seulement possible de dire que la modélisation de la régulation ne rend plus compte de son fonctionnement.

La causalité est donc la cohérence temporelle des évolutions prédites grâce à un modèle avec les évolutions observées. Fournir des explications **causales** revient à expliciter quelles sont les évolutions prédites des concepts du modèle qui sont liées temporellement par une loi.

## 1.2 Les liens avec d'autres disciplines

Il faut souligner que le développement de techniques de représentation qualitative du monde est une idée très naturelle et par conséquent déjà très ancienne. Elle n'est en aucun cas une exclusivité des informaticiens. Dès 1967 par exemple, le mathématicien René Thom a proposé une théorie mathématique de raisonnement qualitatif, connue sous le nom de "théorie des catastrophes". On trouvera dans son ouvrage "Stabilité Structurale et Morphogénèse" ([Tho77]) une apologie d'une approche de modélisation qualitative du monde dont la plupart des arguments ont été repris par la suite par les tenants de la "Physique Qualitative" en Intelligence Artificielle.

Le but de la théorie est de définir une description des formes possibles d'évolution de systèmes dynamiques et des transitions entre ces formes (les fameuses "catastrophes"). La théorie s'intéresse aux systèmes pour lesquels il n'est pas possible "d'expliciter la dynamique sous-jacente", c'est-à-dire de construire un modèle différentiel quantitatif. Ces systèmes sont non linéaires. C'est la connaissance a-priori de la topologie des formes dans des espaces de dimensions quelconques qui permet, au vu des formes d'évolutions observées et de leurs transitions, de pouvoir déduire le type de dynamique que suit le système physique.

Cette théorie est très complexe, et il n'est pas question de la présenter ici. Le travail décrit dans cette thèse est bien plus modeste : il s'agit simplement d'étudier les conditions du passage de modèles quantitatifs à des modèles qualitatifs dans le cadre de l'aide à la supervision des procédés continus. On fait donc l'hypothèse qu'il est possible de construire des modèles différentiels donnant une approximation correcte du comportement dynamique du système physique.

Dans le domaine de l'informatique, le raisonnement qualitatif tel que nous l'avons défini représente une démarche semblable à celle de la Vision par Ordinateur (VO), tout au moins avec la composante de la VO qui est l'analyse d'images. Les deux disciplines peuvent utiliser des techniques bien connues par ailleurs comme le traitement du signal et la reconnaissance des formes. Mais comme la VO, le raisonnement qualitatif est plus qu'une simple compilation de techniques. Il définit une démarche de modélisation du monde réel qui préconise l'emploi de modèles à des niveaux croissants d'abstraction (analogue à l'objectif de la VO, "du pixel au symbole"). La question du choix des niveaux de modélisation est un problème scientifique en soi : il s'agit non seulement d'analyser les conséquences de ces choix sur la complexité des algorithmes développés, mais aussi d'analyser expérimentalement comment se comportent les modèles à l'épreuve du monde réel. Ce dernier problème est souvent ignoré, à tort nous semble-t-il, par les informaticiens : il est courant de voir proposer des modélisations incluant des objets élémentaires, associées à des algorithmes dont la complexité est évaluée en fonction du nombre de ces objets. Mais on s'intéresse rarement aux raisons du choix de tel objet plutôt qu'un autre, et à la vraie complexité du problème, c'est-à-dire à l'évaluation du nombre d'objets qui peut devoir être créé dans une situation réelle. Le lecteur intéressé pourra trouver dans la thèse d'A. Lux [Lux85] (par exemple dans la section 3.1 consacrée à l'architecture des systèmes de vision) une analyse détaillée de ces problèmes, avec le point de vue de la VO.

Mais le raisonnement qualitatif diffère de la VO parce-qu'il existe des modèles relativement simples qui permettent de simuler le comportement dynamique du système physique modélisé. Les aspects simulation et interprétation peuvent donc être intime-



ment mêlés. De telles approximations sont possibles parce-qu'elles servent à asservir le système physique, et que la robustesse des techniques de rétroaction permet souvent de délibérément se satisfaire de modèles simplistes. Cette problématique est différente de celle de la VO qui ne s'intéresse pas à fournir des outils de contrôle : elle ne propose pour l'instant que des techniques d'analyse de données provenant de capteurs visuels.

Les liens avec l'automatique sont suffisamment détaillés dans le chapitre 4 pour ne pas être abordés ici.

## 2 Les concepts de l'approche

Cette section présente des définitions plus formelles des concepts utilisés dans la thèse. Des exemples illustrent les définitions dans une seconde partie.

### 2.1 Quelques définitions

Un modèle de supervision est composé :

- d'un graphe orienté dont les nœuds sont des variables qui représentent des grandeurs physiques intéressantes, et les arcs des relations de causalité entre ces variables.
- d'un vocabulaire qui permet de qualifier les évolutions des variables.

Pour un même procédé, nous nous intéressons à plusieurs modèles, qui ont tous la même forme syntaxique, c'est-à-dire sont composés du même graphe. Par contre, les vocabulaires qu'ils emploient sont différents. En pratique, cela définit bien des modèles distincts parce que les algorithmes qui permettent de les exploiter sont différents. Nous reviendrons plus loin sur la justification de cette approche "multi-modèles".

**Définition 1** *Un modèle causal  $\mathcal{M}$  est un couple  $\mathcal{M} = (\mathcal{G}, \mathcal{V})$  tel que :*

- $\mathcal{G}$  est un graphe orienté fini  $\mathcal{G}(X, U)$  tel que le graphe non orienté associé soit connexe.
- $\mathcal{V}$  est un vocabulaire, c'est-à-dire un ensemble de symboles.  $\mathcal{V}$  est dit "qualitatif" si il est fini.
- Les nœuds de  $\mathcal{G}$  sont des fonctions du temps, à valeurs dans  $\mathcal{V}$ .

- Les arcs de  $\mathcal{G}$  sont étiquetés par des constantes temporelles supérieures ou égales à zéro appelées des "retards". Parce que  $\mathcal{M}$  est un modèle causal, il n'existe pas dans  $\mathcal{G}$  de circuits tels que la somme des retards des arcs du circuit soit nulle.

Par abus de notation, on appellera aussi  $X$  et  $U$  les applications qui à tout modèle font correspondre leurs ensembles de nœuds et d'arcs. Les applications de  $U$  dans  $X$  qui associent à tout arc les deux nœuds qu'il relie s'appellent origine et extrémité.

L'introduction de la notion de retard dans la définition est nécessaire pour ne pas se méprendre sur le sens de l'existence de circuits dans un modèle causal. Sans cela, on pourrait comprendre que toute variable  $X$  d'un circuit s'influence elle-même causalement, ce qui n'aurait aucun sens. Le retard temporel  $R$  associé au circuit est celui qui existe entre l'évolution de  $X$  à un temps  $T$  et l'influence de cette évolution, via les autres variables du circuit, sur l'évolution future de  $X$  au temps  $(T + R)$ .

Lorsque le vocabulaire d'un modèle est qualitatif, les nœuds du graphe sont aussi appelés **variables qualitatives**, et le modèle est alors dit qualitatif. Cette utilisation de l'adjectif "qualitatif" est un abus de langage. Il se rapporte plus à la nature de la démarche générale de modélisation adoptée, qui vise à restreindre la quantité d'information disponible sur un système physique, qu'aux modèles employés.

Un dernier commentaire sur cette première définition concerne la traduction dans le formalisme de notre approche du raisonnement qualitatif qui consiste à combiner des modèles continus et discrets : on distingue simplement ces modèles suivant que leur vocabulaire soit fini ou infini. Les limites de cette définition sont claires : on ne s'intéresse qu'à des modèles qui sont constitués d'un même graphe, d'une part, et on restreint les considérations sur la nature continue ou discrète des nœuds du graphe à la question du cardinal du vocabulaire de quantification d'autre part. Cette définition est en accord avec les choix de modélisation de l'application développée pour l'aide à la supervision des procédés continus qui est décrite au chapitre suivant. Elle ne vise évidemment pas, de la même manière que les autres définitions données dans cette section, à donner un cadre général aux relations qu'il est possible d'établir entre modèles continus et discrets.

**Définition 2** Un épisode<sup>1</sup>  $\mathcal{E}$  est un couple  $(\mathcal{D}, [t_1, t_2])$  où  $\mathcal{D}$  est le descripteur de l'épisode, un élément d'un vocabulaire  $\mathcal{V}$ , et  $[t_1, t_2]$  l'intervalle temporel de définition de l'épisode, un couple de réels, avec  $t_2 \geq t_1$ .

On définit deux applications  $D$  et  $T$  qui à tout épisode font correspondre son descripteur et son intervalle temporel.

<sup>1</sup>Cette notion est analogue à celle d'"activité" telle qu'elle est employée dans les modèles à événements discrets (voir par exemple [Dub85]).

**Définition 3** Une vue  $V$  depuis un modèle  $\mathcal{M} = (\mathcal{G}(X, U), \mathcal{V})$  est un graphe orienté fini  $V(X', U')$  sans circuits.

Les nœuds de  $X'$  sont des couples  $(x, e)$  tels que :

- $x$  est un nœud de  $X$ .
- $e$  est un épisode dont le descripteur appartient au vocabulaire  $\mathcal{V}$  de  $\mathcal{M}$ .

On définit deux applications  $VQ$  et  $E$  qui à tout nœud d'une vue font correspondre la variable et l'épisode associés.

Les arcs de  $U'$  sont tels que :

$$\begin{aligned} \forall u' \in U', \exists u \in U / \\ VQ(\text{origine}(u')) = \text{origine}(u) \\ VQ(\text{extrémité}(u')) = \text{extrémité}(u) \end{aligned}$$

Une vue relie donc causalement des épisodes des variables qui sont liées dans le modèle.

Une vue est qualitative si :

- Elle est définie depuis un modèle qualitatif.
- Elle n'est pas ambiguë (voir la définition 5).
- Tous les épisodes des nœuds du graphe sont de taille maximale.  
Dans une vue  $V(X, U)$ , un épisode  $e$  d'une variable  $x$  est de taille maximale lorsque :

$$\forall (x, e') \in X, (\bigcap(T(e'), T(e)) \neq \emptyset \text{ et } e' \neq e) \Rightarrow D(e') \neq D(e)$$

**Définition 4** Une vue  $V$  dans le cadre d'un modèle  $\mathcal{M}$  est dite **connexe** lorsque pour tout nœud  $x$  de  $X(\mathcal{M})$  on a

$$\bigcup_{\{y \in X(V) / VQ(y)=x\}} (T(E(y))) \text{ est connexe}$$

Une vue est connexe lorsque les domaines temporels couverts par les épisodes qui décrivent les évolutions des variables qualitatives sont connexes.

**Définition 5** Une vue  $V$  dans le cadre d'un modèle  $\mathcal{M}$  est dite **non ambiguë** lorsque pour tout nœud  $x$  de  $X(\mathcal{M})$  on a

$$\begin{aligned} \forall y_1, y_2 \in X(V) / y_1 \neq y_2, \\ (VQ(y_1) = x \text{ et } VQ(y_2) = x) \Rightarrow (\bigcap(T(E(y_1)), T(E(y_2))) = \emptyset \text{ ou } = [t, t] t \in \mathbb{R}) \end{aligned}$$

Une vue est non ambiguë lorsque aucun des couples d'épisodes décrivant l'évolution d'une variable ne se "chevauche".

**Définition 6** Une vue  $V_1$  est dite plus abstraite qu'une vue  $V_2$  lorsque

$$\begin{aligned} & \forall u \in U(V_1), \exists \{u'_i\}_{(i=1,n)} \in U(V_2) / \\ & \forall i \in [1, n], VQ(\text{origine}(u)) = VQ(\text{origine}(u'_i)) \\ & \forall i \in [1, n], VQ(\text{extrémité}(u)) = VQ(\text{extrémité}(u'_i)) \\ & \bigcup_{i \in [1, n]} T(E(\text{origine}(u'_i))) \subseteq T(E(\text{origine}(u))) \\ & \bigcup_{i \in [1, n]} T(E(\text{extrémité}(u'_i))) \subseteq T(E(\text{extrémité}(u))) \end{aligned}$$

Une vue  $V_1$  est plus abstraite qu'une vue  $V_2$  lorsque pour tout arc  $u$  de  $V_1$  décrivant une relation de causalité entre deux nœuds de cette vue il est possible de trouver au moins un arc  $u'$  dans  $V_2$  qui précise cette relation. Par "préciser" il faut entendre que les intervalles temporels des épisodes des nœuds de  $V_2$  reliés par  $u'$  sont inclus dans les intervalles temporels des épisodes des nœuds de  $V_1$  reliés par  $u$ .

L'ensemble des variables dont les évolutions sont décrites par la vue  $V_1$  est inclus, au sens large, dans l'ensemble de variables dont les évolutions sont décrites par la vue  $V_2$ . Cette définition de l'abstraction ne repose que sur un critère temporel. Nous justifierons ce choix dans la section 3.2.

Il est intéressant d'étudier la nature de la relation "plus-abstraite". Elle est clairement réflexive et transitive (une relation de pré-ordre). Si l'inclusion au sens large est remplacée par une inclusion au sens strict dans la définition 6, la relation n'est plus réflexive mais devient anti-symétrique (démonstration : supposons que  $V_1$  soit plus abstraite que  $V_2$  et réciproquement. Considérons un arc  $u_1$  quelconque de  $V_1$  ; il existe au moins un arc  $u'$  de  $V_2$  qui satisfasse à la condition de la définition, et on peut associer de la même manière un arc  $u_2$  de  $V_1$  à  $u'$  ; il est clair que l'on définit ainsi une suite infinie et non stationnaire  $\{u_n\}_{n=1,\infty}$  d'arcs de  $V_1$ . Or ce graphe est fini, et on aboutit à une contradiction).

Un résultat important est que la relation "plus-abstraite" est une relation d'ordre partiel sur l'ensemble des vues non ambiguës.

**Définition 7** On appelle **simulation** toute application de l'ensemble des vues connexes et non ambiguës depuis un modèle, dans lui-même, telle que :

- A toute vue  $V_1$  correspond une vue  $V_2$  dont  $V_1$  est un sous-graphe.
- Il n'existe pas dans  $V_2$  d'arc entre deux nœuds appartenant à  $V_1$  qui n'appartienne pas aussi à  $V_1$ .

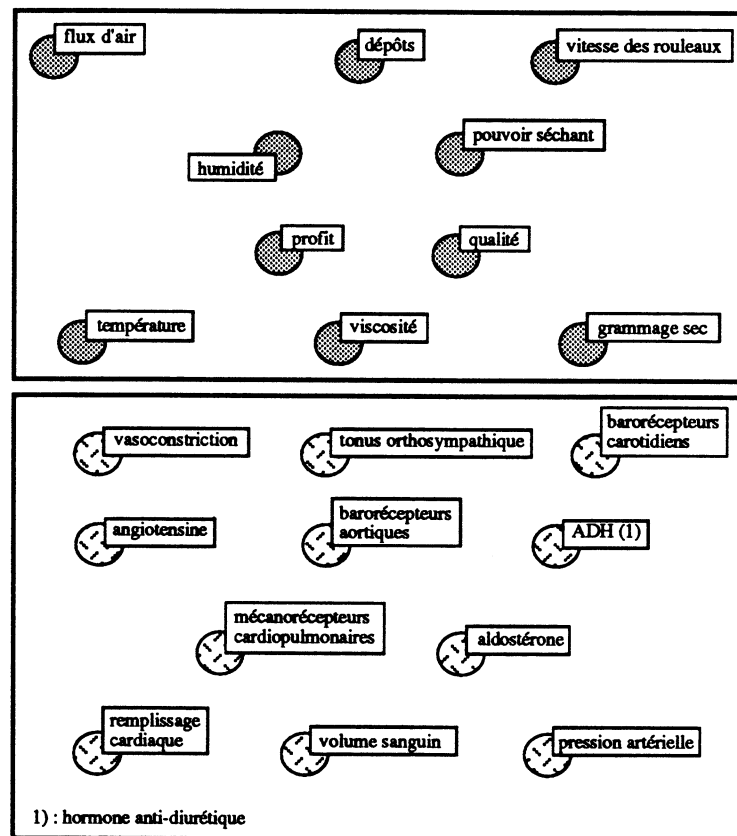


Figure 2.1 : Deux ensembles de variables décrivant des systèmes dynamiques.

Une simulation étend le domaine temporel des connaissances sur les évolutions des variables du modèle (en d'autres termes, elle ne modifie pas les conditions initiales).

**Définition 8** On appelle **interprétation** toute application dans l'ensemble des vues non ambiguës qui à toute vue  $V_1$  fait correspondre une vue  $V_2$  plus abstraite.

## 2.2 Exemples

Cette section illustre par quelques exemples simples les définitions qui viennent d'être données.

Les variables qualitatives d'un modèle (les nœuds d'un graphe) figurent les concepts qui caractérisent l'évolution du système physique étudié. Ce type de modélisation permet de construire par simulation ou interprétation des vues liant des formes d'évolution. Il est suffisamment général pour pouvoir utiliser des concepts de natures variées. Il est

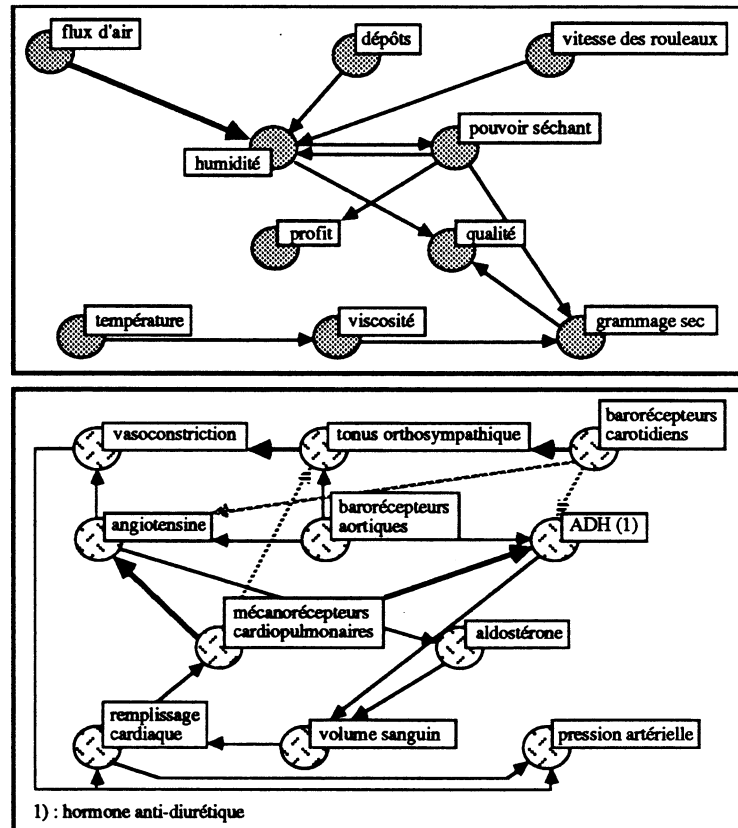
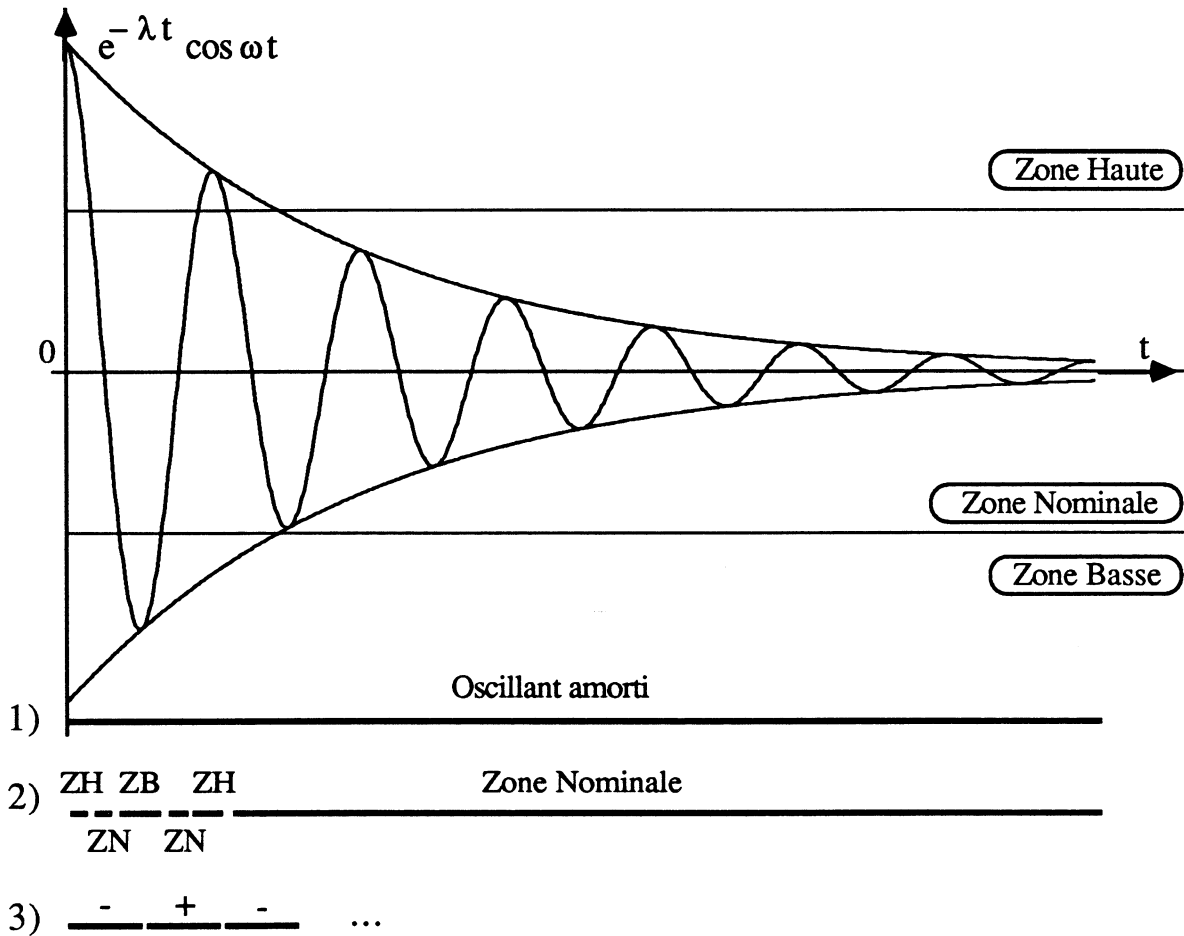


Figure 2.2 : Les modèles complets des deux systèmes, qui détaillent les influences causales entre les variables.

bien sûr naturel que dans la description d'un système physique, la plupart des concepts intéressants représentent des paramètres physiques du système (températures, débits, pressions, etc). Mais il est aussi possible d'exprimer des concepts associés à des buts, comme la "qualité" d'un produit, la "sûreté" de fonctionnement d'une installation, etc. Ainsi, la figure 2.1 présente les diverses variables pouvant représenter des paramètres de deux systèmes dynamiques très différents. Le premier est un modèle de section de séchage d'une papeterie, dans une partie de procédé industriel continu (tiré de l'article [PCG87]). Le second exemple est un modèle simple d'une fonction du corps humain, la régulation de la pression sanguine ([Mey83]).

La figure 2.2 présente les graphes complets des deux systèmes dynamiques choisis comme exemples. Le graphe de représentation de la régulation de la pression sanguine est tiré tel quel d'un manuel de physiologie humaine [Mey83]). Bien qu'il ne s'agisse



— : le domaine temporel d'un épisode ; avec le vocabulaire de l'exemple 1) un seul épisode suffit à décrire toute la courbe

Figure 2.3 : Trois décompositions en épisodes d'une même évolution. La première décrit l'ensemble de l'évolution par un seul épisode, de descripteur "oscillant amorti" ; la seconde détaille six épisodes, de descripteurs choisis parmi trois zones d'évolution de la variable ; la dernière fait apparaître des épisodes de signe constant de la dérivée.

que d'un exemple isolé, il illustre, s'il en était encore besoin, combien est répandu le mode de représentation par graphe orienté comme outil de synthèse, lorsque l'on s'intéresse à des systèmes dynamiques complexes. La largeur des flèches permet de distinguer les influences prépondérantes entre variables. Il y a schématiquement deux paramètres qui agissent sur la pression sanguine, le débit et la résistance produite par le réseau des vaisseaux sanguins. Des capteurs de pression (mécanorécepteurs

et barorécepteurs) permettent un asservissement par commande du débit et de la résistance. Le modèle montre l'existence de plusieurs boucles d'asservissement croisées, certaines étant prépondérantes (par exemple, les mécanorécepteurs cardiopulmonaires servent essentiellement au contrôle de la masse sanguine).

La figure 2.3 donne en exemple les diverses décompositions en épisodes que l'on peut faire d'une même évolution lorsque des vocabulaires différents sont utilisés (l'évolution représentée est par exemple celle du courant dans un circuit RLC en régime pseudo-périodique).

La figure 2.4 donne un exemple de vues depuis le modèle de la section de séchage de papeterie. Ces vues ne concernent que deux variables du modèle, la vitesse des rouleaux et l'humidité de la pâte à papier. Elles montrent qu'il est possible d'associer, grâce à l'interprétation des vues de bas niveau, une période de flux d'air anormalement élevé à une période pendant laquelle l'humidité de la pâte est trop faible (on suppose la vitesse des rouleaux constantes et les dépôts sur ces rouleaux inexistants).

## 3 Discussion de l'approche présentée

### 3.1 Pourquoi une approche multi-modèles pour la supervision

Dans cette section, nous proposons une justification de l'approche qui vient d'être brièvement formalisée dont la particularité majeure est de combiner des modèles continus et discrets pour assurer le suivi de l'évolution d'un système physique complexe. Il est bon de rappeler que cette approche a été développée dans le cadre assez spécifique de l'aide à la supervision des procédés continus. On attend d'un système d'aide à la supervision qu'il soit capable d'assurer deux fonctions essentielles :

- **prédire** périodiquement l'évolution future du procédé à partir des conditions initiales constituées à la fois par les mesures sur le procédé et les résultats de prédictions antérieures,
- **expliquer** causalement les résultats de ces simulations à l'opérateur.

“Expliquer causalement”, c'est présenter l'information calculée sur l'évolution future du procédé en utilisant des vocabulaires adaptés aux besoins de l'utilisateur et en



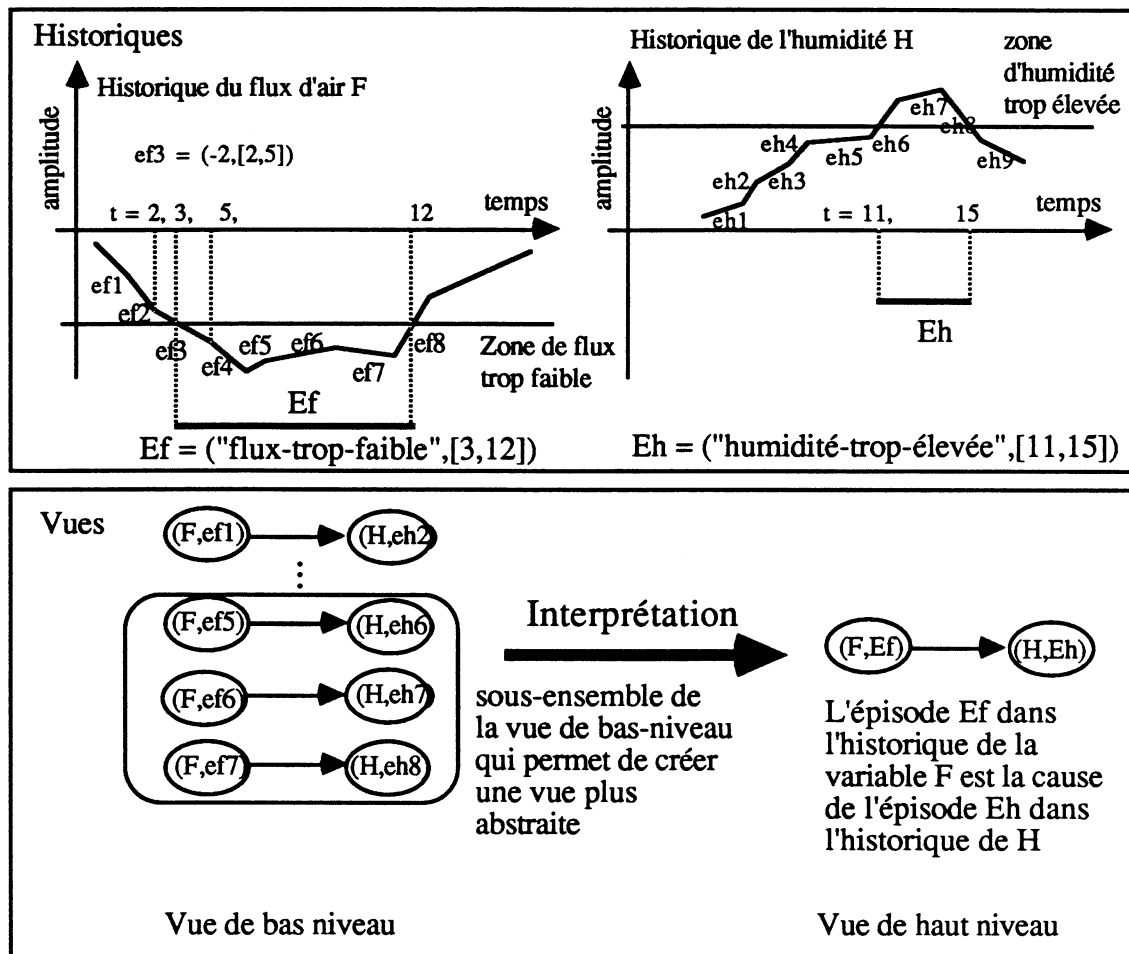


Figure 2.4 : Un exemple de vues. La vue de bas niveau est obtenue par simulation (ses épisodes décrivent une évolution par une pente, par exemple -2 sur l'intervalle de temps [2,5] pour l'épisode ef3) ; par interprétation, une vue plus abstraite est créée qui permet d'expliquer causalement l'existence de l'épisode décrivant une humidité trop élevée (Eh) par celle de l'épisode décrivant un flux d'air trop faible (Ef).

explicitant les relations temporelles qui lient les données présentées. En bref, c'est présenter en continu et de manière claire une norme de bon fonctionnement. Cela facilite donc le travail de supervision de l'opérateur, qui consiste justement à continuellement vérifier que le procédé se comporte "normalement". Mais il faut aussi que cela aide l'opérateur à prendre de bonnes décisions lorsque l'automatisation du procédé n'assure plus correctement ses fonctions.

Nous pensons qu'un système informatique construit autour d'un modèle unique ne permet pas de répondre aux besoins qui viennent d'être énoncés. En effet, le système ne peut alors manipuler des données qu'à un même niveau d'abstraction :

- Les systèmes de supervision classiques utilisent des représentations numériques et continues<sup>2</sup>. Les avantages et les inconvénients de ces systèmes sont bien connus (voir par exemple [Lei87]). Ils permettent de prédire de manière précise le comportement du procédé mais pas de l'expliquer, dans le sens qui a été donné plus haut.
- Les systèmes informatiques construits autour de représentations qualitatives ont été développés pour tenter de proposer à l'opérateur des données "intelligibles". L'étude bibliographique de la Physique Qualitative faite au premier chapitre a déjà permis d'entrevoir une partie des problèmes qui se posent pour un système qui utilise uniquement une représentation de ce type. Dans la suite de cette section, nous allons étudier ces problèmes de manière plus générale, en ne prenant pas pour exemple un vocabulaire qualitatif particulier, et en insistant particulièrement sur le problème de la connection à un système physique réel.

Considérons donc le problème de la supervision d'un système physique complexe grâce à un modèle qualitatif.

Pour pouvoir prédire le comportement du système physique sous la forme d'une vue, il faut d'abord être capable d'exploiter les données qui proviennent des capteurs du système. Le premier problème technique qui se pose est donc celui de l'analyse de données numériques pour construire un ensemble de conditions initiales qualitatives, dans un format exploitable par les techniques de simulation. Le deuxième problème est de définir un calcul qualitatif qui permette effectivement de simuler le comportement du système. La ou les vues obtenues après ces deux traitements doivent être connexes : il n'est pas possible d'ignorer une part quelconque de l'évolution d'une variable du modèle.

Mais on veut aussi que le système informatique explique ses résultats : il faut donc qu'un résultat de simulation soit une vue unique et non ambiguë. Cette contrainte se justifie par la nature de la tâche de supervision qui consiste à comparer l'évolution observée d'un système physique connu à une norme de bon fonctionnement. On verra facilement que cette norme perd de son intérêt si elle inclut l'ensemble des comportements physiques possibles du système surveillé. Connaître cet ensemble en fonction de conditions initiales particulières peut présenter un intérêt dans la phase de

---

<sup>2</sup>du moins pour les amplitudes des variables des modèles utilisés ; le temps quant à lui est discrétisé.

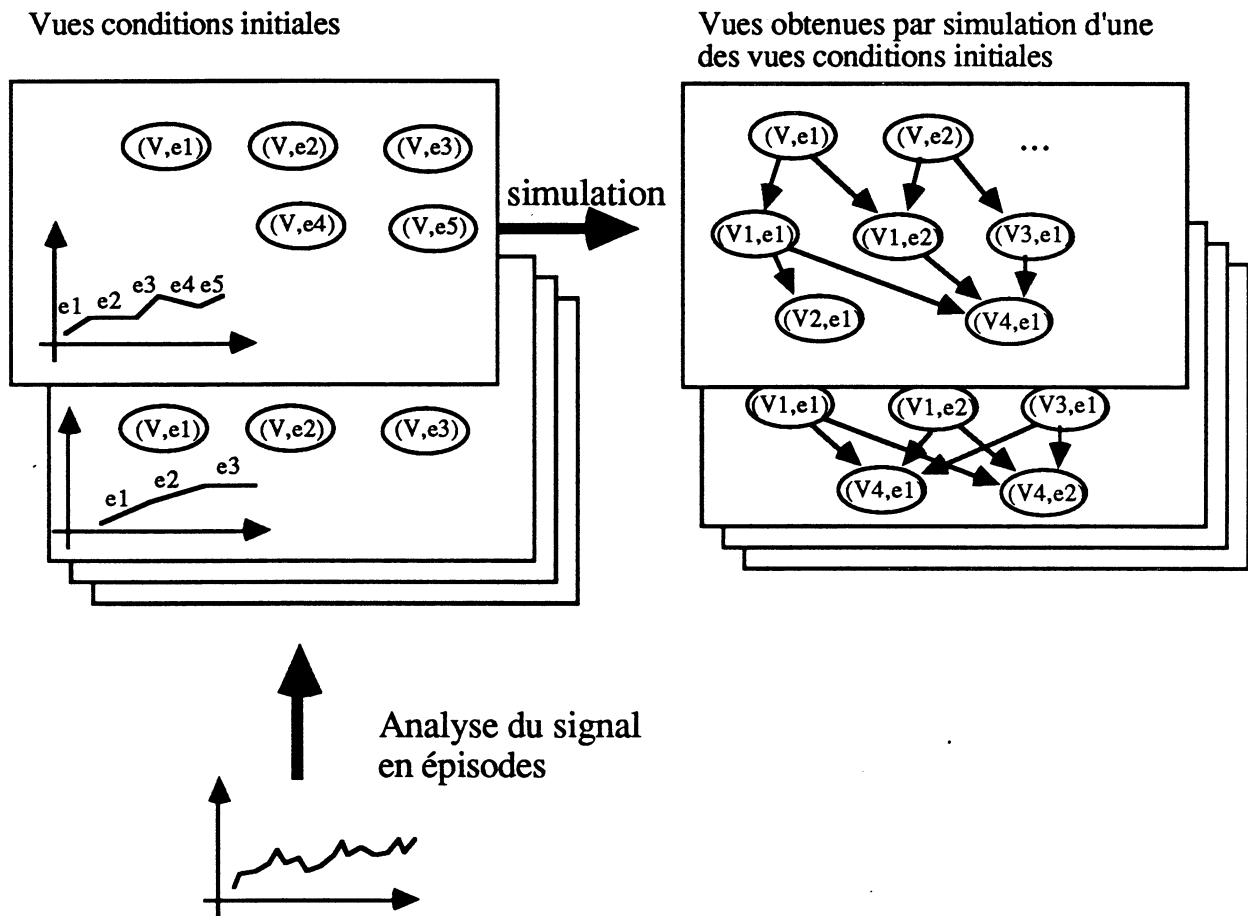


Figure 2.5 : Techniques pour le suivi d'évolution d'un système physique dans le cadre d'un modèle qualitatif unique. En général, il y a plusieurs décompositions possibles en épisodes d'un signal mesuré. Suivant la nature du calcul employé pour la simulation, plusieurs évolutions du système modélisé peuvent être prédites à partir d'un ensemble de conditions initiales obtenu depuis les mesures.

conception du système. L'ambiguïté pourrait alors être recherchée, à condition toutefois que tous les comportements prédits soient effectivement possibles, ce qui n'est par exemple pas le cas en Physique Qualitative.

En résumé, les vues produites par analyse des données provenant des capteurs puis par simulation doivent être connexes et non ambiguës. Comme la figure 2.5 le représente, ces deux techniques peuvent être source d'ambiguïté.

Pour répondre aux objectifs de prédiction et d'explication, une première solution à envisager est de choisir la présentation d'une seule des vues produites, quitte à revenir

```

temps := temps-courant ;
temps-début := temps-courant - période ;
analyse-courante := analyse de l'évolution sur [temps-début, temps] ;
Tantque vrai faire
Acquérir une nouvelle mesure ; (* le temps présent est (temps + période) *)
Si l'analyse de l'évolution sur [temps, (temps + période)] est différente de
l'analyse-courante alors
Créer le nouvel épisode  $E = (analyse-courante, [temps-début, temps])$  ;
temps-début := temps
finsi
temps := temps + période
finfaire;

```

Figure 2.6 : Décomposition séquentielle en épisodes d'une évolution mesurée.

sur ce choix si les données observées l'infirmement plus tard. Nous montrons dans une première partie que cette gestion de l'ambiguïté est impossible en pratique. Une deuxième manière d'aborder le problème peut consister à faire disparaître l'ambiguïté en contraignant suffisamment les traitements d'analyse de données et de simulation. Nous montrons dans une deuxième partie que cette approche n'est pas plus convaincante. Nous voyons en conclusion comment une approche multi-modèles apporte des réponses à certains de ces problèmes.

### 3.1.1 Gérer l'ambiguïté

Nous nous plaçons dans le cadre du suivi du comportement du système physique modélisé. La décomposition en épisodes des évolutions mesurées des variables d'un modèle est donc séquentielle, par un algorithme très simple du type de celui donné figure 2.6. Il faut remarquer que des critères différents de grossissement de région connexe peuvent être employés dans l'algorithme : dans l'exemple qui est donné le processus d'analyse, qui pose des problèmes complexes, n'est pas détaillé. Il peut devoir faire le choix entre plusieurs éléments du vocabulaire qui décrivent l'épisode ; mais le critère de création d'épisodes pourrait aussi être de faire grandir un épisode tant qu'il peut être associé à un élément du vocabulaire. Le problème de cet algorithme est bien sûr d'implanter un contrôle permettant un choix, lorsque deux décompositions sont possibles pour l'évolution de la variable pendant un même intervalle de temps.

A ces problèmes d'unicité de décomposition s'ajoutent ceux dus à l'ambiguïté du calcul

défini sur le vocabulaire qualitatif qui permet de lancer une simulation sur chaque vue connexe et non ambiguë construite par analyse des mesures. En bref, on obtient donc en général un arbre de comportements futurs du système modélisé.

Puisqu'il ne faut proposer qu'une seule vue à l'utilisateur du système, il faut donc faire des choix, quitte à devoir revenir sur ces choix lorsqu'il apparaît que la vue proposée ne correspond pas à l'évolution réelle du système modélisé.

Cette gestion ne paraît pas aisée pour les raisons suivantes :

- Les conditions du retour arrière doivent être déterminées par comparaison entre les vues construites par simulation et celles qui sont construites par analyse des mesures. En général, il va donc falloir comparer des ensembles de vues, ce qui semble irréalisable. Même s'il suffisait de comparer deux vues entre elles, si la comparaison entre les épisodes qui les composent est strictement syntaxique, chaque élément du vocabulaire qualitatif devra être indépendant (par exemple, un vocabulaire de description symbolique ne pourrait contenir à la fois "sin" et "cos" qui représentent la même fonction à un déphasage près). Cette contrainte impose un vocabulaire qualitatif très pauvre. Les techniques de comparaison devraient aussi inclure des critères temporels non triviaux : deux épisodes de même descripteur se chevauchant sont-ils "égaux" et pour quels types de recouvrements temporels ? Enfin, même si il est possible de décider qu'une vue prédite n'est pas en accord avec l'évolution réelle, cela ne donne aucune information particulière sur un éventuel point de retour arrière, soit dans la simulation, soit dans la décomposition en épisodes des évolutions de variables mesurées.
- L'implantation de techniques de retour arrière est difficile dans le cadre d'un système informatique censé donner des explications synthétiques, et non pas embrouiller l'utilisateur par une série de scénarios successifs pour une même évolution d'une variable (deux vues qualitatives différant d'un seul épisode peuvent conduire à une description de l'évolution globale du système complètement différente). La fréquence de ces retours arrière serait de plus probablement d'autant plus importante que le vocabulaire qualitatif choisi est pauvre. Dans ce cas les vues présentées à l'utilisateur seraient très peu stables au cours du temps.

### 3.1.2 Supprimer l'ambiguïté

En choisissant un vocabulaire qualitatif dont les éléments sont indépendants, et qui permette néanmoins de qualifier toute évolution de variable<sup>3</sup>, le problème de l'ambiguïté

<sup>3</sup>C'est une nécessité de **base** pour la décomposition d'évolutions en épisodes.

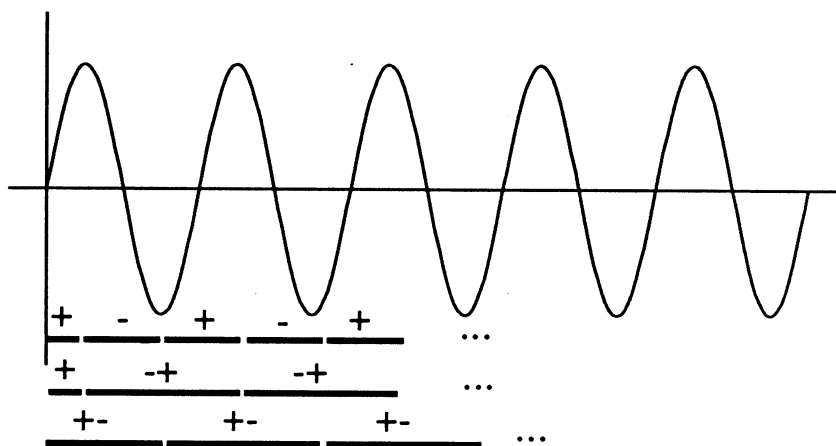


Figure 2.7 : Diverses décompositions en épisodes d'un signal lorsque le vocabulaire de description choisi ne définit pas une "base".

de la décomposition en épisodes est évité. A titre d'exemple, l'évolution représentée figure 2.7 est une simple sinusoïde et le vocabulaire utilisé est  $\{+, -, 0, +-, -+\}$  qui décrit l'évolution en termes de croissance. Dans ce cas, il n'est pas possible d'obtenir une analyse unique simplement parce que le vocabulaire ne définit pas une "base" pour l'analyse des données provenant des capteurs : les éléments  $+ -$  et  $- +$  peuvent s'exprimer en fonction des éléments  $+$  et  $-$ . Mais si le vocabulaire est restreint à  $\{-, 0, +\}$  alors la décomposition est unique.

Il faut donc que le vocabulaire contienne des éléments suffisamment élémentaires pour que toute évolution puisse être décomposée en épisodes qui utilisent ce vocabulaire. Mais d'un autre côté, on voit mal comment des éléments plus complexes pourraient exister sans être exprimables en fonction des éléments plus simples. Ceci a une interprétation fréquentielle assez claire : la décomposition en épisodes de toute évolution un tant soit peu complexe<sup>4</sup> se ferait dans ce cas à une fréquence très proche de la fréquence d'échantillonnage choisie.

D'un autre côté, il est possible de rappeler brièvement les problèmes soulevés par la définition d'un calcul utilisant un vocabulaire qualitatif dans un but de simulation. Il faut pouvoir simuler l'évolution d'un système dont on dispose d'un modèle qualitatif, quelles que soient les conditions initiales. Pratiquement, ce besoin de généralité im-

<sup>4</sup>En pratique, une évolution perçue est généralement bruitée; si la décomposition est faite en utilisant un vocabulaire de bas niveau, il est probable qu'elle inclura le bruit, en suivant donc une fréquence proche de la fréquence d'échantillonnage.

plique une définition des opérateurs du calcul qualitatif qui soit fortement inspirée du calcul sur  $R$ . Effectivement, dans la majorité des domaines d'application du raisonnement qualitatif, les systèmes dynamiques étudiés peuvent être modélisés par des paramètres quantifiables sur  $R$  et souvent mesurables ou observables<sup>5</sup> : les outils d'analyse classiques permettent de simuler ces systèmes efficacement, dans la mesure de la finesse du modèle utilisé. On voit donc mal quels outils pourraient être définis hors de ce cadre tout en permettant d'implanter un calcul performant. Il serait en effet surprenant qu'un homomorphisme existe entre les structures quantitatives et qualitatives. Le meilleur exemple qui puisse être pris pour étayer cette affirmation est celui du vocabulaire  $\{-, 0, +\}$  de la Physique Qualitative, qui n'a pas spécialement été construit pour répondre à des besoins spécifiques d'explication, mais plutôt comme une version dégradée du calcul classique sur  $R$ . Il suffit de prendre le cas de l'addition pour voir que l'affirmation

$$\forall x, y \in R, I(x + y) = I(x) +_{\text{qualitatif}} I(y)$$

est fausse<sup>6</sup> en général (La fonction  $I$  est dans cas un simple test de signe).

En pratique, il paraît donc difficile de définir un calcul non ambigu. Une solution consiste à introduire un élément dans le vocabulaire qui représente l'évolution indéterminée. Cet élément est absorbant pour toutes les lois du calcul. La capacité de simulation du système est alors très faible (cf l'étude bibliographique de la physique qualitative du premier chapitre).

### 3.1.3 Conclusion

L'emploi de plusieurs modèles permet d'éviter une grande partie de ces écueils. La figure 2.8 présente le cadre du suivi de l'évolution d'un système physique lorsque plusieurs modèles sont employés. Il est possible d'adopter une représentation numérique classique dans un modèle de "bas niveau" qui permet aux techniques de décomposition en épisodes et de simulation de construire des vues connexes et non ambiguës. Des modèles qualitatifs permettent alors d'avoir des points de vue particuliers sur l'évolution d'un système, par exemple en s'intéressant uniquement à une amplitude

---

<sup>5</sup>ces paramètres peuvent être évalués indirectement par résolution d'un système

<sup>6</sup>Elle devient vraie si on remplace  $=$  par  $\subseteq$  ; cela ne ferme donc pas complètement la porte à la définition de calculs dans des structures qualitatives, pour certains types d'applications, comme la conception, et en prenant suffisamment de précautions pour ne pas tromper l'utilisateur du système informatique.

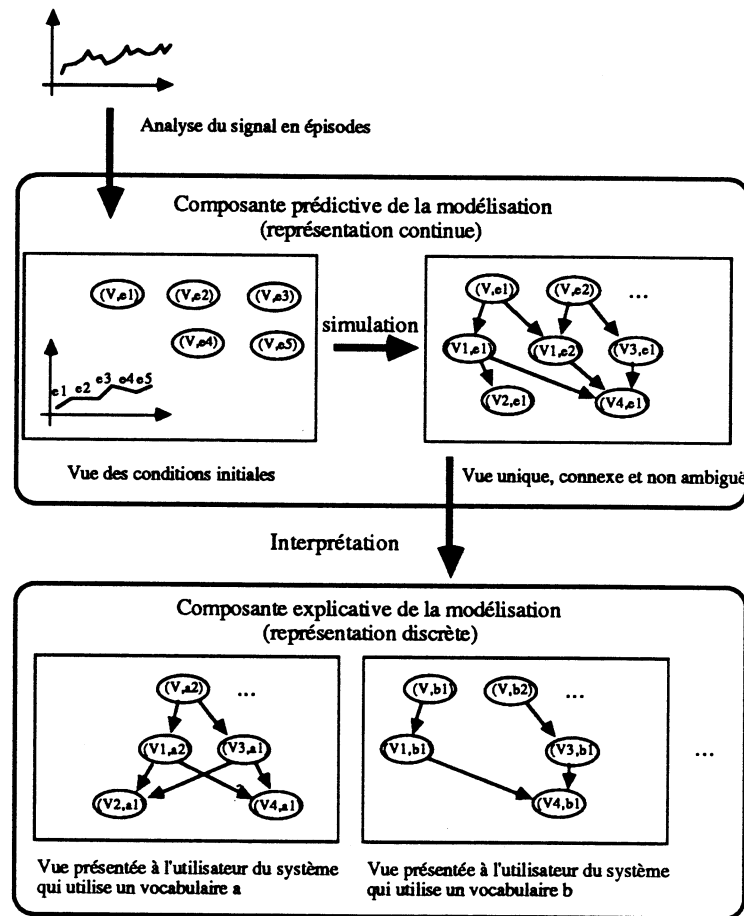


Figure 2.8 : Le suivi avec une approche multi-modèles. La composante continue de la modélisation permet de simuler le comportement du système modélisé sans ambiguïté à partir des mesures ; en utilisant des vocabulaires discrets de description d'évolutions, il est possible de présenter à l'utilisateur des explications partielles mais qui sont adaptées à ses besoins de prise de décisions.

discrétisée des évolutions des variables, ou à la courbure des évolutions, etc. Il est clair qu'en général il n'est pas possible d'expliquer l'évolution complète du système par des relations causales entre des épisodes à un tel niveau de description. Les vues ne sont pas connexes. L'interprétation spécifie le cadre et les techniques de passage entre vues exprimées depuis des modèles différents.

Finalement, notre approche tente de réaliser un pont entre des techniques de modélisation qui permettent de décrire précisément les évolutions d'un système physique mais sans pouvoir l'expliquer automatiquement, avec des techniques qui ont



les propriétés opposées. Nous sommes convaincus que l'incapacité actuelle des langages de programmation de coder des lois en des programmes qui aient à la fois un caractère prédictif et explicatif est la cause réelle de bien des problèmes de modélisation. Un programme permet de coder des modèles numériques qui décrivent plus ou moins exactement le comportement du système modélisé. Mais pour expliciter et exploiter l'information calculable depuis le modèle, il faut programmer des sorties, des "traces", au milieu des instructions de calcul. Or la thèse que nous soutenons est que ce problème ne se limite pas à l'ajout d'instructions d'entrée-sortie à des programmes existants. C'est probablement le problème de fond de l'automatisation de systèmes physiques complexes, comme les procédés industriels, ou les avions de ligne modernes. Si des hommes n'arrivent parfois pas à comprendre les raisons du comportement d'un système automatisé, c'est parce que les programmes ne peuvent pas lui donner des explications sur les résultats obtenus. Ils le peuvent d'autant moins qu'ils implantent des modèles complexes, c'est-à-dire qu'ils donnent de manière plus générale l'ensemble des évolutions possibles du système modélisé. Il est par exemple frappant de constater qu'un modèle à fonctions de transfert ne permet pas de représenter les états inobservables et ingouvernables d'un système parce qu'il s'agit d'une représentation orientée, qui détaille des relations de cause à effet entre variables ; une représentation d'état permet de représenter ces modes, mais par son mode de représentation matriciel, elle se prête beaucoup moins à une programmation assurant une traduction des résultats produits dans un langage adapté aux besoins de l'utilisateur.

René Thom pousse ce type d'argumentation très loin dans un article publié dans l'*Encyclopaedia Universalis* ([Tho85]). Nous nous garderons de commenter ce jugement, pour n'avoir perçu qu'une infime partie du problème, à travers l'application décrite dans cette thèse :

"... Si, par la mécanique de Galilée, on gagne une description précise du mouvement des corps matériels, par contre on perd toute connaissance de la cause de ces mouvements, de la stabilité des corps matériels, de leur naissance et de leur corruption : tous aspects dont s'occupait la physique d'Aristote qui faisait corps avec sa logique. Avec Galilée, on gagne en précision certes, mais au prix d'un divorce radical entre le formalisme mathématique et le formalisme verbal de la langue naturelle ; on a été amené, dans cette optique, à rejeter comme non scientifiques - métaphysiques - les questions sur la stabilité des choses que soulevait la physique d'Aristote et, désormais, l'explication scientifique se présentera toujours en un double texte : un texte en langue vernaculaire décrivant le système considéré, sa préparation, et une formalisation mathématique

décrivant son mouvement. C'est de cet hiatus fondamental qu'est sortie l'ambiguïté du "progrès" scientifique moderne.

... Car il faut le dire, ce qui compte dans un modèle, ce n'est pas son accord avec l'expérience, comme le croit un positivisme naïf, mais, au contraire, sa portée ontologique, ce que le modèle affirme sur les mécanismes sous-jacents au processus étudié. Quelle que soit la phénoménologie, il est toujours possible de trouver un modèle quantitatif qui en rende compte au prix d'introduire quelques constantes arbitraires qui permettent d'adapter l'équation à la donnée empirique. C'est seulement l'économie de la description qui est le vrai critère de l'efficacité du formalisme, et cette économie - à moins d'un hasard heureux pratiquement jamais réalisé - provient toujours d'une hypothèse, c'est-à-dire d'une représentation mentale partielle des phénomènes étudiés."

### 3.2 Les conditions de passage entre vues depuis des modèles

Une interprétation a été définie comme l'application qui associe à toute vue une vue plus abstraite. La relation "plus-abstraite" est elle-même définie à l'aide d'un critère purement temporel. Une vue est plus abstraite qu'une autre si pour toute relation causale qu'elle donne entre deux épisodes il est possible de trouver dans l'autre vue un ensemble de relations causales qui décrivent la même relation de manière plus précise. Cette définition est volontairement peu contraignante. En particulier, il n'est pas fait mention de la nature des vocabulaires des vues liées par la relation.

En général le passage d'une vue à une vue plus abstraite est possible grâce à un changement de vocabulaire. Il y a alors changement de modèle. Le cas typique est celui du passage d'un vocabulaire infini à un vocabulaire fini.

Mais la définition englobe aussi les interprétations de vues au sein d'un même modèle qui sont obtenues à des niveaux de résolution différents. Effectivement, il est très courant de raisonner qualitativement sur l'évolution d'un système en distinguant des phénomènes observables à des fréquences différentes sur une même variable. Ainsi, en conduite de procédé, un phénomène comme une perturbation en amplitude brusque d'une variable peut être aussi pertinent qu'une oscillation de la même variable pendant une longue période. La figure 2.9 illustre cette idée de manière très simple : le système représenté est constitué de deux circuits électriques identiques comprenant un condensateur et une bobine<sup>7</sup>. A l'instant initial, un des condensateurs porte une charge  $q$ .

---

<sup>7</sup>Ce système est uniquement choisi comme illustration ; il n'entre pas dans la catégorie des systèmes

Dans le cas d'un couplage faible, les fonctions de variation de la charge aux bornes du condensateur sont données par

$$\begin{aligned} q_1 &= q \cos \omega t \cos \frac{\omega K}{2} t \\ q_2 &= q \sin \omega t \sin \frac{\omega K}{2} t \end{aligned}$$

où  $K$  est le coefficient de couplage. L'allure des courbes obtenues est donnée figure 2.9. L'évolution est le produit de deux sinusoides de fréquences différentes. Si on s'intéresse à la fréquence la plus faible, l'interprétation qualitative de ce signal est que l'énergie passe périodiquement d'un circuit à l'autre. Mais si on s'intéresse à la fréquence la plus élevée, l'interprétation devient que sur un circuit, l'énergie passe de la bobine au condensateur. Effectivement ces deux phénomènes coexistent au sein de l'évolution du système. Suivant le but d'un raisonnement portant sur cette évolution, l'attention peut être focalisée sur l'un, l'autre, ou les deux phénomènes.

Enfin, une hypothèse importante est de considérer qu'une vue s'obtient depuis un modèle. Techniquement, rien n'empêche en effet de lier causalement des épisodes décrits par des vocabulaires différents. Mais, outre les problèmes d'ordre combinatoire, il est peu probable que de telles relations aient une sémantique très claire ; comme la donnée du graphe du modèle, un vocabulaire permet d'obtenir un point de vue particulier mais homogène sur l'évolution d'un système.

### 3.3 Comparaison avec l'approche de "l'ordonnement causal"

Il est intéressant de noter que l'approche de modélisation proposée commence là où la technique d'ordonnement causal de H. Simon et Y. Iwasaki [IS86a] s'arrête. Leur problème est en effet d'orienter une structure symétrique de relations entre variables (un système d'équations linéaires par exemple) en fonction des variables d'entrée, c'est-à-dire de celles dont on fixe les valeurs comme étant des constantes pour le système modélisé. La structure obtenue est un graphe orienté. Mais rien n'est proposé pour interpréter par l'ordonnement causal obtenu les résultats fournis par la résolution numérique du système.

La méthode présentée ici n'automatise pas la production du graphe orienté. Une

---

dynamiques modélisés ici, car il est autonome (son évolution est complètement déterminée par les conditions initiales) et donc peu intéressant pour valider un système de supervision ...

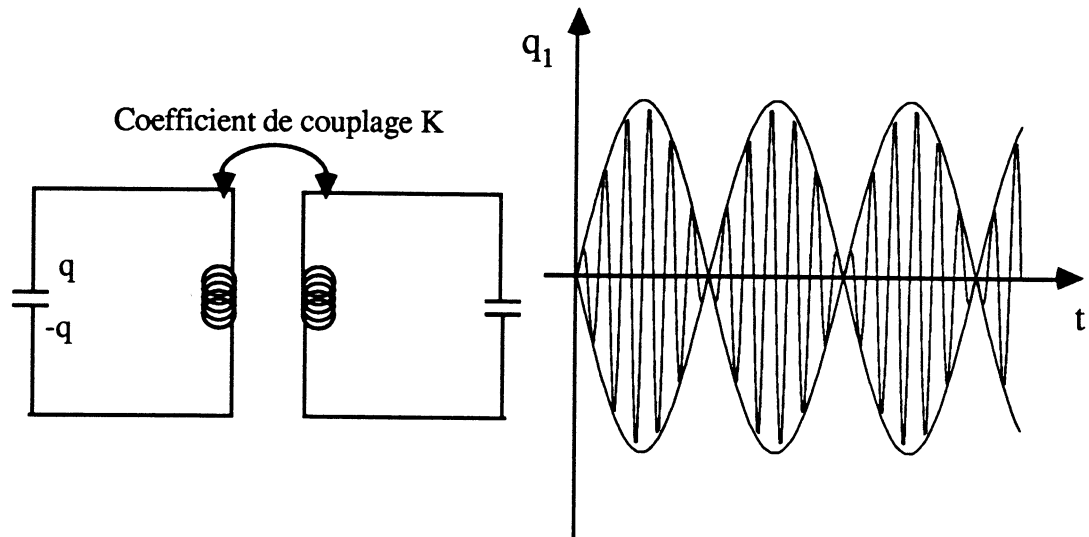


Figure 2.9 : Une illustration de la notion de Résolution Qualitative.

fois dépassé ce stade de modélisation abstraite et symbolique, tout le travail consiste à :

- Trouver un modèle différentiel qui permette de connaître les types de formes d'évolution des différentes variables d'un modèle, et de pouvoir les calculer effectivement (simulation).
- Créer des liens entre les vues obtenues avec d'autres vues plus abstraites, qui correspondent mieux aux besoins de compréhension de l'utilisateur du système (interprétation).



---

---

## Chapitre 3

### Le raisonnement qualitatif. Une étude de cas.

---

---

*Ce chapitre présente les premiers résultats obtenus dans la direction de recherche que nous avons suivie. A une exception près qui est signalée, tous les outils informatiques décrits ont été implantés et testés dans le cadre d'une application à l'aide à la supervision d'un procédé continu.*

*La première section décrit les différents vocabulaires utilisés pour la construction de modèles. Dans la deuxième section, nous décrivons les techniques de modélisation et de calcul de la dynamique du système physique supervisé. Ces techniques permettent de construire des vues par simulation. Un exemple est donné en section 3 de leur utilisation pour modéliser un système dynamique simple, un circuit RC. Puis, en section 4, les limites des techniques de modélisation implantées sont discutées.*

*Les deux sections suivantes sont consacrées à la présentation de techniques de simulation et d'interprétation de vues. Une dernière section résume les points techniques de l'implantation.*

#### *Guide de Lecture*

*En lecture rapide on pourra lire le résumé des choix techniques de l'implantation (section 7) puis l'exemple du circuit RC (section 3).*

*Les sections consacrées aux techniques de simulation et d'interprétation pourront être ignorées en première lecture.*

## 1 Les différents vocabulaires employés

La question du choix du vocabulaire d'un modèle est importante dans la démarche de modélisation du raisonnement qualitatif. Les techniques de raisonnement qualitatif que nous proposons n'ont pas pour objectif de créer de nouveaux outils de prédiction du comportement de systèmes dynamiques. Leur but est de permettre une traduction de résultats obtenus grâce à des modèles qui représentent de manière suffisamment complète le comportement du système physique modélisé, étant donné un but à satisfaire (par exemple le contrôle du système physique). Cette traduction doit fournir à l'utilisateur des données qui soient facilement utilisables. Pour cela, elles doivent avoir une forme proche des connaissances qui sont employées par l'utilisateur dans ses raisonnements sur l'évolution du système physique.

Un choix de vocabulaires de description d'évolutions est bien sûr complètement lié au type d'application que l'on veut réaliser. Dans notre cas, il s'agit d'un système d'aide à l'opérateur pour la supervision de procédés continus. Dans ce cadre, les modélisations développées utilisent les vocabulaires suivants :

- Un vocabulaire infini, qui est  $\mathfrak{R}$ .

Les modèles de systèmes physiques dynamiques qui ont été développés au cours de ce travail sont des modèles de procédés industriels continus. Nous avons supposé, en première approximation, que toutes les données disponibles sur l'évolution du procédé sont des **mesures** de grandeurs physiques. Il est raisonnable de penser que la plupart des variables élaborées liées à la conduite d'un procédé (profit, sécurité, etc) peuvent de même être quantifiées numériquement (il existe néanmoins des procédés où certaines grandeurs sont quantifiées de manière non numérique, par exemple, dans un four à chaux, la couleur de flamme, ou l'aspect intérieur du four).

Un épisode approxime une évolution de variable entre deux mesures par un segment de droite. Son descripteur est le réel représentant la pente du segment. Cette représentation très simple d'évolutions est utilisable par des techniques de simulation qui permettent de prédire le comportement du procédé.

- Un vocabulaire fini de description de zones d'évolutions.

La tâche principale d'un opérateur comme celle d'un système de supervision est de surveiller que le procédé se comporte correctement. Ce problème est simplifié en séparant les amplitudes continues d'évolution des grandeurs physiques surveillées en ensembles finis d'intervalles contigus. Ces ensembles comprennent généralement une zone d'évolution nominale, des zones de pré-alarmes et des

zones d'alarmes. En pratique, le vocabulaire est un ensemble de chaînes de caractères qui nomment ces zones. Les zones de pré-alarmes permettent de graduer l'importance de l'intervention éventuelle de l'opérateur, d'anticiper le traitement d'une anomalie qui peut évoluer sans cela jusqu'à une situation dangereuse pour le procédé et l'apparition d'une "vraie" alarme.

Ce type de représentation est statique car adapté à un point de fonctionnement précis du procédé. Il peut donc être difficile à gérer lors des évolutions transitoires qui s'accompagnent d'un changement de modèle et donc au moins d'une mise à jour des valeurs des bornes des zones d'évolutions. Les opérateurs peuvent négliger de faire cette mise à jour sur certaines grandeurs surveillées ce qui entraîne l'apparition de fausses alarmes, déterminées depuis un point de fonctionnement qui n'est plus le bon.

Cette représentation discrète est utilisée pour présenter à l'opérateur les explications des évolutions des variables du modèle. Mais elle détermine aussi le comportement du système informatique implanté, en permettant d'associer des traitements aux franchissements de zones d'évolutions (cf le chapitre 5 qui décrit l'architecture du système de supervision développé). Il faut donc souligner l'importance du choix de valeurs numériques précises pour les seuils des zones d'évolution des variables. Effectivement, le comportement général du système de supervision peut être instable si ses traitements, comme la recherche de conseils d'actions à proposer à l'opérateur, sont lancés d'après la position précise des variables dans leurs zones d'évolution. Ce serait par exemple le cas si l'évolution d'une variable est oscillante autour d'un seuil d'alarme. L'utilisation de zones de pré-alarmes permet dans une certaine mesure d'éviter des analyses de type "tout ou rien" en graduant la nature des traitements effectués suivant la pré-alarme active.

- Un vocabulaire fini de formes d'évolutions.

Un vocabulaire de description de formes d'évolutions permet de qualifier la dynamique du comportement d'une variable du modèle. Ainsi, on peut vouloir caractériser la dynamique du signal par le signe de sa courbure. Des algorithmes permettent d'obtenir ces vues à des résolutions variables depuis des vues résultant de simulations (cf la section 6). Néanmoins nous ne les avons pas implantés, parce-que le cadre d'utilisation de ce vocabulaire n'est pas encore clairement défini.



## 2 Modélisation de la dynamique d'un système physique

### 2.1 Introduction

Un modèle permettant la simulation d'un système physique est composé :

- d'un graphe orienté dont les nœuds sont les variables qui décrivent les grandeurs surveillées du système et les arcs les liens causaux qui existent entre ces grandeurs.
- d'un vocabulaire de description d'évolutions qui est  $\mathfrak{R}$ .

Pour pouvoir créer des vues par simulation, il faut développer des outils de calcul qui soient compatibles avec une représentation par graphe orienté, par exemple en attachant à tout arc du modèle une procédure qui permette de calculer l'évolution de la variable terminale de l'arc en fonction de celle de la variable initiale (quand la variable terminale admet plusieurs arcs en entrée, il ne s'agit que d'une description partielle de l'évolution). De tels outils existent depuis longtemps en automatique, ce sont les Fonctions de Transfert. Par référence à ce domaine, nous appelons Fonctions de Transfert Qualitatives<sup>1</sup> (FTQs) les procédures qui sont attachées aux arcs d'un modèle dans un but de simulation.

Ces procédures permettent de calculer comment les évolutions des variables sont causalement liées, par inférence d'épisodes. En admettant comme paramètre un épisode  $E$  de la variable initiale d'un arc, une FTQ permet d'inférer un ensemble d'épisodes qui décrivent l'influence de  $E$  sur l'évolution de la variable terminale de l'arc. Avec un mécanisme de sommation dans le temps des épisodes inférés, cette technique est suffisante pour obtenir une vue dans le cadre d'un modèle à partir d'une vue condition initiale. Ainsi, contrairement à une équation différentielle, ou à une fonction de transfert, une FTQ ne donne pas qu'une relation générale entre des évolutions, mais des relations entre des épisodes de ces évolutions.

Les FTQs permettent de coder des types de transferts bien connus du système ou de la classe de systèmes dynamiques modélisés. En effet, il est possible pour beaucoup de tels systèmes de connaître a priori la forme des évolutions possibles d'un certain nombre des grandeurs physiques auxquelles on s'intéresse. L'existence de ces connaissances a priori permet aussi le choix d'un vocabulaire adapté à leur expression. Par

---

<sup>1</sup>L'adjectif qualitatif est utilisé ici par abus de langage ; les FTQs permettent de construire des vues à partir de modèles qui ne sont pas qualitatifs. Mais ces vues sont facilement interprétables en vues qualitatives (cf la section 6).

exemple, un bon nombre d'évolutions de procédés industriels peuvent être approximées par les solutions d'équations différentielles simples, comme les comportements exponentiels, oscillants, oscillants amortis, etc. Cette connaissance n'est pas simplement contextuelle : elle permet de qualifier la nature des relations liant certaines variables, et donc de décrire de manière générale le type d'évolution des variables influencées (ou "de sortie") en fonction du type d'évolution des variables causes (ou "d'entrée").

D'un point de vue informatique, l'implantation d'un modèle est à la fois déclarative et procédurale. Le graphe est codé grâce à un langage très simple qu'il n'est pas utile de détailler. Le langage permet d'associer à chaque arc des paramètres temporels, le retard pur et le temps de réponse, et un gain, qui sont utilisés par la FTQ attachée à l'arc. L'utilisateur dispose pour construire un modèle, d'une bibliothèque de FTQs. Cette démarche de modélisation est du ressort des ingénieurs de production du procédé. Les FTQs sont programmées par des automaticiens, de manière à coder suffisamment de types de transferts pour pouvoir approximer de manière correcte un grand nombre de procédés continus. La section qui suit détaille le cadre de programmation des FTQs.

## 2.2 Fonctions de Transfert Qualitatives

Nous ne considérons ici que les épisodes à vocabulaire dans  $\mathfrak{R}$ . Une FTQ est une fonction de l'ensemble  $E$  des épisodes dans  $E^n$

$$FTQ : e_i \implies \{e'_j\}_{j \in [1,n]}$$

qui à partir d'un épisode  $e_i$  d'une variable  $X$  permet d'inférer un n-uplet d'épisodes  $\{e'_j\}_{j \in [1,n]}$  d'une variable causalement liée  $Y$ . Cet ensemble décrit l'influence de  $e_i$  sur  $Y$ , ou encore l'évolution partielle de  $Y$  due à  $e_i$ . Les  $\{e'_j\}$  sont donc exprimés dans un cadre relatif, par une simple pente. Toute variable s'écrit comme la somme au cours du temps de tous les épisodes inférés et propagés depuis l'ensemble de ses variables d'entrée. Il existe ainsi un cadre unique de représentation des évolutions des variables et des influences causales entre ces mêmes variables. La figure 3.1 illustre la propagation d'épisodes effectuée par une FTQ<sup>2</sup>.

Les FTQs forment l'outil de base de la simulation. Pour rappel, une simulation est une application qui permet d'étendre le domaine temporel d'une vue donnée comme

---

<sup>2</sup>Dans cet exemple, ainsi que dans tous ceux qui suivront, les influences propagées dans le journal d'une variable sont représentées sous la forme de fonctions continues, ce qui permet de mieux se les représenter (en toute rigueur ce ne sont que des ensembles d'épisodes décrits uniquement par des pentes, qu'il faudrait décrire comme autant de segments de droite de début d'amplitude nulle).

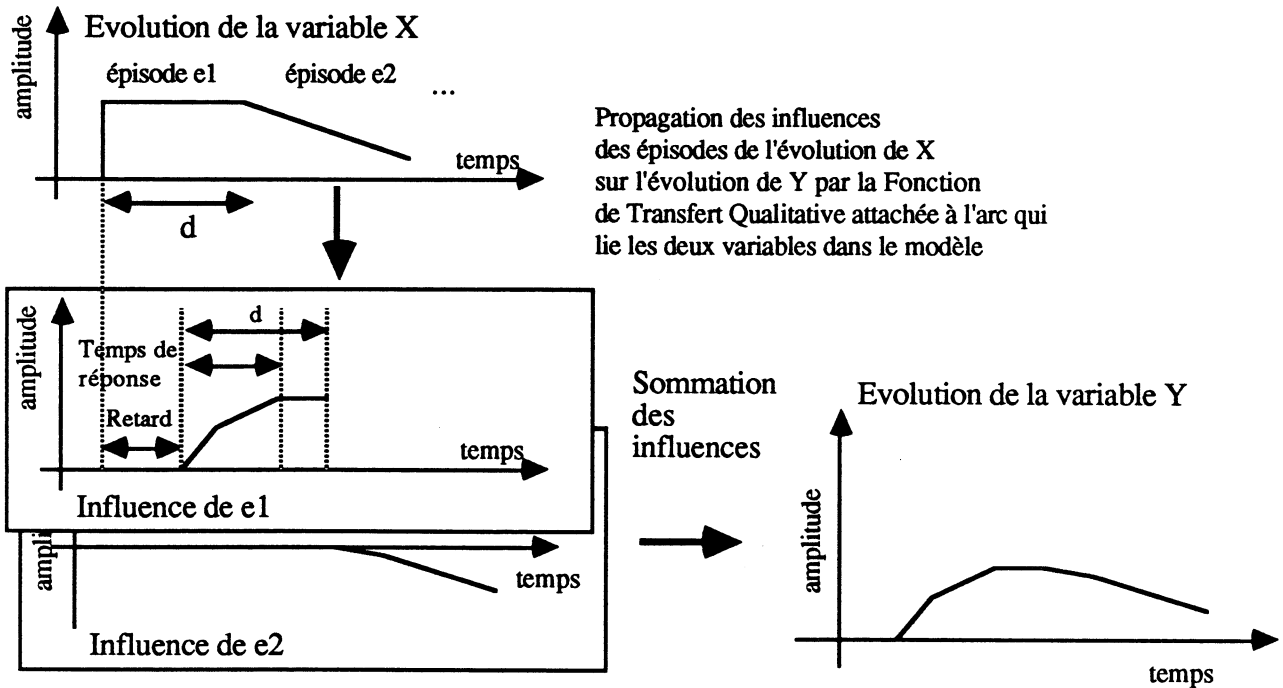


Figure 3.1 : Episodes et influences. L'évolution de la variable X est décomposée en deux épisodes  $e_1$  et  $e_2$ . L'influence de  $e_1$  est composée de trois épisodes ; elle débute à la date de début de  $e_1$  plus le retard de l'arc liant X à Y. Les deux premiers épisodes décrivent l'influence pendant une durée égale au temps de réponse, c'est-à-dire jusqu'à ce que la valeur finale de l'influence soit atteinte. La durée de l'influence ( $d$ ) est égale à celle de l'épisode qui en est la cause. L'évolution complète de la variable Y peut être intégrée en sommant les influences propagées depuis les épisodes  $e_1$  et  $e_2$ .

condition initiale, en rendant une vue connexe et non ambiguë dont la vue initiale est un sous-graphe. Les deux sections qui suivent sont consacrées aux conséquences des contraintes de connexité et de non ambiguïté sur l'écriture des FTQs.

### 2.2.1 La contrainte du calcul de vues connexes en simulation

La vue initiale, construite à partir des mesures acquises sur le procédé, est connexe. D'après la définition 4, une condition nécessaire et suffisante à la connexité des vues obtenues en simulation est donnée par :

1. Toutes les FTQs doivent transformer tout ensemble connexe d'épisodes en un autre ensemble connexe d'épisodes.

2. Pour toute variable mesurée, l'intervalle temporel de l'épisode construit depuis les mesures (qui appartient à la vue initiale) admet une intersection non vide avec l'intervalle temporel défini par l'union des épisodes propagés sur la variable.

Les techniques de sommation d'épisodes inférés et propagés sur une variable ne font subir aucune transformation au domaine temporel des épisodes sommés (voir l'algorithme donné dans la section 5.3).

Une condition suffisante pour satisfaire le premier critère est que l'ensemble des  $e'_j$  réponde aux conditions suivantes :

(1) Les  $e'_j$  forment une suite d'épisodes contigus.

$$(2) \text{durée}(e_i) = \sum_{j=1}^n \text{durée}(e'_j)$$

$$(3) \text{début}(e'_1) = \text{début}(e_1) + \text{retard}$$

le retard étant une des contraintes temporelles attachées à chaque arc du modèle<sup>3</sup>. La seule transformation appliquée à un intervalle temporel par une FTQ est alors une translation. Suivant la durée de l'épisode  $e_i$ , le n-uplet de  $e'_j$  pourra contenir plus ou moins d'éléments. Cette décomposition de l'influence d'un épisode unique ne se fait que lorsque sa durée excède celle de constantes temporelles importantes, représentatives de la dynamique de la relation causale liant deux variables (comme la constante de temps  $\tau$ , le temps de réponse d'une fonction de transfert, etc). Si la durée de l'épisode d'entrée  $e_i$  est inférieure à ces constantes, l'influence calculée par une FTQ ne dégagera pas plusieurs types d'évolution et sera donc constituée d'un seul épisode.

Pour discuter de la satisfaction du deuxième critère assurant la connexité des vues, supposons que pour toutes les variables mesurées, la période mesurée débute à un temps  $T_d$  et finisse à un temps  $T_f$ . Considérons une variable mesurée  $X$  quelconque. Si aucun épisode n'a été propagé sur  $X$ , son historique n'est composé que de l'évolution mesurée, qui est connexe. Dans le cas contraire, l'intervalle temporel de définition de

<sup>3</sup>Remarque : lorsque les durées des épisodes tendent vers zéro, une FTQ tend vers une simple fonction qui à un réel associe un autre réel. Dans ce cas, on retrouve un résultat connu de topologie selon lequel une c.n.s. pour qu'une fonction transforme un ensemble connexe en un ensemble connexe est qu'elle soit continue ; c'est bien le cas de la fonction de calcul de la date de début de l'influence inférée. Mais cette remarque n'est pas généralisable, parce que notre définition de la connexité repose sur une continuité définie par la "distance"

$$d((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \text{Max}(0, x_1 - y_2, x_2 - y_1)$$

qui ne vérifie pas l'inégalité triangulaire

la réunion des épisodes propagés sur  $X$  admet une date de début,  $T_i$ . En se plaçant dans l'hypothèse de la non-ambiguïté d'une vue, il existe un unique nœud  $N$  dans la vue produite par la simulation tel que :

$$\begin{aligned} VQ(N) &= X \\ T_i &= \text{début}(E(N)) \end{aligned}$$

Il est clair que  $T_i$  est égal à  $T_d$  plus le minimum  $S$  des sommes des retards des arcs pour tous les chemins menant d'un nœud de la vue qui est associé à un épisode mesuré jusqu'à  $N$ . Il est possible que

$$T_d + S > T_f$$

auquel cas l'historique de  $X$  n'est pas connexe. Mais  $S$  est une quantité finie, et au bout d'un nombre fini d'acquisitions de mesures sur  $X$ , l'intervalle défini par la période mesurée de la variable finira par avoir une intersection non vide avec l'intervalle défini par la période prédite.

Pour le modèle entier, ce temps de construction d'une vue connexe<sup>4</sup> est égal au maximum pour toutes les variables mesurées  $X$  des minima des sommes des retards sur les chemins élémentaires<sup>5</sup> menant des autres variables mesurées à  $X$ .

### 2.2.2 La contrainte du calcul de vues non ambiguës en simulation

Les épisodes modélisent l'évolution des variables entre deux mesures par un segment de droite. Fusionner des épisodes propagés sur une variable depuis différentes variables d'entrée revient à :

- Partitionner l'ensemble connexe des épisodes propagés en une suite d'épisodes contigus, par calcul des plus petites (au sens de l'inclusion) intersections entre les épisodes propagés. On obtient ainsi, par construction, une vue non ambiguë (cf l'algorithme décrit dans la section 5.3 qui décrit en détails ce processus).
- La pente de tout épisode  $E$  associé à un nœud  $(X, E)$  de la vue est calculée par sommation des pentes des épisodes propagés sur la variable  $X$  qui contiennent  $E$ . Ce calcul n'introduit bien sûr aucune ambiguïté.

La non-ambiguïté des vues obtenues en simulation est donc assurée par les algorithmes de gestion des épisodes inférés par les FTQs.

<sup>4</sup>C'est le problème général de l'obtention de conditions initiales suffisantes pour pouvoir prédire le comportement d'un système dynamique.

<sup>5</sup>Un modèle peut contenir des circuits.

```

Procédure FTQ (arguments);
(* ces arguments sont : var ei :épisode; var retard-pur,temps-de-
réponse : réel;... *)
Début
Suivant la durée de ei
cas1 : renvoyer e'1 tel que e'1 = f1(arguments);
cas2 : renvoyer {e'1, e'2} tel que e'1 = f1(arguments) et e'2 = f2(arguments);
:
casn : renvoyer {e'j}j∈[1,n] tel que pour j ∈ [1, n] e'j = fj(arguments)
Fin
Fin;

```

Figure 3.2 : Structure d'une FTQ.

### 2.2.3 Implantation des FTQs

Le rôle d'une FTQ est de fournir une approximation linéaire par morceaux (une suite d'épisodes contigus) d'une fonction solution de l'équation différentielle qui décrit le transfert entre deux variables. L'approximation fait donc correspondre à une fonction  $F$  de domaine de définition  $[t_d, t_f]$  un ensemble de fonctions  $f_i$  de domaines de définitions  $[t_d, t_1], \dots, [t_i, t_{i+1}], \dots, [t_n, t_f]$  qui définissent une partition de  $[t_d, t_f]$ . Les  $f_i$  sont des fonctions linéaires du temps  $f_i(t) = a_i t + b_i$  (les épisodes sont simplement décrits par leur pente  $a_i$ ). L'approximation de  $F$  par un ensemble de  $f_i$  n'est évidemment pas unique. Il faut donc en choisir une d'une manière qui ne soit pas trop arbitraire.

Un principe qui pourrait guider l'approximation serait de partitionner le domaine de définition de  $F$  suivant les extrema locaux de la fonction (chaque transition entre deux épisodes contigus correspond à un changement de signe de la pente). Mais ce type d'approximation est trop grossier : il peut aussi être intéressant de dégager les ruptures de pente ou les points d'inflexion. En pratique, les FTQs implantées isolent essentiellement les changements de pente "importants" des fonctions approximées. Ces événements remarquables dans l'évolution décrite par  $F$  arrivent généralement après des durées égales aux constantes de temps importantes de la dynamique modélisée, comme la constante de temps  $\tau$ , ou le temps de réponse d'une fonction de transfert.

La figure 3.2 donne la structure des FTQs. La durée de l'épisode pris comme paramètre par la FTQ est égale à la durée de l'influence calculée. Suivant la valeur de cette durée, l'influence sera décrite jusqu'à un temps  $t$  inclus dans un intervalle de

```

<FTQ> ::= ( <identificateur> ( <conditionnelle> { <conditionnelle> } ) )
<conditionnelle> ::= ( <test> <corps> <sortie> )
<corps> ::= ( <déclaration> { <sexpr> } )
<test> ::= forme prédicative de lisp
<déclaration> ::= ( { ( <identificateur> <sexpr> ) } )
<sexpr> ::= s-expression de lisp
<sortie> ::= ( <épisode> { <épisode> } )
<épisode> ::= ( <sexpr-num> <sexpr-num> <sexpr-num> )
(les dates de début, de fin et la valeur finale relative de l'épisode)
<sexpr-num> ::= s-expression de lisp du type numérique
<identificateur> ::= chaîne de caractères

```

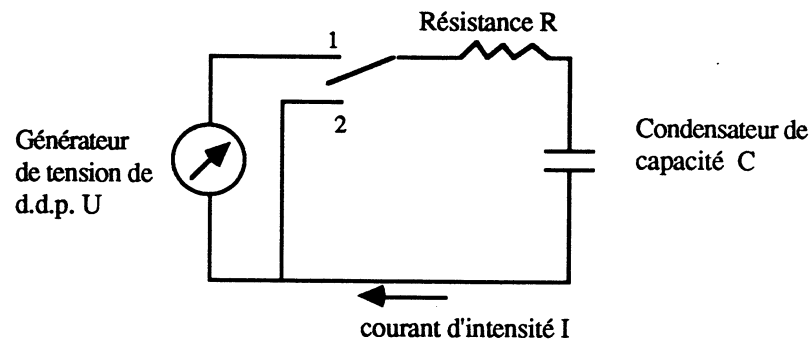
Figure 3.3 : Syntaxe d'implantation d'une Fonction de Transfert Qualitative.

définition  $[t_i, t_{i+1}]$  d'une des fonctions  $f_i$ . La réponse d'une FTQ varie donc de 1 à  $n$  épisodes. Tout épisode donné en entrée satisfait à un et un seul cas.

La figure 3.3 décrit la syntaxe du langage d'implantation d'une FTQ. Un vocabulaire permet de référencer l'épisode  $e_i$  considéré dans l'historique de la variable d'entrée et les paramètres de l'arc liant deux nœuds du modèle. Ces paramètres, comme les dates de début et de fin de  $e_i$ , les constantes temporelles attachées à l'arc, nécessitent en pratique l'écriture de fonctions d'accès à la base de données du système, qui gère entre autres les épisodes (cf la section 5.2). Mais ces fonctions sont transparentes pour le programmeur de FTQs. Il est aussi possible de déclarer des paramètres locaux servant au calcul des fonctions  $f_i$ , à la manière d'un "let" en lisp. La structure de calcul d'une FTQ ressemble quant à elle à celle de la fonction LISP "cond" : elle est formée d'un ensemble d'expressions comprenant chacune un test et un ensemble d'expressions à évaluer en cas de succès, qui définissent les  $f_i$ . Chaque traitement associé à un test renvoie une liste d'épisodes décrivant l'influence calculée.

En pratique, le codage d'une FTQ doit rester suffisamment facile. L'emploi d'une représentation numérique ne doit pas conduire aux problèmes engendrés par l'emploi de classiques outils quantitatifs, qui exigent la connaissance numérique précise de tous les paramètres d'une modélisation. L'intérêt d'une représentation qualitative est aussi de pouvoir modéliser des systèmes partiellement connus, en évitant la "tyrannie du détail" imposée par une approche purement quantitative. Cette "tyrannie" peut s'avérer inutile et coûteuse dans beaucoup de cas.

Les FTQs peuvent donc utiliser des paramètres numériques, correspondant à des quan-



Position 1 de l'interrupteur : charge du condensateur  
 Position 2 de l'interrupteur : décharge du condensateur

Paramètres de l'arc :  
 Retard : 0  
 Temps de réponse :  $3RC$   
 Gain :  $C$   
 FTQ : "q-condo"

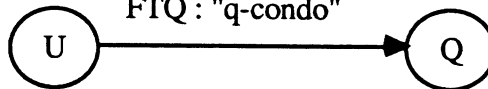


Figure 3.4 : Un exemple simple de système dynamique, un circuit RC.

tités évaluées avec précision, ou des constantes symboliques, représentatives des **ordres de grandeur** de la dynamique du système modélisé. Suivant la nature des paramètres donnés à une FTQ, un calcul différent est effectué : si tous les paramètres sont numériques, une résolution classique d'un système numérique est possible ; lorsque certains des paramètres sont donnés sous forme symbolique, un calcul approché utilise les valeurs numériques associées aux constantes symboliques. Ainsi, une donnée temporelle peut être évaluée dans l'ensemble  $\{court, moyen, lent\}$ , ces constantes possédant une valeur numérique estimée d'après la dynamique générale du procédé modélisé.

Les FTQs permettent donc une grande souplesse dans l'expression de connaissances de "qualités" diverses, d'une manière transparente pour l'utilisateur du système.

### 3 Un exemple simple de modélisation

Le but de cette section est d'illustrer par un exemple comment s'écrit pratiquement une FTQ. L'exemple choisi, présenté figure 3.4, est celui d'un circuit  $RC$ , comprenant une résistance, une capacité et un générateur de tension qu'il est possible de court-circuiter.



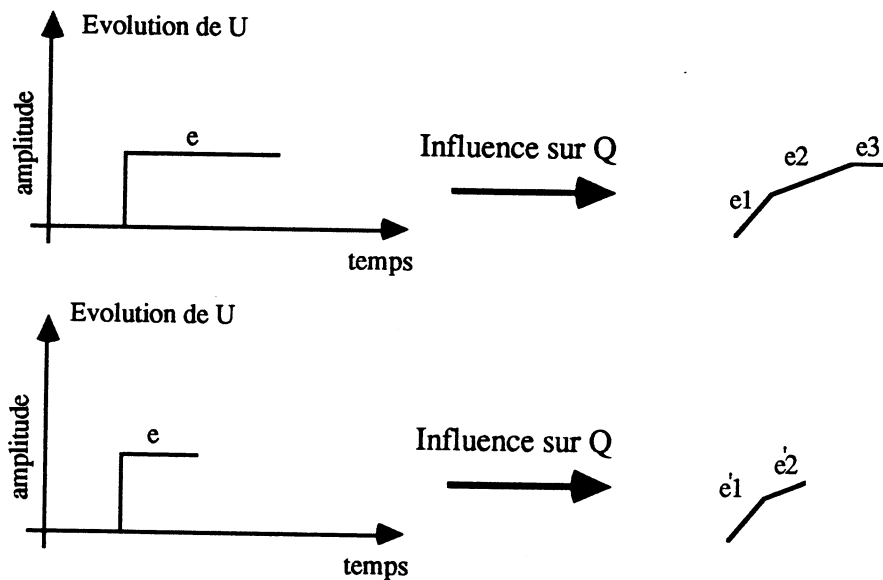


Figure 3.5 : Deux influences possibles sur  $Q$ . En fonction de la durée de l'épisode considéré dans l'historique de  $U$ , l'influence peut être composée de plus ou moins d'épisodes.

Les grandeurs physiques choisies pour décrire le comportement de ce circuit sont la différence de potentiel  $U$  aux bornes du générateur de tension, l'intensité du courant  $I$ , la charge  $Q$  du condensateur, sa capacité  $C$ , et la ddp  $V$  aux bornes du condensateur. Les lois liant ces grandeurs sont,  $I = dQ/dt$ ,  $Q = CV$ , et  $U = RI + V$ . Dans cet exemple, on ne s'intéresse à modéliser que la relation liant l'évolution de la différence de potentiel  $U$  à celle de la charge  $Q$ . Le modèle comporte deux variables  $U$  et  $Q$ , liées par un arc. Les paramètres de l'arc sont  $R$ ,  $C$ , et "*q-condo*", le nom de la FTQ qui décrit comment inférer l'influence de tout épisode de l'évolution de  $U$  sur l'évolution de  $Q$ .

L'équation donnant la loi de charge du condensateur est

$$Q = CU + (Q_0 - CU)e^{-t/RC} = F(t)$$

où  $Q_0$  est la charge initiale du condensateur, lorsque la tension  $U$  varie en échelon de zéro à sa valeur nominale (la loi de décharge du condensateur est semblable).

D'un point de vue temporel, le raisonnement à effectuer est le suivant : il n'y a pas de retard, c'est-à-dire de translation temporelle entre un épisode dans l'historique de  $U$  et son influence sur  $Q$  ; la seule donnée temporelle remarquable est  $\tau = RC$ , la "constante de temps" du système. Une représentation qualitative de l'influence lors de la charge du condensateur peut distinguer deux épisodes :

- Un premier épisode de croissance forte de la charge pendant une durée  $\tau$ , pour atteindre les deux-tiers de la valeur finale de l'influence. La fonction  $f_1$  est égale à

$$f_1(t) = \frac{(1 - 1/e)(CU - Q_0)}{\tau} t$$

avec pour domaine de définition  $[0, \tau]$ .

- un deuxième épisode de croissance plus faible jusqu'à la valeur finale pendant une durée  $2\tau$  (et le temps de réponse est alors atteint). La fonction  $f_2$  est égale à

$$f_2(t) = \frac{CU - Q_0}{2e\tau} t$$

avec pour domaine de définition  $[\tau, 3\tau]$ . Une approximation dans le calcul de cette fonction consiste à prendre  $CU$  comme valeur de  $F$  pour  $t = 3\tau$  (on considère que la valeur finale est atteinte au bout du temps de réponse et non asymptotiquement à  $+\infty$ ).

Les fonctions qui décrivent la décharge du condensateur sont identiques. Suivant la durée de l'épisode d'entrée l'influence calculée par la FTQ contiendra un ou deux épisodes. La figure 3.5 présente deux cas possibles de calcul d'influence.

Le raisonnement sur les ordres de grandeur des évolutions est lui aussi simple : lorsque des valeurs numériques sont disponibles pour  $C$  et  $U$ , la valeur finale de  $Q$  peut être explicitement calculée. Lorsque la valeur de la capacité n'est pas connue, elle est affectée à 1. Dans ce cas l'amplitude de l'influence inférée n'a aucune valeur. Mais il reste néanmoins possible de décrire sa dynamique, ce qui peut intéresser autant l'utilisateur du système.

La figure 3.6 montre les évolutions possibles de  $Q$  avec une constante de temps différente lorsque des tensions en créneaux sont appliquées. Dans le premier cas,  $\tau$  est supérieure à une demi-période du signal d'entrée. Après un régime transitoire, la réponse atteint un régime permanent sans que la valeur maximale possible de  $Q$  ( $= CU$ ) puisse être atteinte. Dans le deuxième cas,  $\tau$  est inférieure à la demi-période du signal d'entrée et l'évolution obtenue est une suite de charges et de décharges complètes du condensateur. La figure 3.7 présente des réponses à une entrée non périodique.

La FTQ donnée en exemple dans ce paragraphe ne sait gérer que des épisodes de  $U$  ayant forme d'échelons. De plus, un principe fondamental des FTQs est de considérer

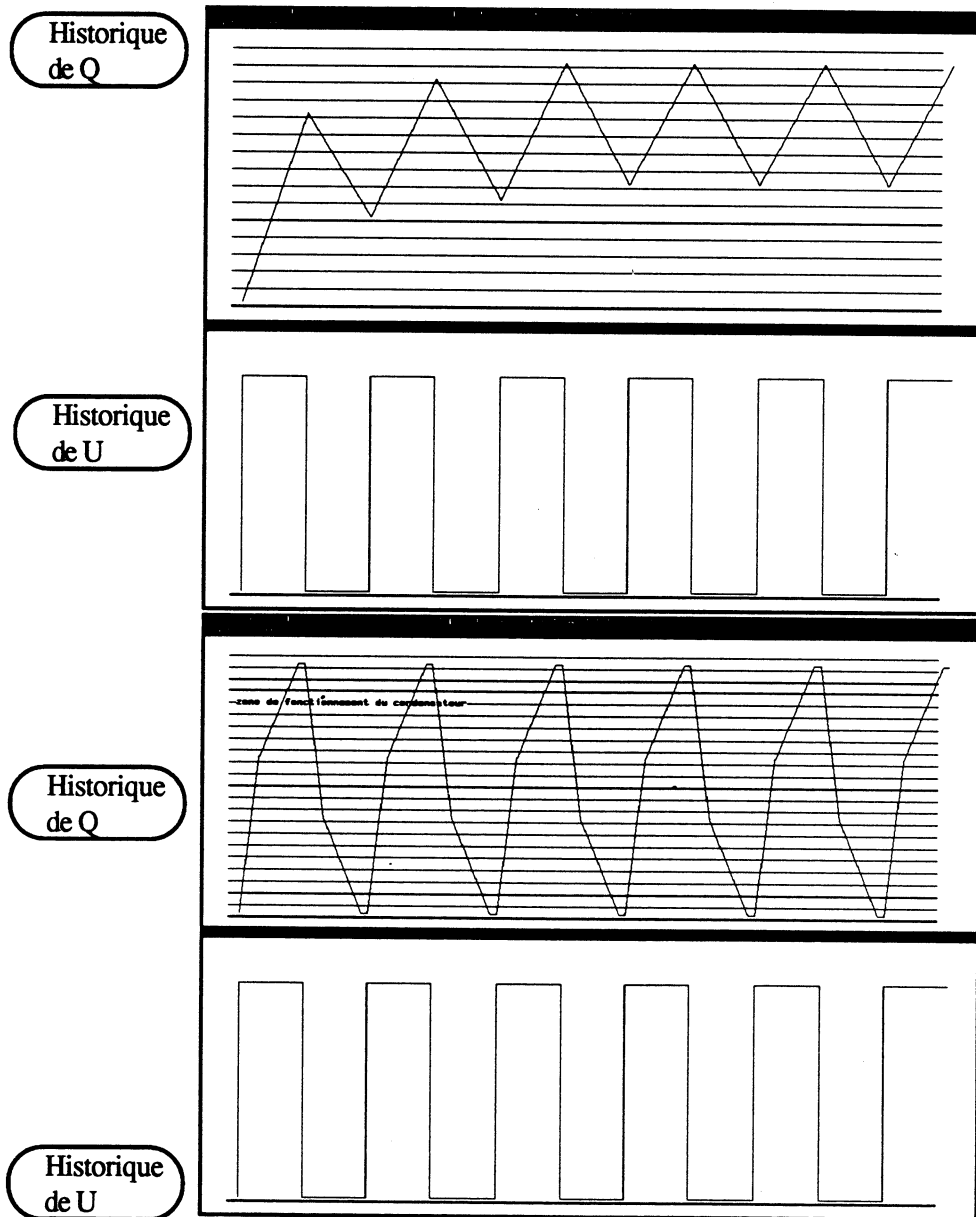


Figure 3.6 : Deux comportements dynamiques possibles.

qu'il est possible de calculer l'influence de tout épisode de manière indépendante, c'est-à-dire sans utiliser de connaissances sur l'évolution de la variable d'entrée avant ou après l'épisode. Ce principe n'est que partiellement respecté par la FTQ *q-condo*. En effet, une hypothèse a été choisie pour simplifier son écriture qui est de supposer qu'un épisode de  $U$  décrit un créneau. Donner en entrée un créneau décomposé en plusieurs épisodes conduit à un résultat faux, parce que la FTQ ne garde pas mémoire

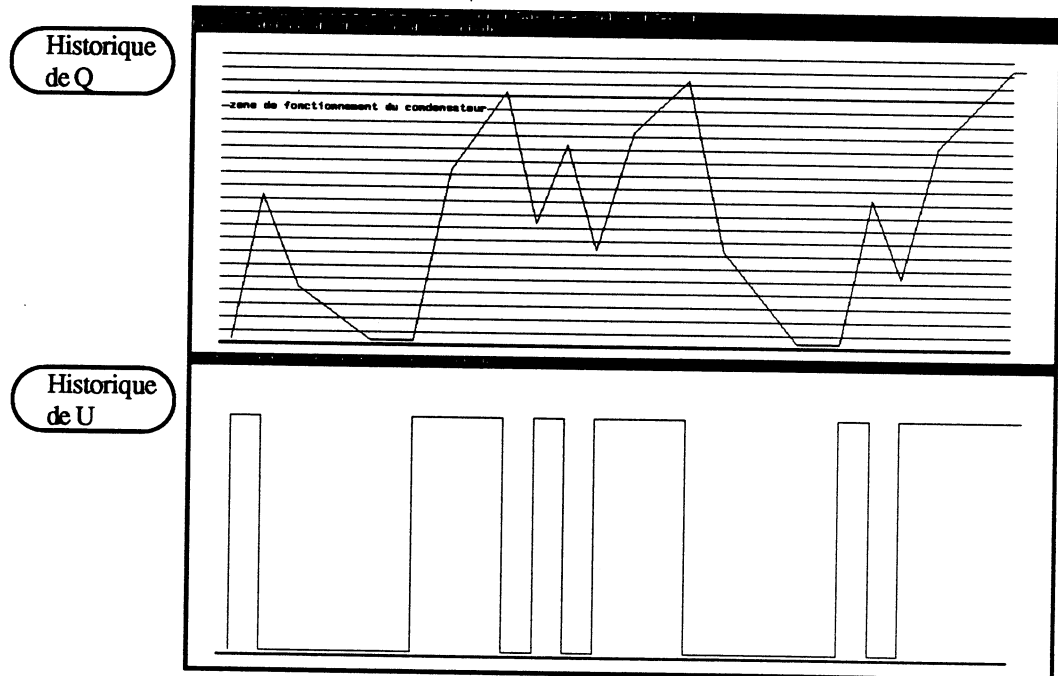


Figure 3.7 : Des réponses à une entrée non périodique.

des épisodes passés.

L'annexe A commente l'hypothèse de l'indépendance du calcul effectué par les FTQs, ainsi que l'importance du choix de l'approximation par fonctions linéaires par morceaux dans les temps d'exécution de simulations.

Nous pouvons maintenant donner le code de la FTQ *q-condo*. \$Durée, \$Tdébut, \$Tfin, \$Vald1, \$Vald2 donnent les valeurs de la durée, des temps de début et de fin, ainsi que les valeurs à ces temps de l'épisode donné comme paramètre à la FTQ *q-condo*. \$Tau, \$C sont des constantes du circuit, déclarées sur l'arc du modèle. \$Q0 donne la valeur initiale de  $Q$  au temps \$Tdébut. Toutes ces variables sont traduites de manière transparente à l'utilisateur en fonctions d'accès à la base de données.

---

```

(q-condo (
  ((=< $Durée $Tau)
    ;; premier cas : la durée de l'intervalle d'entrée n'est pas assez
    ;; grande pour pouvoir distinguer plusieurs épisodes dans l'influence
    ((capacité (if (numberp $C) $C 1))
  ;; la valeur de la capacité est ignorée si elle n'est pas connue exactement ...
    (pente ; calcul de la pente du premier épisode (fonction f1)
      (cond ((< $Vald1 $Vald2) ; charge du condensateur
        (/ (* 0.63 ; (1 - 1/e)
          (- (* $Vald2 capacité) $Q0))
          $Tau))
        (t ; décharge du condensateur
          (/ (* -0.63 $Q0) $Tau))))))
    ;; l'épisode est décrit par ses dates de début, de fin
    ;; et la valeur relative finale
    (($Tdébut $Tfin (round (* pente $Durée))))))
  ;; deuxième cas : on distingue deux épisodes dans l'influence
  (t
    ((capacité (if (numberp $C) $C 1))
    (pente ; calcul de la pente du second épisode (fonction f2)
      (cond ((< $Vald1 $Vald2) ; charge du condensateur
        (/ (- (* $Vald2 capacité) $Q0)
          (* $Tau 5.44))) ; 5.44 = 2 * e
        (t ; décharge du condensateur
          (/ (* -0.37 $Q0) 2 $Tau))))))
    ;; caractéristiques du premier épisode (identiques au cas
    ;; précédent avec $Tfin ayant pour valeur ($Tdébut + $Tau)
    (($Tdébut (+ $Tdébut $Tau) (round (if (< $Vald1 $Vald2)
      (* 0.63
        (- (* $Vald2 capacité) $Q0))
      (* -0.63 $Q0))))))
    ;; caractéristiques du second épisode :
    ((+ $Tdébut $Tau)
    (min $Tfin (* 3 $Tau))
    (round (* pente (min
      (* 2 $Tau)
      (- $Durée $Tau))))))))))

```

---

## 4 Les limites de la modélisation proposée

Nous pensons que les outils de modélisation présentés dans ce chapitre permettent de doter un ordinateur de méthodes de raisonnement simples sur des systèmes dynamiques, et le système informatique décrit dans le chapitre 5 en est une première démonstration. Néanmoins, ces outils souffrent de certaines limites :

- Le type de représentation adoptée pour décrire un système dynamique est le **graphe orienté**. Ce choix implique un type de raisonnement relativement figé de propagation d'effets depuis les variables d'entrée du modèle en suivant tous les chemins du graphe. Il est difficile de mener un raisonnement en sens inverse, c'est-à-dire en cherchant à reconstruire des évolutions de variables, par exemple non mesurées, pouvant expliquer après coup l'évolution observée des variables influencées<sup>6</sup>. Il faudrait dans un premier temps être capable de trouver les fonctions inverses des fonctions d'influence qualitative liant deux variables. Ceci n'est pas simple, car toutes les FTQs ne sont pas bijectives.

En général, il est simplement possible de calculer un épisode d'entrée d'une forme particulière qui permette d'obtenir un épisode désiré grâce à une FTQ donnée. Lorsque deux variables X et Y sont mesurées et admettent chacune comme unique entrée une variable non mesurée Z, il n'est pas du tout évident de calculer un épisode de Z qui propagé sur X et Y permette de retrouver des épisodes mesurés sur ces variables. Lorsqu'une variable admet plusieurs entrées le problème est encore plus complexe, puisqu'il faut décomposer l'évolution mesurée en somme d'influences provenant de chacune des entrées.

Par ailleurs, un mode de représentation orienté ne permet pas de coder de manière immédiate des relations n-aires plus complexes entre variables, comme des équilibres qui décrivent des relations de proportionnalité dans un ensemble de variables. Vouloir détailler ces relations globales peut conduire à construire des représentations de trop bas niveau. C'est par exemple le cas des boucles de rétroaction, si cette rétroaction est représentée par un circuit entre des variables du graphe. Le problème à résoudre alors est celui de la simulation de ce circuit : la somme des retards d'une boucle de rétroaction étant généralement négligeable devant la dynamique moyenne du reste du système (et dans le cas contraire ces boucles n'auraient pas d'utilité), une simulation devrait alors combiner des calculs dans des ordres de grandeur temporels très différents. De plus, le but du raisonnement qualitatif n'est pas d'intégrer des évolutions macroscopiques à partir de déplacements infinitésimaux, ce problème étant bien résolu par les tech-

---

<sup>6</sup>Ce problème est celui de la construction d'un observateur en automatique.

niques quantitatives classiques. Il est d'interpréter causalement les dépendances existant entre évolutions macroscopiques.

Dans les deux cas, la faiblesse de la représentation a été palliée par des techniques spécifiques de modélisation, introduisant des variables internes au modèle qui servent à construire des représentations de haut niveau, décrivant par exemple le fonctionnement d'une boucle de régulation par une seule FTQ. Ces techniques sont décrites partiellement dans le chapitre 4 et sont présentées en détails dans le rapport de DEA de S. Féray Beaumont ([Bea86]).

- Un deuxième reproche qui pourrait être adressé à cette représentation est d'être implicitement linéaire. Pour que les influences entre variables puissent être calculées de manière indépendante puis sommées pour obtenir les évolutions des variables influencées, il faut effectivement faire appel au "principe de superposition" des solutions des équations différentielles linéaires. Mais le problème de la modélisation de systèmes non linéaires n'est pas le propre du raisonnement qualitatif. En effet, il n'existe pas d'outils mathématiques qui permettent d'apporter un cadre général à la simulation de tels systèmes. Les FTQs font appel à l'hypothèse de la linéarité parce qu'elles doivent coder des connaissances générales applicables, en première approximation, à un grand nombre de systèmes dynamiques. De plus, il est possible de coder avec les FTQs plusieurs modèles linéaires, qui approximent un système non linéaire par morceaux, suivant ses points de fonctionnement. S. Féray Beaumont a ainsi programmé des FTQs dont les gains sont calculés dynamiquement comme le rapport entre les seuils séparant les différentes zones qualitatives d'évolution de deux variables causalement liées (le deuxième vocabulaire employé). Lorsque les largeurs de ces zones ne sont pas identiques, les valeurs des gains attachées aux arcs du modèle changent suivant les positions des variables dans ces zones, et la modélisation est alors non linéaire.

Cette technique est facilitée par le fait que les variables du modèle restent identiques lors d'un passage par une non-linéarité. Par contre, les modèles numériques utilisés en automatique comportent beaucoup de variables qui n'ont pas de sémantique claire, ce qui rend la transition entre deux modèles difficile à gérer.

Enfin, un des arguments les plus importants en faveur du raisonnement qualitatif est celui de l'"intelligibilité" et de la "convivialité" des outils manipulés et des résultats qu'ils permettent d'obtenir. Cet argument doit cependant être employé avec précautions. L'expérience montre en effet que si les résultats sont faciles à comprendre, le travail de mise au point d'un modèle nécessite une compréhension profonde du système dynamique à modéliser. En d'autres termes, le raisonnement qualitatif ne

permet pas de faire l'économie d'une étude approfondie du système avec une mise au point souvent progressive de la modélisation. Le gain par rapport aux techniques de programmation classique est néanmoins double :

- modéliser un système physique comme un procédé continu ne demande plus d'efforts de programmation,
- les résultats du programme sont rendus intelligibles à des utilisateurs qui n'ont aucune idée de sa forme.

## 5 Techniques de simulation

L'algorithme décrit dans cette section permet de simuler le comportement dynamique du système modélisé, en gérant dans le temps les épisodes inférés par les FTQs à partir d'une vue initiale non ambiguë et connexe.

### 5.1 Les objectifs d'un algorithme simple de gestion d'épisodes

Le but d'un algorithme d'inférence de formes est de pouvoir à la fois prédire l'évolution d'un système dynamique et expliquer les résultats obtenus. Comme les calculs de formes proprement dits sont effectués par les FTQs, l'algorithme doit simplement permettre de gérer la fusion de l'information apportée par les inférences de formes au cours du temps. Cette fusion d'information doit obéir aux principes suivants :

- Elle doit permettre de garder toutes les étapes de la simulation sous la forme d'un graphe, c'est-à-dire créer une vue. Un algorithme de simulation qualitative ne doit pas reproduire les défauts des méthodes de simulation classiques sur des modèles "boîtes noires". Il faut qu'il permette de garder des traces de toutes les chaînes d'inférence qui ont permis d'obtenir un résultat pertinent depuis un ensemble de conditions initiales. Ces traces sont les chemins d'une vue. Ce sont ces chemins qui constituent la trame des explications que peut donner le système informatique. Mais ils doivent aussi permettre de gérer une vue au cours du temps, en assurant une maintenance de vérité sur les résultats obtenus et, localement, sur le modèle utilisé. Toute information déduite par le système doit donc être complètement justifiée par les données et le sous-ensemble du modèle qui ont permis son obtention. Une évolution prédite de variable non conforme à l'évolution mesurée peut être remise en cause ainsi que toutes les influences qu'elle a permis de propager sur d'autres variables.



- Elle doit permettre un raisonnement sur des données incomplètes. Il est effectivement très peu probable, étant donné un modèle de système dynamique quelconque, que les épisodes inférés et propagés sur une variable depuis ses différentes variables d'entrée couvrent une période temporelle identique. La modélisation proposée est effectivement complètement asynchrone. Par définition, les épisodes décrivent une suite de comportements pertinents d'une variable, dont les durées peuvent être très différentes. De plus, la dynamique locale du modèle peut varier considérablement. Des phénomènes "rapides" peuvent partager des variables avec des phénomènes plus lents. Ces variables subiront alors des influences à court et à long terme, qui ne couvriront pas la même période temporelle. Il paraît important de gérer une simulation même si les données produites ne sont que partielles. Elles permettent de raisonner sur des tendances d'évolution de variables, avec l'hypothèse que les influences non connues sont nulles. Il faut donc disposer de structures de données et d'un algorithme permettant de gérer explicitement l'information disponible comme l'information manquante. Il n'est effectivement pas pertinent de présenter des prédictions complètes et incomplètes de la même manière.

## 5.2 Structures de données

Le but de ce paragraphe est de donner une idée du type des structures de données qui ont été utilisées pour la programmation du système. Ces structures, dont un exemple est donné par la figure 3.8 répondent aux besoins énoncés précédemment :

### 1. Le maintien de la cohérence des données.

L'élément de base de la structure de données utilisée est l'épisode. A chaque variable sont associés deux ensembles d'épisodes :

- un *historique* d'évolution, qui est une liste d'épisodes contigus. Il comprend deux parties : un historique "passé" qui est composé des épisodes intégrés depuis les acquisitions de mesures faites sur la variable (pour les variables mesurables) ; un historique "futur" qui est composé des épisodes calculés à partir des influences propagées sur la variable. Le "présent" est la date de la dernière mesure de la variable.
- un *journal* qui est l'ensemble de tous les épisodes correspondant à des mesures ou des propagations d'influences sur la variable. L'historique est donc la somme de tous les épisodes du journal. Le journal permet de noter tous les liens entre les influences propagées sur une variable et les épisodes

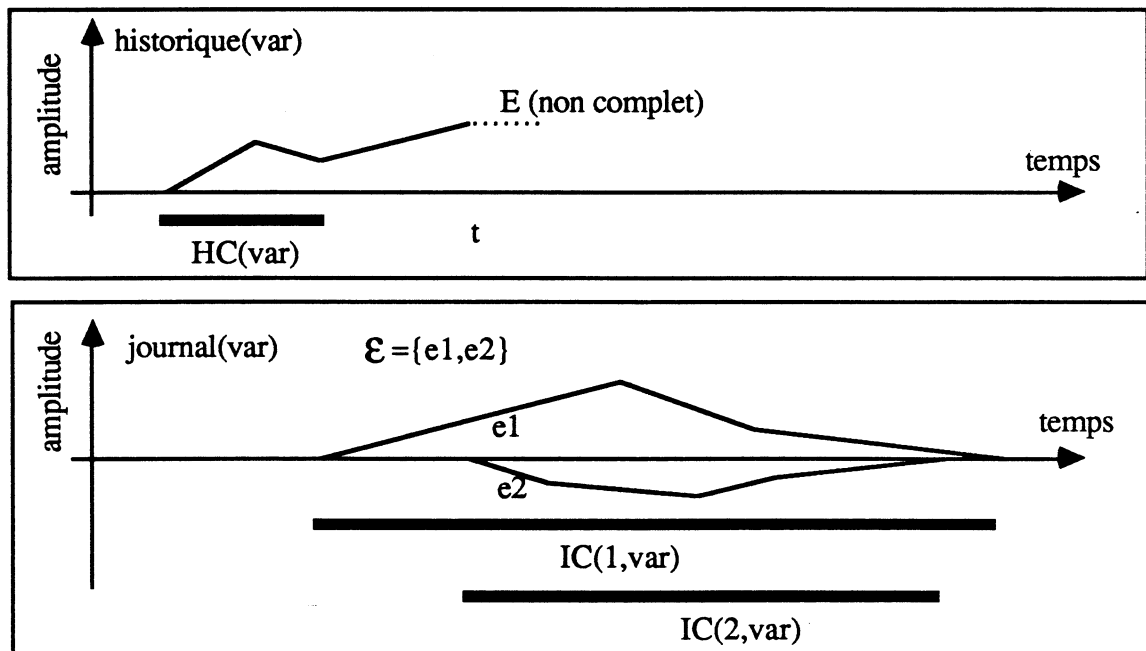


Figure 3.8 : Un exemple illustrant l'utilisation des structures de données par l'algorithme.

calculés à partir de ces influences dans l'historique. Mais il permet aussi de garder un lien entre tout épisode de l'historique d'une variable et les influences qu'il a permis d'inférer et de propager dans les journaux des variables de sortie.

L'ensemble des historiques et des journaux permet donc de garder une trace de toutes les relations de cause à effet dans le temps entre variables. Ces liens servent aux explications mais aussi à la maintenance de vérité des historiques et du modèle (ces techniques sont présentées dans le chapitre 5).

## 2. La gestion de données temporelles incomplètes.

Raisonnement sur des données temporelles incomplètes implique de pouvoir faire des calculs de pré- et de post-conditions temporelles associés aux propagations d'influence. A chaque variable  $X$  sont donc attachés :

- l'intervalle temporel recouvrant l'ensemble des épisodes pendant lesquels l'historique de  $X$  est complet.
- les intervalles temporels des influences complètes de chacune des variables d'entrée de  $X$ . Les influences complètes sont celles qui ont été inférées depuis

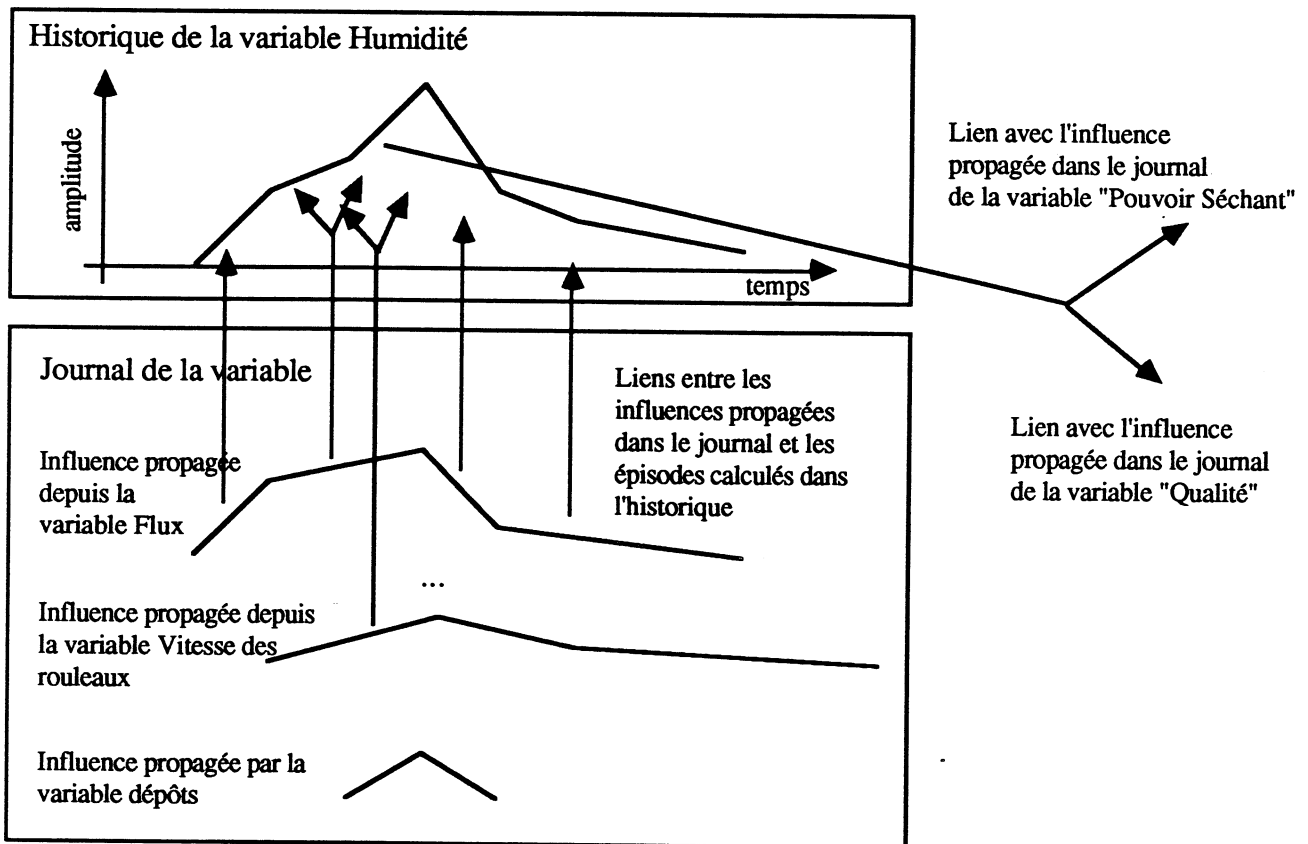


Figure 3.9 : Structures de données.

des épisodes complets.

### 5.3 Un algorithme simple de gestion d'épisodes pour la simulation

L'algorithme décrit dans cette section est une version très abstraite mais néanmoins représentative de l'algorithme réellement implanté. Pour rendre son écriture moins verbeuse, l'introduction de quelques notations est nécessaire :

- $T(E)$  et  $D(E)$  dénotent respectivement l'intervalle temporel sur lequel  $E$  est défini et la pente de  $E$ .
- Episode-propagé( $e, v, var$ ) dénote le  $e^{\text{ème}}$  épisode propagé depuis la  $v^{\text{ème}}$  variable d'entrée de la variable  $var$ .

- $HC(var)$  et  $IC(v, var)$  dénotent respectivement l'intervalle temporel recouvert par l'historique complet d'une variable  $var$  et l'intervalle temporel recouvert par les influences complètes de la  $v^{\text{ème}}$  variable d'entrée sur  $var$ .
- $\cap$ ,  $\cup$  et  $\subset$  représentent les opérations d'intersection, d'union et d'inclusion sur des intervalles de la droite réelle.

La figure 3.9 donne un exemple simple illustrant l'utilisation des structures de données, et fait aussi référence aux notations employées dans la description de l'algorithme (on considère que la variable  $var$  admet deux variables d'entrée).

Soit un ensemble d'épisodes, chaque épisode étant attaché à une variable, comme condition initiale. Les influences de ces épisodes sont propagées dans les journaux des variables de sortie, dont l'ensemble initialise la liste  $L_{\hat{a}\text{-simuler}}$ . La boucle principale de l'algorithme est alors la suivante ( $temps_{max}$  est la borne temporelle supérieure que l'on fixe aux historiques des variables) :

$t :=$  date d'acquisition des mesures;

**Tantque** ( $t < temps_{max}$ ) et ( $L_{à-simuler} \neq \emptyset$ ) **Faire**

$var :=$  choix( $L_{à-simuler}$ );

(\* le contrôle de l'algorithme choisit une variable dont on peut calculer un nouvel épisode dans l'historique \*)

$t :=$  date-fin(historique(var)); (\* la date de fin du dernier épisode calculé \*)

$\varepsilon := \{E \text{ de type épisode} / \exists e, \exists v, E = \text{Episode-propagé}(e, v, var) \text{ et } [t, t] \subset E\}$ ;

(\*  $\varepsilon$  est l'ensemble des épisodes qui vont permettre de calculer le nouvel épisode dans l'historique de var ; E peut maintenant être créé et calculé \*)

$E :=$  créer-épisode;

$T(E) := \bigcap_{e \in \varepsilon} T(e)$ ;

$D(E) := \sum_{e \in \varepsilon} D(e)$ ;

Interpréter( $E$ ); (\* répercussion sur les vues plus abstraites \*)

historique(var) := historique(var).E;

(\* l'épisode calculé est concaténé à l'historique déjà calculé : le nouveau nœud (var, E) est ajouté à la vue courante ; les arcs depuis les nœuds de la vue ayant permis d'inférer les e de  $\varepsilon$  jusqu'au nœud (var, E) sont créés \*)

(\* var admet n variables d'entrée et p variables de sortie \*)

**Si** complet := ( $T(E) \subset (\bigcap_{v \in [1, n]} (IC(v, var)))$ ) et ( $(\bigcap (HC(var), T(E))) \neq \emptyset$ ) **Alors**

$HC(var) := \bigcup (HC(var), T(E))$ ; (\* L'épisode calculé est complet \*)

**Finsi**;

**Pour** i := 1 jusqu'à p **Faire** ; (\* itération sur les variables de sortie \*)

arc := trouver-arc(var, var<sub>i</sub>);

influence := appliquer(FTQ(arc), E, paramètres(arc));

journal(var<sub>i</sub>) := journal(var<sub>i</sub>)  $\cup$  influence; (\* préparation de la création des

arcs depuis le nœud (var, E) vers les nœuds (var<sub>i</sub>, e<sub>j</sub>) tels que les épisodes e<sub>j</sub>

intègrent les épisodes de influence ; ces nœuds seront créés dans des passages

ultérieurs dans le corps de la boucle \*)

**Si** complet **Alors**

(\* l'épisode calculé est complet, donc l'influence propagée est complète \*)

j := indice(var); (\* pour pouvoir référencer var depuis la variable de sortie \*)

$IC(j, var_i) := \bigcup_{e \in influence} (IC(j, var_i), T(E))$ ;

(\* La post-condition temporelle de la propagation d'influences est calculée \*)

**Finsi**;

```

Si  $var_i \notin L_{\grave{a}\text{-simuler}}$  Alors
     $L_{\grave{a}\text{-simuler}} := L_{\grave{a}\text{-simuler}} + \{var_i\};$ 
Finsi;
Finpour;

 $t_f := \text{date-fin}(E);$ 
Si  $(\forall e \in \text{journal}(var) \text{ date-fin}(e) \leq t_f)$  Alors
     $L_{\grave{a}\text{-simuler}} := L_{\grave{a}\text{-simuler}} - \{var\};$ 
Finsi;
Finfaire;

```

Plusieurs remarques sont nécessaires pour éclaircir le comportement de l'algorithme.

La commande "interpréter(E)" fait référence aux traitements d'interprétation de la vue de "bas niveau" créée par la simulation en une vue plus abstraite, qui utilise le vocabulaire de description statique des zones d'évolution des variables du modèle. Ces traitements sont détaillés dans la section 6. On peut d'ores et déjà noter qu'ils sont incrémentaux, c'est-à-dire qu'une vue est interprétée au fur et à mesure de sa création par ajout de nœuds et d'arcs.

Le test

$$(T(E) \subset (\bigcap_{v \in [1, n]} (IC(v, var)))) \text{ et } (\bigcap (HC(var), T(E)) \neq \emptyset)$$

permet de déterminer si un épisode E calculé à partir des influences propagées sur une variable est complet. Pour cela, il doit intégrer des influences complètes provenant de toutes les variables d'entrée, condition temporelle qui est donnée par le premier membre du test. De plus, l'épisode calculé doit admettre une intersection temporelle non vide avec l'historique complet de la variable (deuxième membre du test). La variable  $HC(var)$  est aussi mise à jour lorsque var est mesurée et que la période de mesure n'est pas déjà incluse dans  $HC(var)$  (c'est-à-dire lorsqu'elle augmente l'historique de la variable). C'est le cas dans la période d'initialisation du système, quand les influences propagées sur la variable portent encore dans le futur, à cause des délais des chemins arrivant depuis d'autres variables mesurées. Lorsque une période de mesure sur une variable intersecte une période prédite de manière complète, il est possible de comparer prédiction et mesure. Ces techniques, ainsi que la maintenance de vérité des historiques qu'elles permettent, sont décrites dans le chapitre 5.

Le contrôle de l'algorithme est géré par la fonction "choix" qui décide de l'ordre suivant lequel les épisodes sont calculés dans les historiques des variables du graphe.

Ce problème est complètement analogue à celui de la gestion d'un "échancier" (qui est appelé  $L_{\hat{a}\text{-simuler}}$  dans notre algorithme) par un "noyau de synchronisation", dans le domaine de la simulation à événements discrets (voir par exemple [Dub85], [AP86]). Sans entrer dans les détails, il y a deux stratégies de simulation possibles qui assurent la cohérence temporelle du calcul des épisodes :

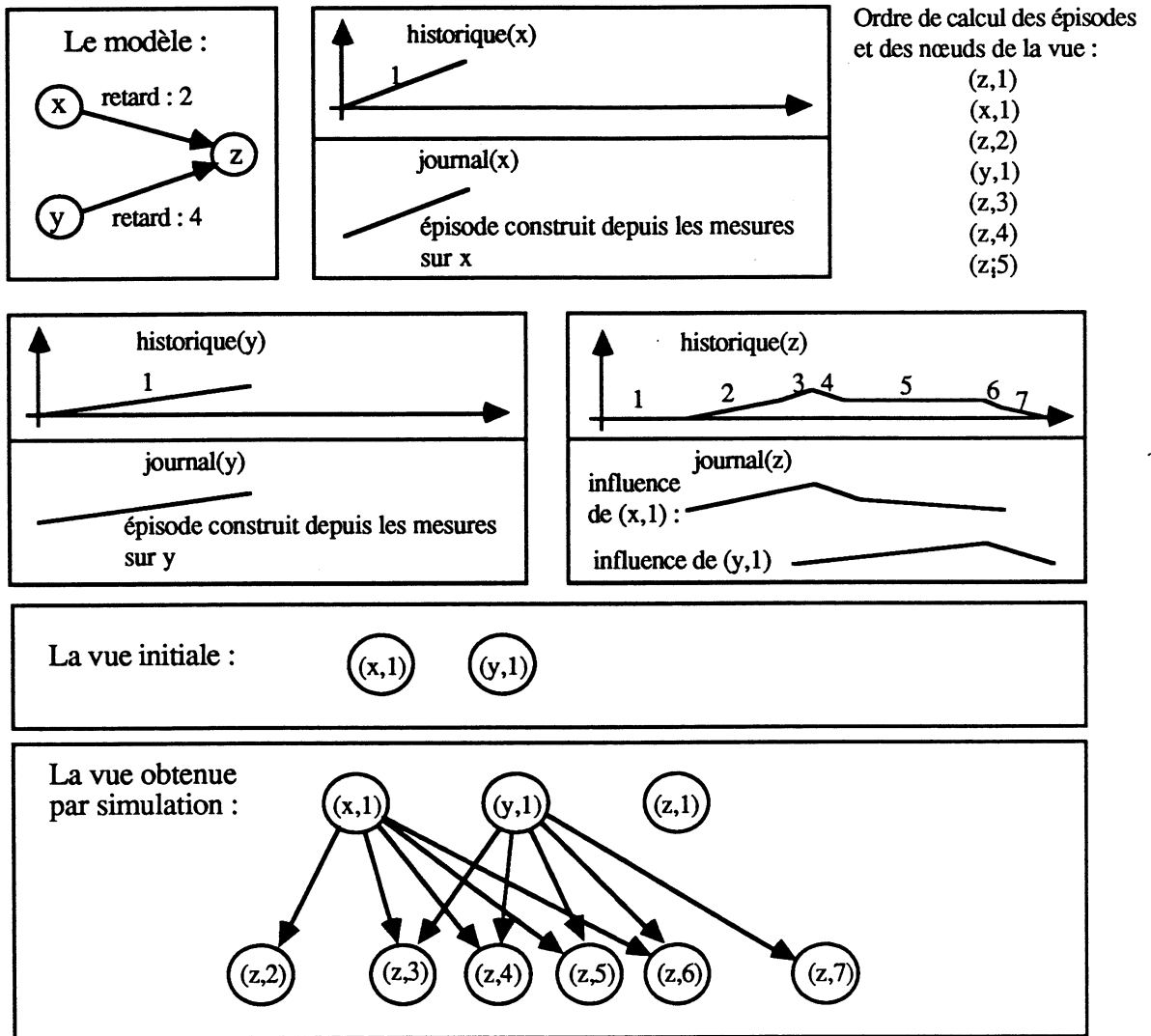
- Lorsque le graphe du modèle ne comporte pas de circuits, une stratégie très simple consiste à calculer successivement tous les épisodes d'une variable. Pour cela, il suffit de choisir les variables par parcours en largeur d'abord du graphe, en partant des racines que sont les variables mesurées sans entrées. Cette stratégie garantit la cohérence temporelle du calcul des épisodes puisque pour une variable quelconque de profondeur  $n$ , les historiques de ses variables d'entrée, donc de profondeur  $(n - 1)$  auront déjà été complètement calculés. Toutes les influences de ces variables auront été propagées, et le calcul de l'historique intégrant ces épisodes peut être fait sans risque d'oubli d'une influence qui serait propagée après coup.

Mais lorsque le graphe comporte des circuits, cette stratégie n'est plus correcte, la notion de profondeur n'ayant pas de sens pour les variables d'un circuit. Il faut donc inclure un critère de dépendance entre les divers épisodes des variables, ce que fait la deuxième stratégie possible de simulation.

- Cette deuxième stratégie consiste à calculer les épisodes dans les historiques des variables en respectant les priorités données par les relations de dépendance entre les épisodes, c'est-à-dire les arcs de la vue. Il ne s'agit donc pas d'un simple parcours du graphe du modèle, mais d'un parcours de la vue au fur et à mesure de sa création.

Détaillons le contrôle de ce parcours de graphe : on appelle variable **en attente** toute variable dont l'historique a été calculé jusqu'à une date de début d'influence qui n'est pas encore calculée et propagée depuis une des variables d'entrée. En d'autres termes, si une variable  $v$  en attente était choisie par le contrôle de l'algorithme, l'ensemble  $\varepsilon$  des épisodes pris en compte pour calculer un nouvel épisode  $E$  dans l'historique de  $v$  ne serait pas complet : il y manquerait au moins une influence d'un épisode d'une des variables d'entrée dont il faut compléter l'historique pour ensuite pouvoir revenir au calcul de  $E$ . La liste  $L_{\hat{a}\text{-simuler}}$  ne contient que des variables qui ne sont pas en attente.

La fonction choix de l'algorithme effectue le test suivant : choisir parmi toutes les variables de  $L_{\hat{a}\text{-simuler}}$  une variable  $v$  telle que la date de fin de l'épisode  $E$  à calculer dans l'historique de  $v$  soit minimale pour toutes les variables de la liste.



(Pour alléger les notations, les épisodes sont simplement notés par leur numéro d'ordre dans l'historique. De même, seuls les retards sont détaillés parmi les paramètres des arcs du modèle.)

Figure 3.10 : Un exemple de l'ordre de calcul d'épisodes.

Comme le montre l'exemple de la figure 3.10, l'ordre de calcul des épisodes ne suit pas l'ordre strictement croissant des dates des fins d'épisodes (mais l'évolution de la variable t de l'algorithme est quand même globalement croissante, de même que la profondeur de l'arbre pendant la création de la vue ; c'est la prise en compte de deux critères, temporel et de dépendance causale entre épisodes, qui rend le parcours non uniforme). Après le calcul du nœud (z,2) de la vue, la variable z est en attente du calcul et de la propagation de l'influence depuis le



nœud  $(y,1)$  qui est donc calculé avant  $(z,3)$  de date de fin inférieure. Et la date de fin de  $(z,2)$  inférieure à celle de  $(y,1)$  fait que l'ordre de calcul ne suit pas le critère de profondeur de l'arbre.

Pour pouvoir étudier la complétude de cette stratégie, il faut entrer un peu plus dans les détails de l'implantation.

Pour permettre la propagation de dépendances entre épisodes, ces derniers sont typés : les épisodes des influences et des historiques sont de type "connu". Les épisodes de type "inconnu" servent à anticiper la propagation d'une influence. Considérons l'épisode  $E$  de l'algorithme et soit  $t_f$  sa date de fin. Un épisode de type "inconnu" est propagé dans le journal de toute variable de sortie  $var_{i,i \in [1,p]}$ . Il admet pour date de début  $t_f$  plus le retard entre  $var$  et la variable de sortie  $var_i$  (ce traitement est initialisé avec les dates de début des épisodes de la vue initiale, avant le lancement de la simulation). Lorsque l'épisode  $E'$  de date de début  $t_f$  sera calculé dans l'historique de  $var$ , l'épisode de type "inconnu" propagé dans l'agenda d'une variable de sortie  $var_i$  est remplacé par le premier des épisodes qui constituent l'influence de  $E'$  sur  $var_i$ .

Le test de retrait d'une variable de  $L_{\hat{\alpha}\text{-simuler}}$  est donc enrichi d'un membre :

$$\begin{aligned} & (\forall e \in \text{journal}(var) \text{ date-fin}(e) \leq t_f) \\ & \text{ou} \\ & (\exists e \text{ de type inconnu} \in \text{journal}(var) / [t_f, t_f] \subset T(e)) \end{aligned}$$

Une variable est retirée de la liste si son historique a été complètement calculé ou si elle est en attente. De même, après une propagation d'influence, le test d'introduction de  $var_i$  dans  $L_{\hat{\alpha}\text{-simuler}}$  comprend aussi la vérification que  $var_i$  n'est pas en attente (d'une autre de ses variables d'entrée). Une trace complète d'une simulation est donnée dans l'annexe B et détaille les inférences faites par les FTQs et les entrées et les sorties des variables de la liste  $L_{\hat{\alpha}\text{-simuler}}$ .

Le mécanisme de typage des épisodes qui vient d'être décrit définit pour toutes les variables  $var$  du modèle une borne temporelle  $B_{var}$  pour le calcul de l'historique de la variable. Cette borne est initialisée à

$$(1) B_{var} = \min_{i \in [1,n]} (\text{début}(E_i) + \text{retard}(var_i, var))$$

où les  $var_{i,i \in [1,n]}$  sont les variables d'entrée de  $var$ , et les  $E_i$  les épisodes conditions initiales sur ces variables. D'une manière plus générale, cette équation est toujours vérifiée pendant le calcul des historiques par l'algorithme, les  $E_i$  étant alors les prochains épisodes à calculer dans les historiques des variables  $var_i$ . Aucune influence ne peut donc être oubliée lors du calcul d'un épisode à concaténer à l'historique d'une variable.

Le critère de choix des épisodes des variables dans  $L_{\delta\text{-simuler}}$  par date de fin croissante n'est pas utile à la complétude. Il est motivé par les contraintes imposées par l'utilisation de l'algorithme dans un système de suivi en ligne du procédé. Dans ce cadre, il est impératif de présenter les évolutions de l'ensemble des variables supervisées par temps croissant, pour pouvoir avertir au plus tôt l'utilisateur du système des problèmes qui peuvent se poser dans un futur proche dans l'exploitation du procédé.

Le calcul d'un nouvel épisode à concaténer à l'historique d'une variable se fait en considérant l'ensemble  $\epsilon$  des épisodes d'influences qui contiennent la date de fin du dernier épisode calculé. Compte-tenu de la diversité des durées des épisodes obtenus directement depuis les mesures et des constantes de temps du modèle, il est possible que la durée de l'intervalle obtenu par intersection soit arbitrairement petite. Calculer ainsi des épisodes aussi petits que l'on veut n'a pas de sens dans le cadre d'un raisonnement qualitatif.

Mais surtout, cela ne garantit pas la terminaison de l'algorithme. En effet, la suite des épisodes calculés dans l'historique d'une variable peut converger et tendre vers une limite, si la durée des épisodes tend vers zéro. Si cette limite est inférieure ou égale à  $\text{temps}_{max}$ , l'algorithme ne termine pas.

Aussi une granularité temporelle  $g$  est-elle introduite. Son effet est de déplacer tout épisode propagé dans le journal d'une variable si sa date de début ou sa date de fin est plus proche de  $g$  d'une date de début ou de fin d'un épisode quelconque déjà propagé dans le journal. La variation de durée maximum en valeur absolue d'un épisode propagé, par rapport à la durée calculée par la FTQ, est donc de  $2g$ . L'existence de cette granularité permet de démontrer facilement que l'algorithme termine : on associe un compteur à la boucle, initialisé à 0 et incrémenté de 1 à chaque exécution du corps de la boucle. La valeur de ce compteur est bornée par

$$N \times (\text{partie-entière}(H/g) + 1)$$

où  $N$  est le nombre de variables du graphe est  $H$  la durée demandée de simulation.

En reprenant cette évaluation du nombre d'exécution du corps de la boucle, on obtient facilement une borne supérieure pour la complexité de l'algorithme. Cette complexité est évaluée en nombre d'appels aux Fonctions d'Influences Qualitatives, qui conditionnent le coût effectif de l'algorithme (voir les mesures données dans l'annexe A) :

$$N^2 \times (\text{partie-entière}(H/g) + 1)$$

Cette évaluation, qui donne le nombre d'appels dans le pire des cas, est trop pessimiste. Tout d'abord, dans un graphe représentant une structure causale, chaque variable n'est

liée qu'à un petit nombre de variables causalement influencées, donc une constante  $c$ . De plus, les historiques des variables ne sont pas calculés sur une durée égale à  $H$ . Mais, bien que l'on connaisse la durée des épisodes de la vue initiale, et que l'on sache qu'une influence a la même durée que l'épisode qui en est la cause, la diversité des retards des arcs du modèle rend la propagation des influences complètement asynchrone. Il n'est donc pas possible d'évaluer la durée moyenne de l'historique d'une variable. Il faut s'en tenir à l'évaluation pessimiste suivante

$$c \times N \times (\text{partie-entière}(H/g) + 1)$$

## 5.4 Les limites de ce type d'algorithme

L'algorithme décrit ci-dessus souffre principalement de deux types de limites :

1. L'incapacité de simuler des circuits décrivant des phénomènes "rapides".  
Pour qu'une propagation de formes puisse être faite entre les  $n$  variables d'un circuit, il faut que la somme des retards des contraintes du circuit soit suffisamment grande pour qu'un épisode et son influence sur la même variable à travers le circuit soient temporellement disjoints. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si

$$\text{Pour tout arc } ARC_i \text{ de la boucle } \text{Retard}(ARC_i) < g$$

le comportement de la boucle ne peut être simulé (dans ce cas, l'algorithme ne boucle pas mais s'arrête, chaque variable du circuit étant en attente de la précédente). Cette limite n'est pas surprenante, puisque le but de l'algorithme est de décrire des propagations causales de formes d'évolution. Or dans toute boucle "rapide" la notion de causalité n'a plus de signification très claire. Par exemple, dans une boucle de régulation, il n'est pas possible en toute rigueur, d'orienter la boucle en isolant des "causes" et des "effets" ; le comportement d'une telle boucle est celui d'un équilibre. Si le comportement d'un tel équilibre peut être intégré par une analyse différentielle, ce genre de technique n'est bien sûr pas du domaine du raisonnement qualitatif. La solution à ce problème est apportée par les techniques de modélisation qualitative qui permettent de coder le comportement global (c'est-à-dire déjà intégré) de boucle, lorsqu'elle est soumise à des influences (voir la modélisation d'une boucle de régulation au prochain chapitre).

2. Le "hachage" temporel des historiques.  
Le caractère asynchrone de la gestion des épisodes dans le temps est dû à la

diversité des constantes temporelles des arcs du modèle, et en particulier des retards. Il est probable que plus l'horizon de simulation choisi est grand, plus la durée des épisodes calculés dans les historiques des variables et inférés par les FTQs tend vers la granularité. Effectivement, les épisodes propagés par les FTQs des divers arcs d'entrée sur une variable ont en général des intersections quelconques. Celles-ci engendrent la création dans les historiques d'épisodes dont la durée est plus petite que celle des épisodes des influences. Il pourrait donc y avoir, dans certains cas, une convergence générale de la durée des épisodes vers la granularité. Mais les nombreuses simulations effectuées montrent qu'en pratique, les durées des épisodes n'admettent qu'un nombre fini de valeurs, qui sont en général supérieures à la granularité (voir le chapitre 5).

La complexité de l'algorithme peut en théorie tendre vers l'évaluation donnée dans le paragraphe précédent. Pour pallier ce problème, il faudrait permettre une fusion des épisodes contigus dans l'historique d'une même variable et qui décrivent une évolution semblable (une suite d'épisodes de pentes très proches). Ce type de traitement permettrait d'empêcher la convergence de la durée des épisodes vers la granularité  $g$ . Mais cette technique serait d'un emploi très délicat. Il n'est pas sûr que le gain apporté par l'augmentation de la durée moyenne des épisodes comble le coût supplémentaire dû à la deuxième propagation d'une même partie d'historique (l'algorithme effectuant alors des retours arrière). De plus, cette technique perd de son intérêt lorsque le modèle comporte des circuits. Dans ce cas, il est clair que la borne supérieure de durée d'un épisode construit par le processus de fusion dans l'historique d'une variable du circuit est la somme des retards des arcs du circuit.

## 6 Techniques d'interprétation

Une interprétation a été définie comme l'application qui à toute vue associe une vue plus abstraite. Nous décrivons dans cette section les techniques qui permettent d'implanter cette application, en séparant les techniques de création des nœuds et des arcs.

## 6.1 Création des nœuds d'une vue obtenue par interprétation

### 6.1.1 Le cas particulier des nœuds créés depuis les mesures

Par abus de langage, nous plaçons sous le terme “interprétation” la création des nœuds d'une vue depuis les mesures acquises sur le système physique. On peut raisonnablement considérer qu'une vue décrivant l'évolution du système par des fonctions linéaires par morceaux est une abstraction de l'évolution réelle, même si l'abstraction ne s'applique théoriquement qu'à des vues obtenues depuis des modèles.

La création d'un épisode se fait par la donnée de deux mesures de la variable. Mais ces mesures ne sont pas utilisées telles quelles. Un système de quantification différent de celui qui est implicitement défini par la précision de la mesure est utilisé pour quantifier l'évolution de la variable. Il s'agit simplement d'une discrétisation des mesures. Le pas de discrétisation est déterminé empiriquement pour chaque variable. Il correspond à l'ordre de grandeur de la variation d'amplitude minimale de la variable qui puisse être considérée comme pertinente dans le cadre de l'évolution globale du système. Il est bien évident que ce pas de discrétisation est déterminé en fonction de la connaissance disponible sur la nature des liens causaux liant la variable concernée aux autres variables du modèle. En particulier, l'existence d'une relation dont les paramètres auraient été déterminés numériquement et avec précision<sup>7</sup>, pourra entraîner une quantification très fine de la variable, c'est-à-dire qui se rapproche de celle qui est donnée par la précision de la mesure.

Ce traitement permet de définir une “unité de variation qualitative” pour les variables. Elle est utilisée dans toutes les FTQs comme la mesure du calcul qualitatif.

Il faut noter que les quantifications des variables liées par des arcs doivent être cohérentes. Ainsi dans l'exemple de la section 3, les quantifications des variables  $Q$  et  $U$  doivent vérifier la relation  $Q = cU$  qui lie les ordres de grandeur des évolutions des deux variables.

### 6.1.2 Les nœuds créés par interprétation d'une vue

La description de l'algorithme de simulation a fait apparaître que la création des nœuds d'une vue qualitative est incrémentale, car elle est due à l'exécution de l'instruction “Interpréter(E)”. La fonction “Interpréter” réalise deux traitements, une traduction du vocabulaire de pente ( $\mathfrak{R}$ ) en chacun des divers vocabulaires des modèles utilisés, et une

---

<sup>7</sup>par exemple en utilisant des techniques d'identification.

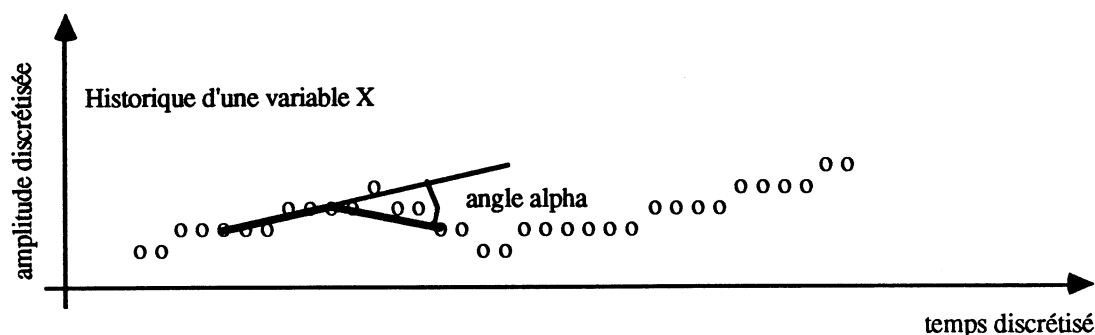


Figure 3.11 : Calcul de courbure discrète avec une "longueur" de demi-tangente égale à 5.

mise à jour des épisodes des vues qualitatives, par grossissement de régions connexes.

### Techniques de traduction du vocabulaire de pentes

Dans le cas du vocabulaire de description de zones d'évolution, cette traduction se limite à un simple test de la position du début et de la fin de l'épisode par rapport aux valeurs de transition entre les différentes zones.

Le vocabulaire de signe de la courbure n'est pas encore implanté. Il existe néanmoins une technique d'analyse de courbure discrète utilisée en VO, et présentée dans la thèse de A. Lux ([Lux85]), qui est applicable à la modélisation de l'évolution d'une variable par une fonction linéaire par morceaux, à la condition qu'elle soit discrétisée en temps comme en amplitude (il paraît logique de choisir un pas d'échantillonnage temporel supérieur ou égal à la granularité  $g$ ). La figure 3.11 permet de comprendre l'esprit de cette méthode. Il est possible de calculer le signe de la courbure en tout point, par déplacement de deux demi-tangentes à la "courbe" de "longueurs", en pas d'échantillonnage, égales. L'angle  $\alpha$  entre la demi-tangente droite et la demi-tangente gauche donne le signe de la courbure discrète ( $0 < \alpha < \pi$  donne une courbure positive,  $\pi < \alpha < 2\pi$  une courbure négative).

La "longueur" choisie des demi-tangentes détermine la résolution temporelle de la méthode (qui présente des analogies avec un traitement de convolution). En la faisant varier, il est donc possible d'obtenir différents niveaux d'abstraction des vues de courbure. Un avantage important de cette méthode tient à son caractère incrémental dans le temps, qui permet de l'utiliser facilement dans l'algorithme de simulation.

Par contre, le choix des niveaux de résolution des vues à construire est plus délicat. Il

peut être conditionné par la connaissance a priori de “patterns” (d’indices) qui peuvent être reconnus dans les évolutions des variables. Par exemple, dans l’application qui nous intéresse, des oscillations sur certaines variables, aussi appelées “pompage”, peuvent être néfastes au procédé, et nécessiter des actions spécifiques sur le procédé qui permettent de les éliminer. Le fait de connaître la dynamique de ces “patterns” permet de sélectionner les résolutions qui les mettent en évidence.

### Techniques de grossissement de région connexe

Soit une vue  $V'$  obtenue par interprétation incrémentale de la vue  $V$  de simulation. Si l’interprétation d’un épisode  $E$  de  $V$  est égale à celle de l’épisode qui le précède dans l’historique d’une variable, alors l’intervalle temporel de l’épisode  $E'$  de la vue  $V'$  qui décrit l’interprétation courante de l’évolution prédite de la variable est étendu de la durée de  $E$ . Dans le cas contraire, un nouveau nœud est créé dans  $V'$ , de descripteur égal à l’interprétation de  $E$  et de même domaine temporel. C’est le traitement de l’algorithme qui a été présenté dans la figure 2.6.

## 6.2 Création des arcs d’une vue obtenue par interprétation

La création des arcs entre les nœuds des vues obtenues par interprétation suit exactement le critère temporel donné dans la définition de la relation “plus-abstraite” (définition 6 de la section 2.1). Soit un nœud  $N$  calculé en simulation qui admet une interprétation en un nœud  $N'$  d’une vue plus abstraite. Si le nœud  $N$  admet comme pères des nœuds  $N_i$  ayant pour interprétation des nœuds  $N'_i$  alors tous les arcs qui n’existent pas déjà entre les  $N'_i$  et  $N'$  sont créés dans la vue obtenue par interprétation. Tous les arcs de la vue  $V'$  sont créés par ce mécanisme.

## 7 Résumé des choix techniques de l’implantation

L’ensemble des techniques décrites dans ce chapitre se place dans le cadre du suivi de l’évolution d’un système physique dynamique. Elles permettent de créer des points de vue particuliers sur l’évolution perçue du système.

Un modèle est composé :

- d’un graphe orienté dont les nœuds sont des variables qui représentent des grandeurs physiques intéressantes, et les arcs des relations de causalité entre ces variables.

- d'un vocabulaire qui permet de qualifier les évolutions des variables.

A partir des modèles et de mesures sur l'évolution des variables, il est possible de construire des vues. Les vues sont des graphes qui permettent de relier causalement des parties pertinentes, appelées épisodes, de l'évolution des variables. Suivant le modèle depuis lequel est construite une vue, les épisodes sont décrits grâce à des vocabulaires différents. Comme le choix des variables d'un modèle, le choix des vocabulaires est motivé par l'utilisation du modèle. Les vocabulaires choisis sont les suivants :

- Un vocabulaire permettant de simuler des évolutions, qui est  $\mathfrak{R}$ .  
Les données disponibles sur l'évolution du système supervisé sont des mesures. Un épisode approxime une évolution de variable entre deux mesures par un segment de droite, décrit par sa pente. Cette technique de représentation très simple permet de développer des outils de simulation qui donnent un caractère prédictif à la modélisation.
- Des vocabulaires permettant d'interpréter les évolutions mesurées et simulées.  
Le premier de ces vocabulaires permet de décrire des zones d'évolution pour chaque variable du modèle. En situant la position des variables dans leurs zones, il est facile de localiser les évolutions anormales, de trouver les liens de cause à effet qui les unissent, et d'anticiper les effets de ces anomalies en effectuant des actions correctrices sur le procédé. Ces caractéristiques justifient le choix de ce vocabulaire pour l'aide à la supervision de procédés. Un deuxième vocabulaire qui n'a pas été implanté donne le signe de la courbure d'une évolution. Son intérêt potentiel est de pouvoir qualifier la dynamique d'une évolution, ce qui n'est pas le cas du premier vocabulaire, qui est statique.

Des techniques de simulation permettent de prédire l'évolution du système modélisé, à partir de conditions initiales que sont les épisodes construits depuis les mesures. Des procédures, appelées Fonctions de Transfert Qualitatives (FTQs) sont attachées aux arcs du modèle. Elles permettent de calculer comment les évolutions des variables sont causalement liées, par inférence d'épisodes. En admettant parmi ses paramètres d'entrée un épisode E de la variable initiale d'un arc, une FTQ permet d'inférer un ensemble d'épisodes qui décrivent l'influence de E sur l'évolution de la variable terminale de l'arc. Une FTQ permet donc de préparer la création des nœuds et des arcs d'une vue.

Un algorithme de simulation permet d'ordonner les appels aux FTQs de telle manière qu'une vue puisse être créée. Il permet un raisonnement sur des données incomplètes lorsqu'il manque des influences sur une variable pour pouvoir calculer son évolution. Dans ce cas, les influences manquantes sont considérées comme nulles et seule une



évolution partielle est calculée. Des structures de données permettent de distinguer les domaines temporels des évolutions complètement et partiellement prédites, ce qui permet une utilisation différente de ces résultats.

Finalement, des techniques d'interprétation permettent de construire des vues plus abstraites que celles qui sont obtenues en simulation. Elles permettent donc d'obtenir des points de vue différents et en général partiels de l'évolution du système modélisé. Ces vues utilisent le vocabulaire de description de zones d'évolutions des variables. Mais elles peuvent permettre d'obtenir des vues utilisant d'autres vocabulaires, comme celui du signe de la courbure.

---

---

## Chapitre 4

### Modélisation Qualitative et Automatique

---

---

*Ce chapitre décrit une application des techniques de raisonnement qualitatif présentées dans la thèse. Cette application consiste en un système d'aide à la supervision d'un procédé industriel continu, développé grâce au soutien d'un projet de recherche national nommé "ALLIANCE", qui regroupe un grand nombre d'industriels et de laboratoires de recherche<sup>1</sup>.*

*L'intérêt du projet ALLIANCE a été de faire travailler en commun des personnes possédant des compétences très variées, comprenant des ingénieurs spécialistes du procédé industriel étudié, des automaticiens et des informaticiens. Le travail présenté dans cette thèse a ainsi fortement bénéficié de la collaboration avec Sylviane Gentil et Stéphane Féray Beaumont, tous deux automaticiens du Laboratoire d'Automatique de Grenoble.*

*Le chapitre comprend deux sections. La première concerne les problèmes de modélisation pour une automatique qualitative. Ce travail, essentiellement mené par S. Gentil et S. Féray Beaumont, ne constitue bien sûr pas une application mais définit*

---

<sup>1</sup>Le projet ALLIANCE est financé par le Ministère de la Recherche et de la Technologie (sous l'égide du comité "Automatisation des Procédés Continus") et par Electricité de France. Il réunit des sociétés, le C.E.A., E.D.F., S.G.N., I.T.M.I., des centres de recherche privés, SHELL Recherche et L'I.I.R.I.A.M., et des laboratoires de recherche publique, le L.A.G. et le L.A.I.H. Bien que n'étant pas contractant au projet le L.I.F.I.A. y a contribué par l'environnement humain et matériel qui ont permis ce travail de thèse.

*un domaine de recherche propre. Aussi seuls quelques résultats seront présentés, qui permettent de juger de l'intérêt d'une approche qualitative en automatique et de la généralité des outils informatiques présentés précédemment. La deuxième section concerne plus directement la modélisation qualitative du procédé industriel étudié.*

#### *Guide de Lecture*

*La deuxième section peut être ignorée en première lecture, sauf éventuellement par un lecteur spécialement intéressé par les relations du travail présenté avec l'automatique.*

## **1 L'Automatique Qualitative**

### **1.1 Les motivations d'une approche qualitative en Automatique**

L'automatique a bénéficié durant les dernières années des progrès conjoints des théories mathématiques des systèmes dynamiques et de l'informatique qui a permis la mise en œuvre pratique de ces modélisations.

Ainsi les outils de contrôle-commande de systèmes physiques dynamiques ont largement évolué : les méthodes de régulation ont d'abord été locales, une régulation de type P.I.D., par exemple, ne contrôlant la position que d'une seule grandeur par rapport à sa consigne, indépendamment de l'évolution des autres grandeurs physiques du système ; les systèmes de contrôle-commande modernes sont maintenant multi variables ; c'est l'état global du système physique qui est comparé à un état désiré, la commande calculée étant répartie sur tous les moyens d'action disponibles.

Ces progrès ont été rendus possibles par le passage des modes de représentation du type "fonction de transfert" à des représentations d'état qui utilisent largement des résultats d'algèbre linéaire. Ces modèles formels sont instanciés en modèles de systèmes physiques particuliers en utilisant des techniques mathématiques dérivées des techniques de régression. Cette étape de construction d'un modèle particulier est connue sous le nom "d'identification". Les progrès de l'informatique ont permis l'implantation de ces outils dans le cadre de représentations échantillonnées.

A un niveau de contrôle plus élevé, l'ordinateur permet aussi d'assurer une fonction de supervision du système physique et du contrôle-commande de bas niveau. Il peut ainsi assurer les procédures d'arrêt automatique d'une installation, en appliquant des séquences de consignes qui seront suivies par le système de contrôle commande. De plus, certaines procédures de reconfiguration automatique peuvent être lancées lors

de pannes matérielles, en tirant parti de redondances d'équipements. Enfin, un rôle important du calculateur de supervision est de stocker et de présenter les données acquises sous formes d'historiques, de synoptiques, etc.

Cependant, malgré les progrès importants des techniques d'ergonomie, l'automatisation de plus en plus complète et centralisée de systèmes physiques comme les procédés industriels pose de graves problèmes. Le processus d'automatisation a été en effet envisagé dans le but de l'élimination totale de l'homme dans les tâches de conduite de ces systèmes. Mais jusqu'à présent, et de nombreux facteurs tendent à prouver qu'il en sera toujours ainsi, l'automatisation de nombreux systèmes complexes n'a pu être complète. Cela entraîne la situation paradoxale suivante, clairement soulignée par L. Bainbridge dans "Ironies of Automation" ([Bai83]) : des systèmes de contrôle automatique sont conçus parce qu'ils sont plus efficaces que l'homme, en rapidité, précision et constance de jugement ; mais lorsque leur concepteur ne sait pas comment leur faire assurer certaines fonctions très délicates, la responsabilité en est laissée à l'opérateur humain, qui est pourtant moins performant. Ce paradoxe est probablement la cause première de la plupart des problèmes d'automatisation en conduite de procédés industriels et des accidents parfois graves qui en découlent. Il mérite donc d'être détaillé.

L'impossibilité de réaliser des systèmes automatiques généraux, capables de remplacer complètement l'homme dans le contrôle et la supervision de systèmes physiques quelconques, peut être expliquée par deux causes :

- La première tient au manque de robustesse des modélisations utilisées en automatique. En effet la plupart des modèles utilisés pour représenter la dynamique d'un procédé, par exemple, sont comportementaux, c'est-à-dire établissent des relations mathématiques entre les variables d'état du procédé. Les variables d'état constituent la "mémoire"<sup>2</sup> suffisante pour pouvoir reconstruire un état complet des paramètres surveillés, étant données les mesures acquises sur le procédé. Prenons l'exemple des retards pour illustrer le caractère comportemental des modèles utilisés pour la commande en automatique. Un retard est toujours associé à un transport de matière, qui prend un certain temps. Ainsi, une perturbation de la température d'un fluide d'un réservoir lié à un second réservoir par un tuyau ne se propagera qu'après un certain retard, lié au débit du fluide dans le tuyau. Une modélisation physique du phénomène s'intéressera au transport lui-même, et à d'éventuels phénomènes de turbulences. Mais cette finesse

---

<sup>2</sup>ou encore l'ensemble des conditions initiales, en termes d'équations différentielles

de description est inutile pour le contrôle du système<sup>3</sup> et surtout entraînerait la création de modèles gigantesques à l'échelle d'un procédé tout entier. Ces modèles seraient inutilisables en temps réel.

Parce qu'il est plus simple qu'un modèle de la physique du procédé, un modèle de contrôle-commande est dépendant d'une hypothèse forte : la structure du procédé qui existait lors de son identification ne doit pas changer pendant l'exploitation. Dans le cas contraire, par exemple lors de pannes matérielles importantes, le modèle devient complètement obsolète. Des méthodes récentes comme les commandes auto-adaptatives permettent dans une certaine mesure de rendre les modèles utilisés plus robustes, mais vis à vis d'évolutions continues de paramètres physiques (dues à des usures par exemple).

- La deuxième cause réside dans le manque de généralité des modèles utilisés. Même lorsque la structure d'un système physique reste inchangée, son comportement peut être très complexe et difficile à modéliser de manière générale. C'est le cas de tous les systèmes dont les évolutions présentent des non-linéarités importantes. Bien que les automaticiens utilisent des outils mathématiques de plus en plus sophistiqués, il y a peu d'espoir qu'un cadre général puisse être trouvé pour la commande des systèmes non-linéaires.

Pour toutes ces raisons, l'homme reste toujours responsable en dernier ressort de la conduite des systèmes physiques complexes.

Cette présence n'est donc que la conséquence de l'état de l'art imparfait de l'automatique. Elle n'a pas réellement été prise en compte dans le processus d'automatisation. Il se pose par conséquent de multiples problèmes de répartition de tâches entre l'homme et les équipements de contrôle-commande automatiques :

- Le problème principal est celui de la méconnaissance du comportement dynamique du procédé et de son contrôle-commande par l'opérateur. Dans le cas de systèmes centralisés multi-variables, et plus généralement dans le cas de toute commande "moderne" utilisant une représentation d'état, il est probable que même le concepteur de la commande ne puisse pas analyser de manière fine le comportement de l'automatisation. En particulier, il est pratiquement impossible de trouver une explication causale liant les évolutions des variables. Il est donc très difficile de juger dynamiquement quand le système de contrôle-commande se met à mal fonctionner.
- Et ce problème est un cercle vicieux puisque plus les systèmes automatiques

---

<sup>3</sup>tout du moins dans des conditions d'exploitation normales

progressent plus ils prennent en charge des tâches qui étaient exécutées par l'opérateur. Celui-ci n'est donc plus du tout entraîné pour conduire son procédé de manière manuelle, lorsqu'il a été capable de détecter un dysfonctionnement. Ses interventions peuvent être complètement inappropriées.

- Enfin, un facteur humain non négligeable est celui de l'aspect dévalorisateur de l'automatisation, qui est par conséquent souvent très mal vécue.

Les deux acteurs de l'automatisation, l'homme et l'équipement de contrôle-commande, peuvent donc se leurrer mutuellement. Cela explique que l'homme devienne le premier responsable des accidents de conduite de systèmes complexes. C'est le cas des procédés continus, avec par exemple l'accident de Three Miles Island (voir [Nel82]). Mais c'est aussi le cas du pilotage d'avions civils, où plus de la moitié des accidents sont dus à de mauvaises décisions humaines, en conflit avec l'automatisation embarquée (donnée présentée dans une enquête sur les problèmes de l'automatisation des cockpits [CN85]).

La solution à ces problèmes est bien sûr d'inclure l'homme dans le processus d'automatisation. Cette démarche peut conduire dans un premier temps à réduire les capacités des systèmes automatiques, lorsqu'elles ne sont pas absolument nécessaires. Dans ces conditions, il sera peut être possible de repenser les techniques de modélisation utilisées en automatique, en y réservant une plus grande place à l'opérateur. Nous pensons que le raisonnement qualitatif est une technique utile et nécessaire dans cette démarche.

## 1.2 Des techniques de modélisation et leurs limites

Cette section présente quelques résultats relevant de l'approche "automatique qualitative" développée au cours du projet ALLIANCE. La principale caractéristique d'un modèle qualitatif tel qu'il a été présenté est d'être orienté. L'interprétation des évolutions de variables se fait en établissant des relations binaires de cause à effet entre ces évolutions. Ce type d'interprétation est très fort et n'est pratiquement pas toujours possible. En particulier, la figure 4.1 donne deux représentations d'une variable régulée. La première représentation possède une sémantique très pauvre : la régulation est représentée par un arc du nœud sur lui-même. La deuxième représentation distingue le capteur et l'actionneur de la régulation. Ces représentations posent plusieurs problèmes :

- Elles ne correspondent pas à une représentation intuitive de la régulation qui définit un équilibre pour lequel il n'est pas possible de définir une entrée et une

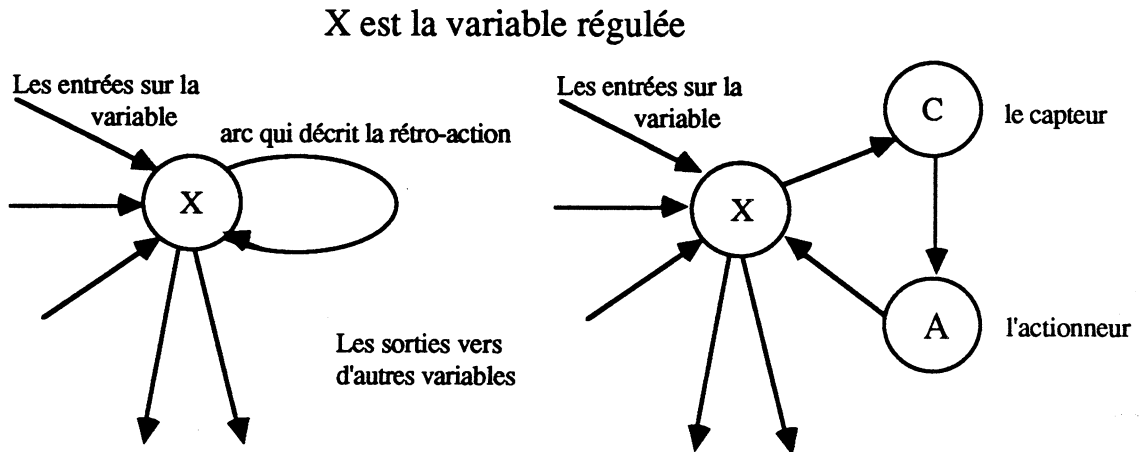


Figure 4.1 : Deux modèles “causaux” d’une variable régulée.

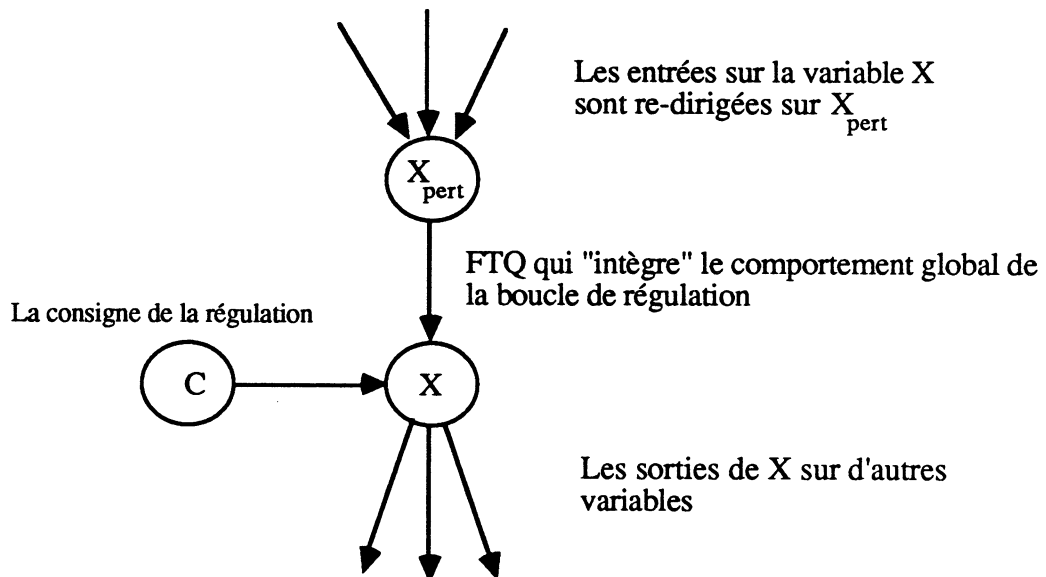


Figure 4.2 : Une représentation qualitative “acausale” de variable régulée.

sortie. Mais elles ne correspondent pas non plus à un modèle de raisonnement, qui devrait intégrer le fonctionnement de la boucle dans son ensemble.

- Elles ne sont pas adaptées à un algorithme de simulation qualitative, de part la très faible dynamique du circuit à simuler.

La figure 4.2 montre un des modèles qualitatifs de variable régulée qui ont été implantés. Une variable  $X_{pert}$  est introduite qui somme toutes les perturbations qui arrivent sur la variable  $X$ . Le comportement global de la régulation est alors décrit

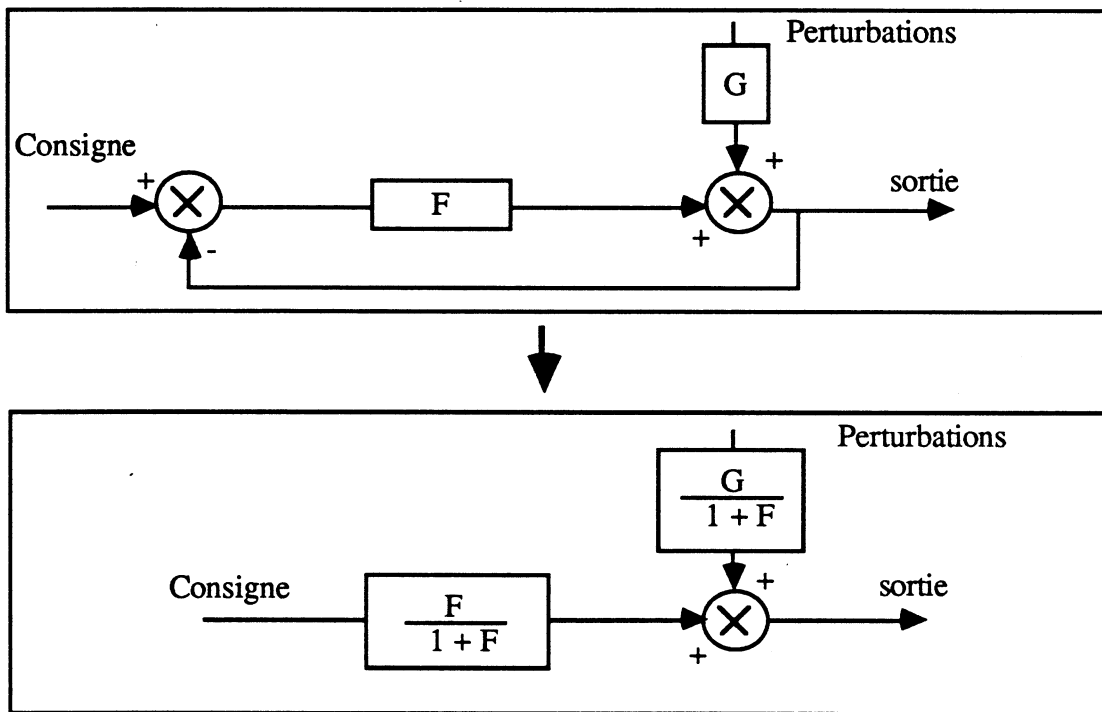


Figure 4.3 : L'élimination de la boucle dans un schéma fonctionnel.

par une fonction de transfert qualitative. La figure 4.3 résume la transformation du modèle fonctionnel classique de l'automatique qui permet d' "éliminer" la boucle (tirée du rapport de D.E.A. de S. Féray Beaumont). La Fonction de Transfert Qualitative "régulation" est l'implantation de la fonction de transfert  $F/1 + F$ .

De la même manière des équilibres à  $n$  variables doivent pouvoir être décrits. Représenter un équilibre entre deux variables par un circuit comprenant deux nœuds du graphe n'est pas possible, pour des raisons identiques à celles du cas précédent. Il n'est pas possible de distinguer des influences causales dans le déplacement d'un équilibre qui est global. Et une simulation de l'équilibre par des interactions locales entre variables oblige à adopter une granularité temporelle très fine, qui n'a guère de sens dans le cadre d'un raisonnement qualitatif. La figure 4.4 donne la technique de modélisation qualitative utilisée. A nouveau, des variables intermédiaires sont introduites, qui permettent de distinguer les influences arrivant sur l'équilibre du déplacement de l'équilibre qui en est la conséquence. Dans la figure, ce sont les variables  $x_{eq}$  et  $y_{eq}$  qui somment les influences sur les composantes de l'équilibre. Entre chaque variable de type  $X_{eq}$  et sa variable associée  $X$  il existe une relation de type identité. Les arcs croisés permettent de décrire le déplacement de l'équilibre du à l'évolution de chacune des composantes.



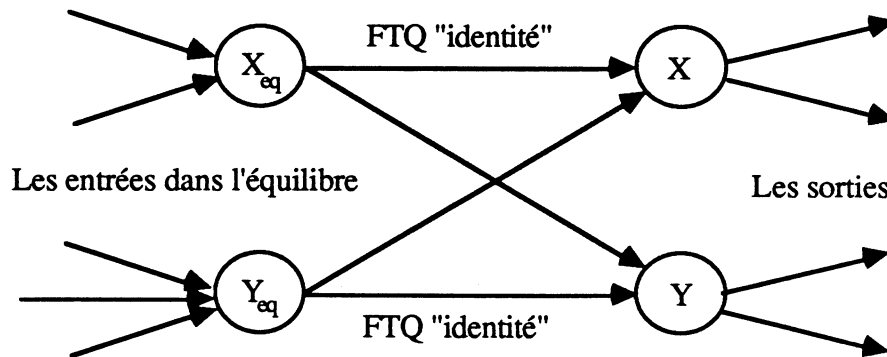


Figure 4.4 : Une représentation "acausale" d'un équilibre entre deux variables.

Enfin ces modèles peuvent être combinés : il est possible de modéliser des équilibres comprenant des variables régulées. Pour ne pas gêner l'utilisateur du système avec ces notions, un petit compilateur de modèle a été écrit, qui permet de compiler une description déclarative très simple du modèle du procédé en un modèle "interne" dont les variables supplémentaires restent cachées à l'utilisateur.

Ces techniques de modélisation posent la question du rôle exact de variables intermédiaires dans un modèle qualitatif. Un parallèle peut être fait avec les représentations d'état de l'automatique, où des variables auxiliaires sont introduites simplement pour pouvoir résoudre un système. Il faut donc se demander si l'introduction de variables intermédiaires n'est pas un signe d'échec de la démarche de modélisation qualitative. Nous avons en effet prétendu qu'une modélisation qualitative est un ensemble de modèles qui permettent la traduction de données continues observées ou calculées à l'aide de modèles "fins", en des données qualitatives discrètes. On pourrait par exemple objecter que les nœuds de type "pert" et "eq" ne correspondent à aucune grandeur physique mesurable. Cependant, le rôle du modèle proposé n'est pas de donner une représentation la plus objective possible du système physique étudié, mais au contraire de définir des interprétations de son comportement c'est-à-dire des vues fortement subjectives. Dans ce cadre, les nœuds du graphe d'un modèle peuvent tout aussi bien représenter des concepts qui sont étapes de raisonnement que des grandeurs physiques. Les nœuds de type "pert" et "eq" représentent effectivement des étapes d'un raisonnement "naturel" sur le comportement dynamique de boucles de rétroaction et d'équilibres. La modélisation est donc bien cohérente.

Les limites de cette modélisation du point de vue de l'automatique sont directement héritées des limites des représentations par fonctions de transfert. Des résultats bien connus en automatique montrent que les fonctions de transfert ne permettent "que"

de représenter les états commandables et observables d'un système physique. Seules les représentations d'état permettent de modéliser les états non observables et non commandables.

Une direction de recherche pourrait donc consister à étudier les conditions d'interprétation qualitative de résultats fournis par des représentations d'état. Mais il faut souligner que la difficulté de cette approche serait toute autre. Il n'existerait en effet plus de ressemblance syntaxique entre le modèle utilisé pour simuler le comportement du système physique modélisé et les modèles servant à donner des explications à l'utilisateur.

## 2 Application à l'aide à la conduite d'un procédé continu

### 2.1 Modélisation du procédé étudié

Le procédé étudié au cours du projet ALLIANCE est un procédé de test installé au Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache. Ce procédé s'appelle la S.E.T., pour Station d'Essais Technologiques. Il reproduit le circuit secondaire de sodium et le circuit d'eau des centrales de la filière à neutrons rapides, du type Superphénix. Le but de ce procédé est de tester des maquettes en grandeur réelle de générateurs de vapeur sodium-eau. Il n'est donc pas "productif", et le seul objectif de l'exploitation est de respecter des contraintes de test données par le fabricant de la maquette. La figure 4.5 présente un schéma très simplifié de l'installation (qui fait la taille d'un immeuble...). Le circuit de sodium comprend une pompe alimentaire et un réchauffeur électrique qui simule l'échangeur de chaleur avec le circuit de sodium primaire. Le circuit d'eau comprend des vannes de détente et de désurchauffe qui simulent les turbines, un condenseur, un réchauffeur qui évite un choc thermique à l'entrée du générateur de vapeur et une pompe d'alimentation. La figure 4.6 donne le modèle qualitatif du procédé, qui comprend seulement vingt-trois variables.

### 2.2 Expérimentations

Le modèle décrit ci-dessus a été implanté dans le cadre d'un système informatique d'aide à la conduite qui est décrit dans le chapitre suivant. Il a été mis au point grâce à une campagne d'analyse indicelle, qui a permis de raffiner les connaissances disponibles sur les ordres de grandeur des gains et de la dynamique du procédé. Le

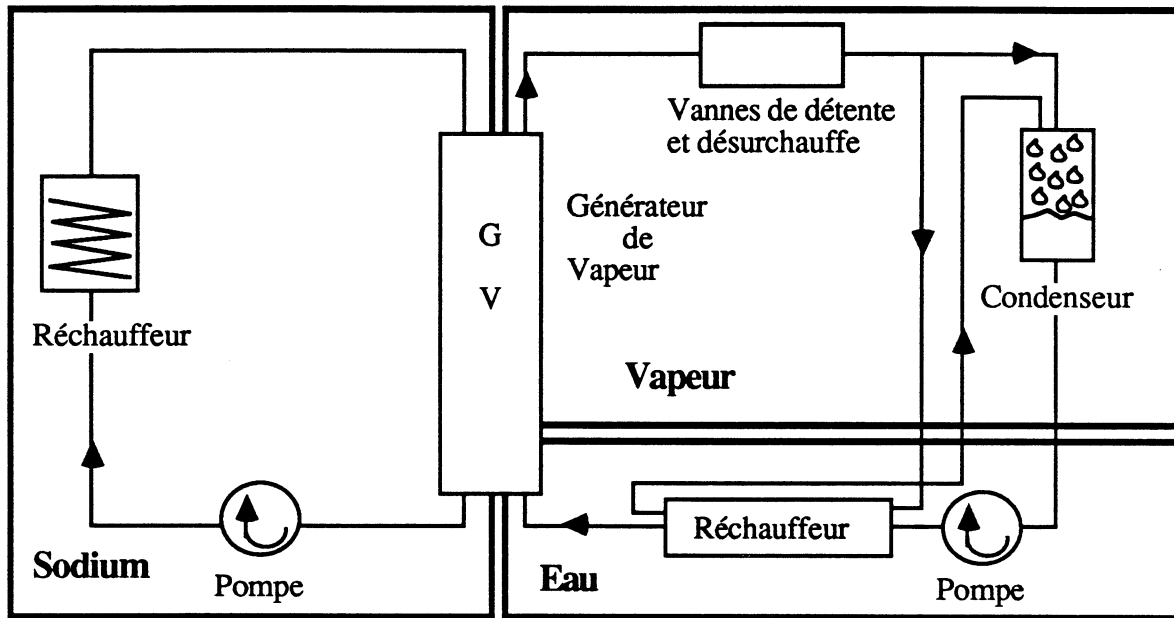


Figure 4.5 : Schéma simpliste du procédé étudié.

système complet est en cours d'expérimentation sur site. De plus, des modèles de deux autres procédés ont aussi été construits qu'il n'est pas possible de décrire ici. Pour un de ces procédés, il a été possible de comparer des séries de mesures aux résultats de simulation obtenus à partir du modèle.

Une conclusion qu'il est déjà possible de tirer est que la technique de modélisation proposée est générale et s'applique à une large classe de procédés continus. Les méthodes de calcul proposées permettent d'inférer des résultats et leurs explications compatibles avec l'évolution réelle du procédé, pour les tests qui ont été faits, ce qui est un résultat minimum. Par contre, l'état actuel de l'expérimentation sur site n'a pas encore permis de valider le système complet, en évaluant l'aide réelle apportée à l'opérateur et ses conséquences à plus ou moins long terme sur la gestion du procédé.

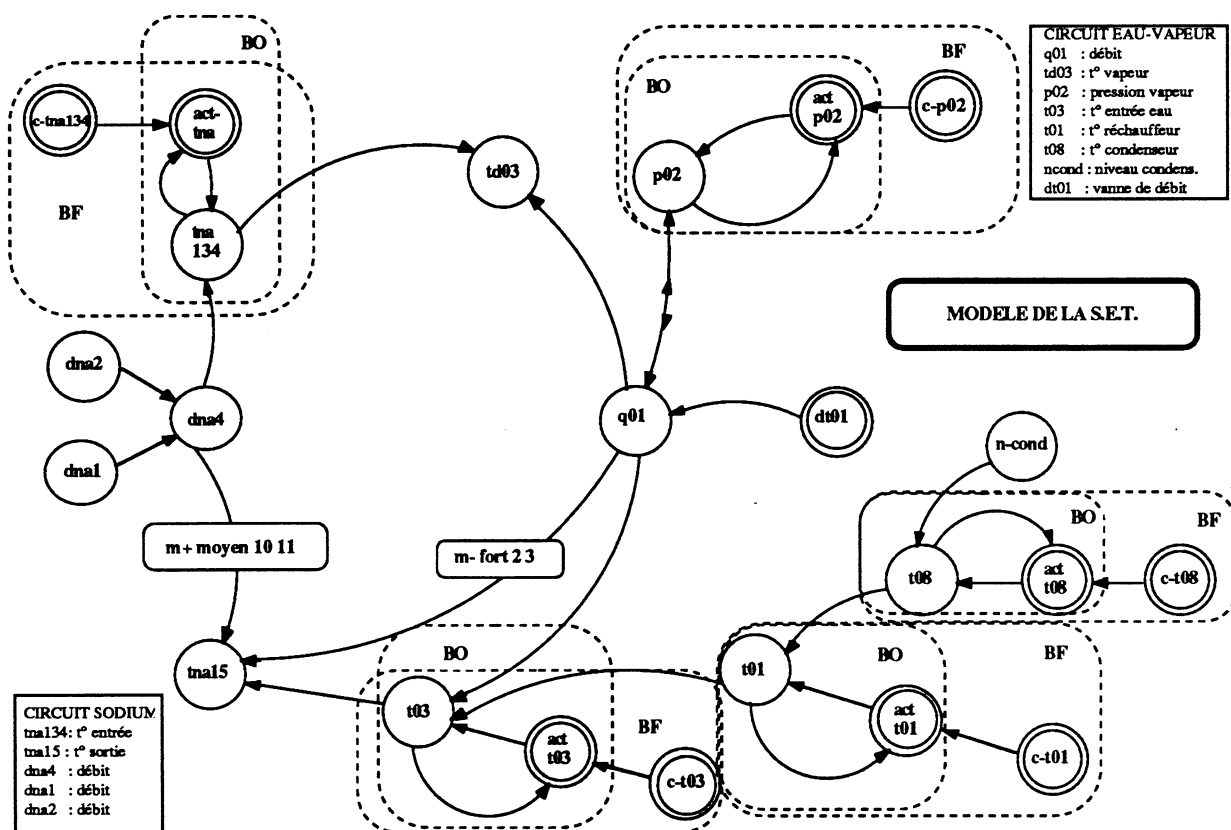


Figure 4.6 : Le modèle qualitatif du procédé.



---

---

## Chapitre 5

### Méthodes pour la supervision en ligne de procédés continus

---

---

*Nous présentons dans ce chapitre les outils qui ont permis l'implantation d'un système de supervision connecté en ligne à un procédé continu. Le but du système développé est d'acquérir périodiquement des mesures sur le procédé pour prédire et expliquer son comportement à l'opérateur, et lui proposer des stratégies d'actions lorsque des problèmes sont présents. Nous ne décrivons pas tous les détails de l'implantation, mais seulement deux aspects importants selon nous pour tout système de supervision, le maintien de la cohérence au cours du temps des données sur le système physique surveillé, et le respect de contraintes temporelles d'exécution.*

*La première section énonce brièvement les objectifs du système développé et les écueils qu'il faut surmonter pour implanter un système de supervision en ligne. Dans la deuxième section, nous présentons les principes généraux de l'architecture du système. La troisième section présente les algorithmes utilisés pour la comparaison des évolutions de variables prédites avec les évolutions mesurées, et la maintenance de vérité qui s'en suit. Enfin, la dernière section donne un exemple des techniques utilisées pour permettre au système de respecter des contraintes temporelles d'exécution.*

### Guide de Lecture

*En lecture rapide, on peut se contenter de lire les sections 2.2, 3.1 et 4. La section 2.2 présente les principes généraux de l'architecture du système de supervision développé. La section 3.1 donne une idée des techniques de maintenance de vérité des historiques des variables prédits lorsque les prédictions diffèrent des mesures. Enfin, la section 4 présente les techniques de contrôle d'exécution des tâches du système de supervision.*

*En première lecture, on peut négliger la section 2.1 qui fait un rapide état de l'art de l'implantation de systèmes d'IA en ligne.*

## 1 Introduction

Le but du projet ALLIANCE était initialement d'étudier un système de traitement des alarmes provenant des équipements classiques de contrôle des procédés industriels continus.

Nous avons détaillé dans le chapitre précédent les causes possibles de mauvaise coopération entre l'opérateur et le système automatique de contrôle-commande. Il apparaît que l'effort d'aide à l'opérateur doit plus porter en amont du filtrage d'alarmes proprement dit, c'est-à-dire au niveau de la tâche globale de supervision du procédé.

La démarche finalement adoptée a été de réaliser un système de supervision, entièrement construit autour d'un modèle qui définit un comportement normatif du procédé. En pratique, un système de supervision connecté en ligne au procédé doit donner à l'opérateur :

- des explications sur le comportement prédit du procédé,
- des conseils d'actions, lui permettant d'anticiper la venue de certains problèmes, et du même coup des apparitions d'alarmes,
- des mises en garde, lorsque le comportement observé du procédé n'est plus explicable par le modèle.

L'intérêt d'un système de supervision de ce type est donc multiple. Il est d'abord d'ordre pédagogique, en permettant de continuellement expliquer quel doit être le comportement attendu du procédé, suivant le contexte d'exploitation rencontré. Mais il permet aussi de limiter le stress de l'opérateur en situation d'urgence. En effet, il analyse si le contexte d'évolution non nominal qui entraîne l'apparition d'alarmes est une simple situation perturbée, qui est traitée correctement par le système de contrôle-commande, ou une situation qui nécessite une intervention de l'opérateur. Dans ce cas,

le système de supervision peut donner des conseils d'action qui guident l'opérateur dans sa reprise en main du procédé.

A terme, un système de supervision de ce type devrait donc pouvoir améliorer les conditions de travail de l'opérateur, et par conséquent la rentabilité du procédé, avec l'économie des arrêts automatiques qui auront pu être évités.

Nous avons vu dans les chapitres précédents quels outils de modélisation et de simulation ont été développés pour implanter un modèle adapté à la supervision. Pour pouvoir utiliser avec profit ces techniques dans un système opérationnel en ligne, il reste des écueils importants à surmonter :

- Tout d'abord, et c'est une évidence, le système doit être "fiable". Des résultats corrects doivent être proposés à l'opérateur. Lorsque le système n'est plus en mesure de le faire, il doit signaler que le modèle qu'il utilise n'est plus valide. La fiabilité du système est sa capacité à adapter le niveau de détails des explications qu'il donne à leur qualité.
- Ensuite, les explications et les conseils d'actions doivent pouvoir être donnés par le système dans des temps compatibles avec la dynamique du procédé, c'est-à-dire en "temps réel".

Si l'une de ces conditions n'était pas réalisée, l'opérateur ne pourrait pas avoir confiance dans le système de supervision, et cesserait donc rapidement de le consulter.

La suite du chapitre détaille les techniques employées pour résoudre ces problèmes. Des techniques de recalage des historiques prédits des variables du modèle assurent une bonne "robustesse" au système de supervision. Leur rôle est en effet d'intégrer les différences entre les évolutions prédites et les évolutions mesurées des variables. D'éventuelles faiblesses de modélisation et les effets des approximations faites dans les FTQs sont donc palliés par la capacité de se "recaler" par rapport à l'évolution réelle du procédé.

D'un autre côté, nous proposons un découpage des différents traitements que doit assurer le système en "tâches", associé à des outils de mesure de performance et de compromis entre le coût d'obtention et la qualité des résultats fournis par les tâches. Ce type d'architecture de système de supervision permet d'adapter le type de traitement à lancer en fonction des contraintes temporelles à respecter pour donner des résultats à l'opérateur.



## 2 L'architecture du système de supervision

Nous donnons dans cette section une idée générale des problèmes qui se posent pour la construction de systèmes employant des techniques d'IA en ligne. Après avoir fait un rapide état de l'art de ce domaine, nos propres choix sont exposés.

### 2.1 Quels types d'architecture pour des systèmes d'IA en ligne ?

Parce qu'il se fait sentir un besoin urgent de systèmes informatiques d'aide à la prise de décisions en temps réel<sup>1</sup>, il est naturel de vouloir appliquer des techniques d'IA à ce type de problème. Ainsi, de plus en plus d'études concernent des systèmes "experts" devant fonctionner en "temps réel". Mais il reste encore beaucoup de problèmes techniques à résoudre pour arriver à des résultats convaincants. De plus, ces problèmes sont probablement liés au fait qu'il manque toujours une définition claire à la notion de "temps réel" pour des systèmes d'IA.

#### 2.1.1 Des systèmes qui reposent essentiellement sur les performances des machines

De nombreux systèmes ont été proposés dans le cadre assez large de l'aide à la prise de décisions pour la supervision ou le diagnostic des procédés continus. On peut citer les systèmes ARTIFACT (voir [FL85]), PICON (voir [Ma84]), ESCORT (voir [Sa86]), EXTASE (voir [Ver85],[Ver87]), REACTOR (voir [Nel82]), etc.

L'intérêt de ces systèmes est de pouvoir coder des connaissances de manière déclarative, de la façon la plus adaptée possible au type de problème abordé<sup>2</sup>. Leur caractéristique "temps réel" est en général simplement justifiée par la capacité d'acquérir des données à des fréquences fixées. Mais il n'est pas possible de garantir des temps de traitements. Et tout calcul de borne de temps d'exécution maximum donne en général des résultats trop mauvais pour être exploitables. Les capacités "temps réel" de ces systèmes reposent donc sur les performances du matériel utilisé, comme les machines lisp, ou des techniques logicielles de base, comme la compilation de règles. Si on est capable d'évaluer sans trop de mal le nombre d'inférences par seconde qu'il est possible d'atteindre, le nombre total d'inférences que devra accomplir le système pour résoudre

---

<sup>1</sup>pour l'aide à la supervision des procédés continus, l'aide au pilotage d'avions de ligne ou de combat, etc ...

<sup>2</sup>avec par exemple la notion de "couplage" dans EXTASE

un problème donné est lui bien plus difficile à approcher . . .

Il semble néanmoins que dans un certain nombre de cas, des systèmes liés à des applications concrètes donnent des résultats de temps d'exécution tout à fait satisfaisants. Ainsi le système d'aide à la gestion des alarmes d'une centrale nucléaire (EXTRA, voir [AL86]) est en cours d'implantation sur la centrale de Bugey. A partir des deux mille informations acquises en ligne, le système établit un diagnostic en environ sept secondes sur un ordinateur Bull Sps7. L'effort de développement a porté essentiellement sur des techniques de compilation de règles permettant d'éliminer une grande partie du coût d'exécution dû aux mécanismes d'inférence.

### 2.1.2 Des systèmes à bases de connaissances parcellisées

Une deuxième classe de travaux peut être dégagée, qui propose une démarche de programmation adaptée aux exigences de performance des systèmes en ligne. Un accent particulier est mis sur la capacité d'interruptibilité de ce type de système, pour le rendre capable de prendre à tout moment "rapidement" en compte des informations en provenance de ses capteurs. C'est cette capacité qui leur vaut le nom de "systèmes réactifs" dans la littérature.

On peut citer parmi les systèmes dits "réactifs" des systèmes d'aide à la maintenance d'équipements complexes comme les Systèmes Experts Procéduraux (voir [GB83], [GL86]), des systèmes de navigation pour les robots mobiles (voir [Kae86]), ou d'aide à l'appontage des avions sur un porte-avions (le système AIRPLAN, [Ma83]). Le principe général de construction de ces systèmes est de parcelliser les connaissances utilisées, sous la forme de bases de règles ou d'ensembles de procédures. L'interpréteur du système ne considère les connaissances dont il dispose pour résoudre un problème que base par base. Le but de cette organisation des connaissances est d'autoriser des points d'interruption entre le traitement des différentes bases, qui laisse l'ensemble des données du système dans un état cohérent. Dans le cas contraire, une telle capacité d'interruption présenterait un intérêt moindre, le traitement de l'interruption ne pouvant pas utiliser les données mises à jour par les traitements précédant l'arrivée de l'interruption et obligeant finalement une réinitialisation au moins partielle du système.

L'hypothèse fondamentale sur laquelle repose ce principe d'organisation des connaissances est l'indépendance des différentes bases utilisées par le système. Mais, en pratique, il est très difficile d'isoler des ensembles de connaissances de petites tailles lorsqu'on veut résoudre des problèmes relativement complexes.

Par exemple, le système AIRPLAN organise les connaissances relatives à l'appontage en bases de règles associées à l'urgence du traitement. Mais d'après les auteurs eux-mêmes de ce système, il semble que le temps de traitement moyen d'une base de règles pour obtenir un résultat soit trop important pour prendre en compte à temps des interruptions. La solution semble naturellement de réaliser un découpage de l'ensemble des règles en bases de tailles encore plus petites. Mais elles traiteraient alors probablement de problèmes communs et partageraient des données communes. Les conditions d'interruption laissant les données cohérentes seraient alors beaucoup plus difficiles à définir. Un autre bon exemple de ce genre de problème est donné par les Systèmes Experts Procéduraux, qui codent par des procédures très simples les connaissances de maintenance d'un système complexe, comme la navette spatiale dans le principal exemple traité. Le système est interruptible entre les différents appels de procédures, ce qui garantit un temps de prise en compte très faible des interruptions<sup>3</sup>. Par contre, la gestion de la cohérence de la base de données du système paraît problématique. Lors du traitement d'une interruption, un certain nombre de procédures peuvent être interrompues en cours d'exécution (la gestion des appels des procédures se fait classiquement par une pile). Le traitement de l'interruption peut ne pas être indépendant de ceux qui étaient assurés par les procédures en cours d'exécution. Dans ce cas, il peut modifier par effet de bord les environnements d'exécution de ces procédures, dont la reprise de manière cohérente devient alors délicate.

En conclusion de ce bref tour d'horizon des techniques utilisées pour implanter des systèmes d'IA en ligne, il faut retenir l'esprit qui semble guider l'ensemble des travaux dans le domaine. Plutôt que chercher à définir le problème de la prise en compte de contraintes temporelles d'une manière générale, ce qui est évidemment très difficile, on préfère élaborer des solutions de bas niveau, tant matérielles que logicielles. Il reste alors à espérer que, muni de ces outils, le système informatique développé aura les propriétés globales attendues. Cette démarche peut être reliée à un certain mythe d'une informatique complètement "expérimentale", qui laisse penser qu'il suffit de munir une machine de traitements élémentaires et d'une certaine capacité d'"auto-organisation" pour obtenir un système efficace ...

---

<sup>3</sup>Une "base" de connaissances est donc ici réduite à sa plus simple expression : une procédure ; les auteurs nomment ces bases "KA", pour Knowledge Area.

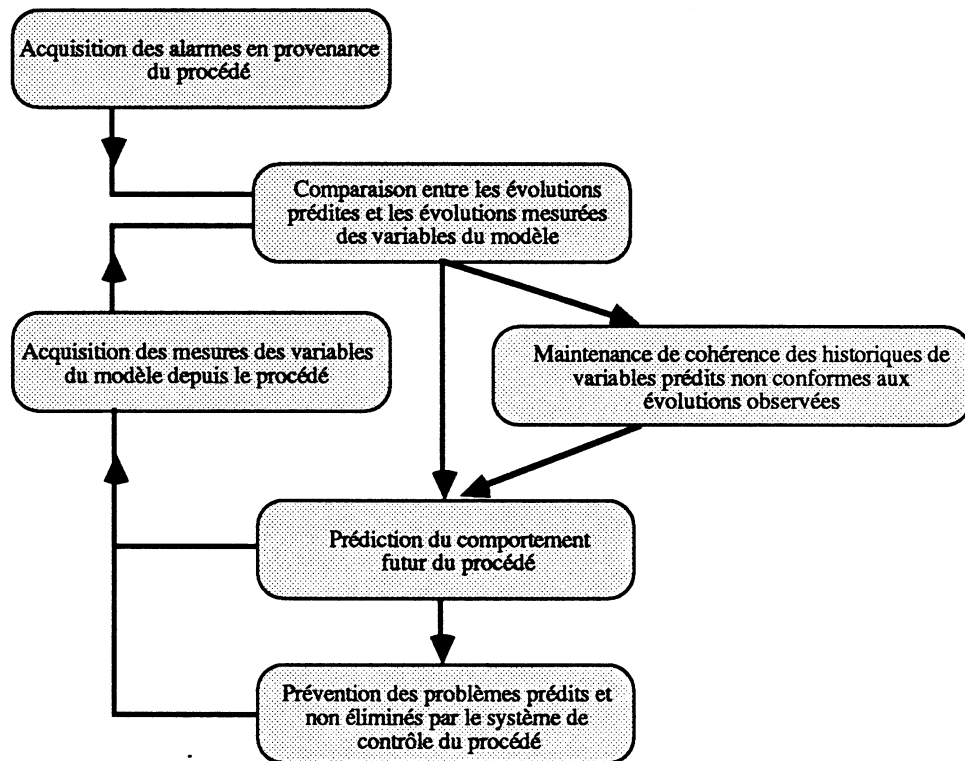


Figure 5.1 : L'architecture du système en termes de tâches.

## 2.2 Les principes généraux de l'architecture du système implanté

Après avoir présenté les difficultés générales d'implantation en ligne de systèmes utilisant des techniques d'IA, nous donnons dans cette section l'approche suivie dans notre travail.

Nous proposons une démarche de programmation descendante, qui distingue deux niveaux.

Au niveau le plus élevé, on spécifie l'ensemble des "tâches" que doit pouvoir accomplir le système ainsi que les dépendances logiques et temporelles qui lient ces "tâches". Il faut entendre par "tâche" un ensemble d'algorithmes qui est employé pour satisfaire un but particulier. La figure 5.1 donne l'organigramme des tâches du système de supervision que nous avons implanté sur site. Le comportement du système est cyclique, avec l'acquisition périodique de mesures des variables du modèle de supervision, la comparaison de ces mesures avec les prédictions faites à des étapes antérieures, une éventuelle maintenance de cohérence des historiques lorsqu'ils ne sont pas conformes

aux mesures, et une nouvelle prédiction du comportement futur du procédé qui intègre les mesures, éventuellement assortie de conseils d'actions à l'opérateur. L'acquisition des alarmes est, quant à elle, asynchrone.

Les arcs de la figure donnent les dépendances logiques entre les différentes tâches (sans spécifier les conditions exactes des branchements).

La spécification des contraintes temporelles est plus complexe. Si on exclut le traitement des alarmes qui est particulier, l'ensemble des tâches qui peuvent être appelées entre deux acquisitions de mesures<sup>4</sup> doit avoir un temps d'exécution global inférieur ou égal à la période d'acquisition. Cela pose donc un problème de planification temporelle puisqu'en général il n'y a pas assez de temps disponible pour effectuer tous les traitements qui devraient l'être. Nous verrons plus loin comment ces contraintes temporelles sont gérées par les algorithmes qui implantent les tâches. Dans un premier temps, le problème de la planification a été négligé, en accordant de manière figée un pourcentage donné de la période d'acquisition à chacune des tâches.

La spécification d'un organigramme de tâches définit un premier niveau de programmation du système, que nous appelons classiquement un "superviseur". A un deuxième niveau, il s'agit de définir les outils qui permettront à chaque tâche de satisfaire effectivement les contraintes du superviseur. Nous avons fait l'hypothèse que pour chaque tâche il est possible d'implanter des outils qui leur donnent les propriétés :

- d'être interruptible par le superviseur,
- de pouvoir mesurer leur "performance",
- de pouvoir établir un compromis entre la "qualité" des résultats fournis et le temps d'exécution.

On suppose donc que chaque tâche dispose des outils de contrôle suffisants pour pouvoir répondre aux ordres du superviseur.

Par exemple, le superviseur peut demander une prédiction de l'évolution du procédé sur la période des dix prochaines minutes à un moment donné. Il spécifie aussi la qualité de simulation demandée, suivant par exemple le caractère perturbé de l'évolution du procédé, et un temps d'exécution maximum autorisé. Avec ces trois paramètres, la tâche de prédiction est capable de mesurer sa performance, c'est-à-dire de vérifier à intervalles de temps réguliers que la simulation portant sur dix minutes d'évolution du procédé sera effectuée dans le temps imparti. Dans le cas contraire, la tâche peut dégrader la qualité des résultats fournis pour atteindre son objectif temporel. Pour

---

<sup>4</sup>c'est-à-dire dans le pire des cas, la comparaison, la maintenance de cohérence des historiques, la prédiction et la prévention.

réaliser ce contrôle d'exécution, la tâche doit disposer d'un modèle de référence de sa propre activité. Enfin, si ces outils ne suffisent pas à assurer une exécution nominale, il reste la possibilité au superviseur d'interrompre la tâche pour par exemple lancer une tâche de prévention (afin de respecter le planning d'occupation par les tâches du temps machine pendant une période d'acquisition). De plus, la fonction d'interruptibilité est indispensable pour pouvoir prendre en compte les données asynchrones que sont les alarmes.

Il est évident que ces outils sont locaux aux tâches et dépendent de la nature des algorithmes que celles-ci emploient.

Notre approche a donc l'avantage de séparer clairement le problème de la spécification à un haut niveau des traitements que doit effectuer un système d'IA en ligne, des contraintes sur ces traitements, d'une part, et des outils techniques utilisés pour implanter les traitements, d'autre part.

Il s'agit d'une approche ambitieuse. La possibilité de pouvoir programmer et mettre au point un système sans devoir spécifier tous les détails de l'implantation est un avantage important. En d'autres termes, arriver à isoler des ensembles de programmes, les tâches, qui disposent d'outils de contrôle de leur exécution permet de construire de manière très souple des programmes assemblant ces tâches. Enfin, ce type d'architecture autorise potentiellement le système de supervision à effectuer une planification dynamique de sa propre activité. Pour l'instant, seules les informations nécessaires aux tests de l'organigramme remontent des tâches au superviseur. Mais il est tout aussi simple de remonter des informations temporelles qui ont été inférées grâce au modèle de la dynamique du procédé. Ces informations peuvent constituer de nouvelles contraintes pour le système. Prenons l'exemple de la tâche de prédiction du comportement futur du procédé et supposons qu'un problème important de dépassement de seuil d'alarme soit prédit sur une variable pour intervenir dans  $n$  minutes. Le superviseur récupère cette information à la fin de la tâche de prédiction et après un simple test lance la tâche de prévention. Mais il dispose aussi de la contrainte temporelle sur le temps global disponible pour anticiper la situation d'alarme qui est de  $n$  minutes. Il s'agit donc de planifier au mieux l'activité du système, en prenant en compte les temps d'exécution probables des traitements activés comme ceux nécessaires à la mise en œuvre effective des actions. La notion de "temps réel" est donc définie de manière naturelle pour ce type de système : c'est sa capacité à satisfaire toutes les contraintes temporelles qu'il est capable d'inférer. Il est évident que ce type de planification temporelle est très complexe : il faut tenir compte à la fois de la dynamique des actions que l'on peut effectuer et de celle du raisonnement qui permet de décider de leur

choix<sup>5</sup>. Nous pensons qu'il y a là un domaine de recherche intéressant et complètement ouvert ...

Pour ne pas rester à un niveau de discussion trop général, tout le reste du chapitre est consacré à détailler à partir d'exemples les techniques de maintien de cohérence des données et de contrôle d'exécution des tâches que nous avons utilisées.

### 3 Techniques de maintien de cohérence d'une vue au cours du temps

Dans cette section, nous donnons une idée des algorithmes développés pour assurer le maintien de la cohérence des vues obtenues en prédiction. Ces algorithmes sont utilisés pour comparer les évolutions prédites des variables aux évolutions mesurées, et pour intégrer les différences lorsqu'elles existent. Comme ces processus de comparaison et de maintenance de vérité sont très liés, nous en présentons une vue résumée avant d'entrer dans des détails plus techniques.

Lorsqu'un épisode  $E$  calculé en prédiction n'est pas conforme à l'évolution de la variable  $V$  concernée, il doit être remplacé dans l'historique de  $V$  par l'épisode  $E'$  construit depuis les mesures. On dit que la variable  $V$  est "recalée". Pour que la vue reste cohérente, il faut détruire dans la vue de prédiction tous les nœuds qui appartiennent à un chemin ayant pour origine le nœud  $(V, E)$ . En effet, tous les épisodes de ces nœuds intègrent une influence, directe ou indirecte, de l'épisode  $E$ . D'un point de vue pratique, il faut donc détruire récursivement les influences des journaux et les épisodes des historiques qui ont pour origine  $E$ , pour les recalculer à partir du nouvel épisode  $E'$ . Cette technique permet de maintenir une vue cohérente avec les mesures, tout en ne recalculant que ce qui doit l'être. C'est ce processus que nous appelons "maintenance de vérité temporelle d'une vue" et qui sera détaillé dans une première partie.

La comparaison entre les évolutions des variables prédites grâce au modèle et celles qui sont mesurées sur le procédé doit permettre de réaliser deux fonctions différentes. La première consiste à vérifier la validité du modèle qui est utilisé par le système. Des écarts trop importants entre prédictions et mesures doivent alerter l'opérateur, en lui signalant les transferts entre variables qui ne sont plus compréhensibles. Un traitement de situation inattendue, comprenant par exemple des diagnostics, peut alors être lancé

---

<sup>5</sup>Énoncé sans plus de précautions, ce problème définit une récursivité à l'infini ...

par le système.

La seconde fonction consiste à localiser les écarts qui sont simplement dus aux approximations de modélisation. Lorsque de tels écarts sont observés, les variables concernées sont recalées.

Mais décider qu'un épisode E prédit dans l'historique d'une variable ne correspond pas à l'évolution mesurée de la variable n'est pas une tâche aisée. Il faut disposer de techniques de comparaison suffisamment fiables pour ne pas ignorer des écarts entre prédictions et mesures qui soient révélateurs d'une limite de modélisation. Mais d'un autre côté, il faut adapter les techniques de comparaison à la relative imprécision des résultats d'une simulation qualitative. Des critères de comparaison trop stricts entraîneraient une grande instabilité du système, avec des remises en question fréquentes et injustifiées du modèle. Dans ce cas, aucune confiance ne pourrait être accordée au système de supervision par les opérateurs.

A ce problème très délicat du choix de techniques de comparaison vient s'ajouter celui du contrôle de l'ordre dans lequel les différentes variables du modèle mesurées à un temps  $t$  doivent être comparées. L'ensemble de ces traitements sera détaillé dans une seconde partie.

### 3.1 Maintenance de vérité temporelle d'une vue

#### 3.1.1 Les objectifs

Le problème consiste à intégrer, lors de chaque nouvelle acquisition de mesures par le système, les différences entre évolutions prédites et évolutions mesurées. Dans le passé, les historiques des variables du modèle doivent représenter leurs évolutions réelles, qui ont été, soit prédites de manière correcte, soit intégrées par les techniques de maintenance de vérité, lorsque des différences ont été notées sans remettre en cause la validité du modèle. Dans le cas contraire, le système de supervision aurait initialisé un traitement de situation inattendue.

Comme beaucoup d'approximations sont faites pour construire et utiliser un modèle de supervision, les épisodes construits depuis les mesures ne peuvent pas être tous rigoureusement cohérents avec le modèle, en ne satisfaisant pas exactement les transferts décrits par les FTQs. Par contre, tous les épisodes prédits dans le futur doivent rester rigoureusement cohérents avec les épisodes appartenant au passé, qu'ils aient été prédits de manière correcte ou intégrés depuis les mesures. La figure 5.2 résume la nature des relations liant les épisodes.



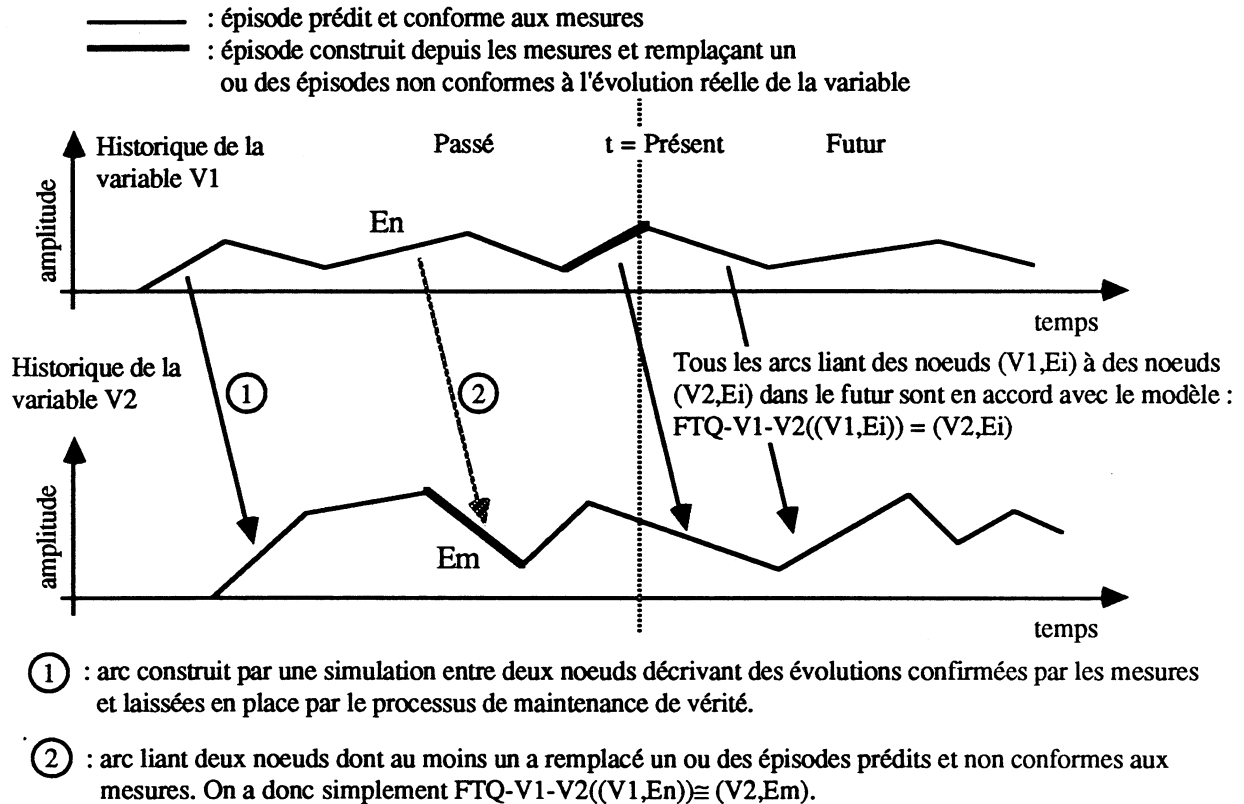


Figure 5.2 : La nature des relations entre épisodes dans le temps.

### 3.1.2 Les techniques mises en œuvre

Pour maintenir les historiques des variables “cohérents” dans le temps, de la manière qui vient d’être énoncée, plusieurs solutions sont envisageables. La plus simple, en théorie, consiste à recalculer une vue complète chaque fois que de nouvelles mesures sont acquises. En pratique, cette solution est assez difficile à mettre en œuvre, puisqu’il faut initialiser la simulation avec un ensemble de conditions initiales qui permette de construire une vue connexe. Compte-tenu des délais variés des arcs du modèle, construire cet ensemble peut être coûteux si les fréquences de mesure des variables ne sont pas synchrones<sup>6</sup> (ce problème a été détaillé dans la section 2.2.1). Mais le défaut principal de cette solution est son coût, puisque les historiques des variables sont recalculés complètement à chaque acquisition, alors que seules certaines parties de

<sup>6</sup>Dans ce cas, la procédure de construction de l’ensemble de conditions initiales est obligée de calculer dynamiquement les domaines temporels des conditions initiales sur chaque variable qui sont nécessaires pour construire une vue connexe. Si les acquisitions sont synchrones, ces domaines sont stables et peuvent être calculés au vu du modèle.

ces historiques, dépendantes des épisodes prédits non conformes aux mesures, doivent être recalculées.

Une deuxième solution peut utiliser le principe de superposition des solutions d'équations différentielles linéaires, qui a été utilisé pour coder les FTQs (voir l'annexe A). Il suffit alors de considérer comme conditions initiales les épisodes décrivant les différences entre les épisodes prédits et leurs homologues mesurés. Une simulation fournit des historiques qui sont sommés aux historiques déjà calculés et des journaux qui sont unis aux journaux déjà existants. On obtient alors une vue cohérente avec les mesures. Le problème de cette méthode est qu'elle oblige la création d'un grand nombre de structures de données, qui peut en pratique engendrer des problèmes de place en mémoire.

La solution qui a été adoptée s'inspire des techniques développées dans les TMS. (voir par exemple l'origine de ces travaux dans [Doy77]).

Le traitement élémentaire du mécanisme de maintenance de vérité se limite dans notre cas à détruire les sous-graphes de la vue construite en prédiction qui dépendent d'un épisode non conforme à l'évolution réelle.

Considérons une variable  $V$  dont un épisode  $E$  est ainsi remis en question. Tous les épisodes qui suivent  $E$  dans l'historique de  $V$  doivent être de même détruits. En effet, même si les influences propagées dans le journal de  $V$  restent valides, ces épisodes ont été intégrés à partir de la valeur finale de  $E$ , qui n'est plus correcte. Il faut ensuite supprimer les influences propagées depuis les épisodes détruits dans les journaux des variables de sortie de  $V$ . Récursivement, un traitement identique peut être appliqué aux épisodes des variables de sortie qui intégraient les influences détruites. En suivant les liens des épisodes aux influences qu'ils ont propagées et des influences aux épisodes qu'elles permettent d'intégrer, on peut parcourir ainsi tous les sous-graphes dépendants des épisodes remis en question.

Mais le fait de devoir détruire tous les épisodes d'un historique qui suivent un épisode qui n'est plus valide permet d'optimiser le processus de maintenance de vérité, en faisant un parcours du modèle plutôt que de la vue.

Effectivement, les sous-graphes de la vue dépendant des épisodes remis en question ont en général une intersection non vide. En d'autres termes, il peut exister plusieurs chemins menant de variables recalées à une variable  $V$  quelconque dans le modèle. Dans ce cas, il est possible de ne traiter qu'une seule fois cette variable, en considérant un des chemins qui conduisent à la plus petite date de début du premier épisode détruit dans l'historique. Les destructions propagées par les autres chemins seront donc aussi assurées. Le principe de l'algorithme est donc de parcourir les variables du modèle de

la manière suivante :

1. Initialiser la pile  $\mathcal{P}$  des variables à traiter par les variables recalées, associées à la date de début de l'épisode remis en question dans leur historique. Trier  $\mathcal{P}$  par dates croissantes.
2. Dépiler  $\mathcal{P}$  tant que l'on obtient une variable déjà traitée. Si  $\mathcal{P}$  est vide, le traitement est terminé. Sinon, soit  $V$  la variable considérée et  $D$  la date associée. Détruire tous les épisodes de l'historique de  $V$  à partir de la date  $D$ . Si  $V$  admet des variables de sortie, détruire dans les journaux de ces variables les influences propagées à partir des épisodes détruits. Inclure les variables de sortie dans  $\mathcal{P}$  associées à  $D$  plus le retard des arcs les liant à  $V$ . Trier  $\mathcal{P}$  par dates croissantes.

Ce traitement ne fait que supprimer dans la base de données les parties d'historiques qui sont incompatibles avec les mesures. Le calcul des influences des épisodes mesurés qui ont conduit à des recalages se fait au prochain appel à la tâche de prédiction par le système.

Il faut signaler que ce processus de maintenance de vérité permet la propagation d'influences dans le passé. En effet, un épisode  $E$  corrigé dans l'historique d'une variable  $V$  a une date de début  $T_d$  strictement inférieure au présent,  $T$ , et une date de fin supérieure ou égale à  $T$ . Le nouvel épisode  $E'$  a la même date de début, donc dans le passé, et une date de fin égale à  $T$ , avec pour valeur finale la valeur mesurée. Supposons qu'il existe une variable  $V_1$  telle que la somme des retards des arcs du chemin  $(V, V_1)$  soit inférieure à  $(T - T_d)$ . Si  $V_1$  est aussi recalée, avec un épisode  $E'_1$ , l'influence provenant de l'épisode  $E'$  de  $V$  aura une intersection temporelle non vide avec  $E'_1$ . Dans ce cas, cette partie de l'influence est naturellement ignorée par l'algorithme de simulation.

Le processus de maintenance de vérité qui vient d'être décrit est très simple. Il ne concerne pas les explications et les conseils d'actions qui ont pu être donnés dans le passé à l'opérateur, et dont il faudrait signaler qu'ils correspondaient à des erreurs de prédiction du système. Pour cela, toutes les informations fournies à l'opérateur devraient être codées comme des objets temporels justifiés de la même manière que les épisodes.

La maintenance de vérité des vues plus abstraites est assurée sans difficultés particulières, ces vues étant justifiées en termes des nœuds et des arcs de la vue de "bas niveau". Ces traitements sont encore en cours d'implantation.

La structure du procédé peut changer localement au cours de son exploitation. C'est le cas lorsque des pannes changent les caractéristiques de fonctionnement de certains

équipements. Mais c'est aussi vrai lorsque l'opérateur décide de brancher ou débrancher des régulations, ou des équipements plus complexes. Si le système de supervision n'est pas capable d'intégrer ces changements par une mise à jour du modèle qu'il utilise, son fonctionnement sera faussé.

Cette mise à jour est réalisable par retrait et/ou ajout de variables et d'arcs dans le graphe du modèle. Elle doit s'accompagner d'une maintenance de vérité des historiques, qui supprime tous les résultats prédits sur la base de sous-graphes obsolètes du modèle. L'algorithme décrit dans cette section a ainsi été utilisé avec succès pour implanter un système de maintenance de vérité sur le fonctionnement en boucle ouverte ou fermée des régulations (voir la thèse de S. Féray Beaumont, à paraître). Mais il est clair que la difficulté principale d'une gestion dynamique du modèle réside plus dans les techniques de comparaison qui permettent de décider qu'une partie du modèle est obsolète, ainsi que dans le choix d'une alternative de modélisation.

## **3.2 Comparaison entre évolutions de variables prédites et mesurées**

La comparaison entre les épisodes prédits dans les historiques des variables et les mesures acquises par le système comprend deux types de traitements très différents, les techniques de comparaison proprement dites entre évolutions prédites et mesurées d'une part, et les techniques de contrôle de la comparaison d'autre part.

### **3.2.1 Critères de comparaison entre évolutions prédites et mesurées**

Tout d'abord, il faut définir des critères de comparaison des mesures qui sont périodiquement acquises par le système aux évolutions représentées sous la forme de suites d'épisodes. Pour chaque variable, ces critères doivent distinguer trois cas possibles :

- un accord total avec l'évolution prédite de la variable, auquel cas son historique est laissé tel quel,
- une différence acceptable, compte-tenu des approximations de modélisation, ce qui implique que la variable soit recalée,
- une différence qui n'est pas compréhensible dans le cadre du modèle et un traitement de situation inattendue doit être lancé.

Des critères de comparaison n'ont pour l'instant été implantés que pour la vue de plus bas niveau. Un premier critère consiste simplement à comparer ponctuellement la

valeur de la mesure à celle donnée par la prédiction au même temps. Des seuils d'écart en valeur absolue suffisent pour départager les trois cas possibles.

Mais ce critère de comparaison est inefficace dans le cas de dérives puisque les techniques de maintenance de vérité recalent les historiques aux évolutions réelles à la même fréquence que l'acquisition de mesures. Il faut donc utiliser un critère intégral de différence entre la courbe définie par les mesures et celle donnée par la prédiction. Ce critère utilise des seuils de la même manière que le précédent. Une autre solution, coûteuse en mémoire, peut consister à garder périodiquement une "photo" des historiques prédits à un moment donné pour pouvoir ensuite les comparer aux évolutions réelles.

Le défaut de ces techniques de comparaison de bas niveau est de demander une fois de plus aux utilisateurs du système des données qu'ils peuvent avoir beaucoup de mal à évaluer. Il faudrait donc développer des outils qui autorisent une comparaison des vues de plus haut niveau. Une amélioration à envisager peut être l'introduction d'une représentation de l'imprécision des données manipulées, en faisant appel à la théorie des possibilités (voir par exemple [Dub83], [Pra85]). Il y aurait un double avantage à utiliser cette modalité de représentation des connaissances : l'utilisateur du système pourrait coder dans un cadre rigoureux ses estimations des valeurs des paramètres des arcs du modèle, comme les constantes temporelles ou les gains. La notion de "nombre flou" permet de représenter une valeur estimée d'une variable en même temps qu'un domaine d'autres valeurs possibles, par exemple un intervalle fermé centré autour de la valeur estimée. Construire un modèle ne force donc plus à donner des valeurs numériques précises. Un deuxième avantage de ce type de représentation est qu'il est possible de définir un "calcul flou" : les calculs faits dans les FTQs porteraient sur des nombres flous et rendraient donc compte de l'augmentation de l'imprécision des résultats de simulation en fonction du temps. L'utilisation du calcul flou devrait donc permettre d'obtenir des prédictions identiques à celles obtenues grâce aux FTQs classiques auxquelles sont associées des zones d'imprécision qui vont en "s'élargissant" plus la simulation porte dans le futur. Un comportement observé différent de celui qui a été prédit mais qui reste compris dans la zone d'imprécision entraînerait un recalage ; dans le cas contraire, le comportement observé n'est pas compréhensible dans le cas du modèle.

### 3.2.2 Le contrôle de la comparaison

Considérons l'ensemble des variables dont les mesures sont acquises à un temps  $t$  donné. Pour certaines de ces variables, les délais des chemins provenant de variables mesurées

ont permis de prédire leur comportement jusqu'à la date  $t$  lors d'un appel antérieur de la tâche de prédiction. Ces variables sont dites comparables. Par contre, certaines des variables mesurées peuvent dépendre d'autres variables mesurées par des chemins dont la somme des retards des arcs est inférieure à la durée d'exécution de la boucle du système de supervision. Dans ce cas, il n'est pas possible de prédire leur comportement (sauf si l'on fait des hypothèses). Mais il est néanmoins possible de vérifier que les mesures sont bien en accord avec le modèle.

Pour cela, il suffit de choisir un sous-ensemble  $E$  de l'ensemble  $M$  des variables mesurées, et de lancer une simulation en prenant les épisodes construits depuis leurs mesures comme conditions initiales. Cela permet de simuler le comportement des variables de l'ensemble  $(M - E)$  jusqu'au temps présent  $t$ , et donc de pouvoir décider si leurs mesures sont bien compréhensibles d'après le modèle.

Le contrôle de la comparaison permet de déterminer l'ensemble  $(M - E)$  des variables dont on peut compléter les historiques jusqu'au temps présent. Pour cela, il faut faire un calcul de pré-conditions temporelles dans le graphe du modèle. En partant d'une variable  $V$  non comparable et de l'intervalle temporel  $I$  manquant dans son historique pour atteindre la date du présent, il suffit de calculer récursivement les pré-images de  $I^7$ , à travers les arcs d'entrée sur  $V$  qui n'ont pas permis de propager des influences suffisantes et sont la cause de la non connaissance du comportement de  $V$  pendant  $I$ . Sur chaque variable  $V_i$  atteinte pendant ce parcours de graphe, il faut vérifier si l'intervalle temporel pré-image est inclus dans l'historique de la variable, auquel cas il y a succès pour le chemin qui mène de  $V_i$  à  $V$ . Il y a échec définitif lorsqu'une variable atteinte n'a pas d'entrées, n'est pas mesurée ou est mesurée mais ne satisfait pas la pré-condition temporelle propagée. Nous donnons une version simplifiée de cet algorithme de parcours (en employant les mêmes notations que pour la description de l'algorithme de simulation, HC et IC donnant respectivement les intervalles temporels d'historique et d'influences complets ; la fonction renvoie "vrai" si la variable *var* peut être comparée, c'est-à-dire si on peut simuler son comportement sur l'intervalle  $I$  grâce aux mesures des autres variables) :

---

<sup>7</sup>qui sont obtenues par de simples translations temporelles de la valeur des retards sur les arcs.

Fonction Comparable ( $var, I$ );

**Début**

$V := \{var_i / \text{trouver-arc}(var_i, var)\};$

(\*  $V$  est l'ensemble des variables d'entrée de  $var$  \*)

**Si** ( $V \neq \emptyset$ ) **alors**

$\mathcal{V} := \{var_i \in V / ((\bigcap(HC(var), IC(indice(var_i), var))) = \emptyset)$

ou

$(I \not\subset IC(indice(var_i), var))\};$

(\*  $\mathcal{V}$  est l'ensemble des variables d'entrée de  $var$  dont l'historique doit être complété pour pouvoir propager une influence complète, qui manque à  $var$  pour qu'elle soit comparable \*)

renvoyer( $\bigwedge_{var_i \in \mathcal{V}} (\text{préconditions}(var_i, \text{pré-image}(I)))$ ) (\*  $\wedge$  est le et logique \*)

**sinon**

renvoyer(faux)

**finsi**

**fin;**

la fonction "préconditions" étant donnée par :

Fonction préconditions ( $var, I$ );

**Début**

**Si** mesurée( $var$ ) **alors**

(\* dans ce cas, il faut tester si  $I \subset HC(var)$ ,  $HC(var)$  ayant été mis à jour après la mesure sur  $var$  au temps  $t$  \*)

**Si** ( $I \subset HC(var)$ ) **alors**

renvoyer(vrai)

**sinon**

comparable( $var, I$ )

**finsi**

**sinon**

comparable( $var, I$ )

**finsi**

**fin;**

L'algorithme réellement implanté optimise le parcours du graphe pour toutes les variables non comparables, tout arc n'étant parcouru qu'une seule fois (ce qui n'est pas le cas avec cette version lorsque les sous-graphes de recherche associés aux variables non comparables ont une intersection non nulle).

## 4 Techniques de contrôle d'exécution des tâches

La présentation de l'architecture du système de supervision de la section 2 a mis en évidence une approche de programmation descendante, autour de la notion de tâche. Cette approche est motivée par le désir d'associer des outils de contrôle aux traitements que doit effectuer le système de supervision en un temps limité. A chaque tâche doivent donc être associées des techniques d'interruption, de mesure de performance et de compromis entre la "qualité" des résultats fournis et leur "coût" d'obtention. Dans cette section, nous illustrons la nature de ces techniques, en prenant comme exemple la tâche de prédiction.

Le but de la tâche de prédiction est de simuler le comportement du procédé après une acquisition de mesures. Cette tâche est gérée par le contrôle du système informatique, qui l'appelle avec les paramètres suivants :

- le temps maximum d'exécution  $T$  qui est autorisé (pour l'instant, une fraction figée à l'avance de la période d'acquisition de mesures du système de supervision),
- l'horizon de prédiction  $H$ , c'est-à-dire l'intervalle de temps sur lequel simuler les évolutions des variables,
- et la granularité initiale  $G$ , qui est , comme on l'a vu, un paramètre jouant sur la "finesse" de la simulation.

Les contraintes imposées à la tâche de prédiction sont de rendre la main au contrôle du système sans dépasser le temps d'exécution  $T$ , d'être interruptible pour pouvoir permettre une prise en compte rapide des alarmes provenant du calculateur de surveillance du procédé, et de donner dans la mesure du possible des résultats obtenus avec la finesse de simulation demandée.

### 4.1 Mesure de la performance d'une prédiction

Pour pouvoir permettre un asservissement d'une prédiction à la contrainte de temps maximum d'exécution, il faut pouvoir définir un comportement "nominal" de la tâche, qui serve de référence à des mesures de performance.

La figure 5.3 donne un exemple de l'évolution du nombre des appels aux FTQs en fonction de l'avancement dans le temps de la construction des historiques. On remarque que sur une période de prédiction portant sur une dizaine de minutes<sup>8</sup>, le coût de la simulation est réparti de manière relativement uniforme.

<sup>8</sup>ceci correspond à la somme maximale des retards sur les chemins du graphe du modèle



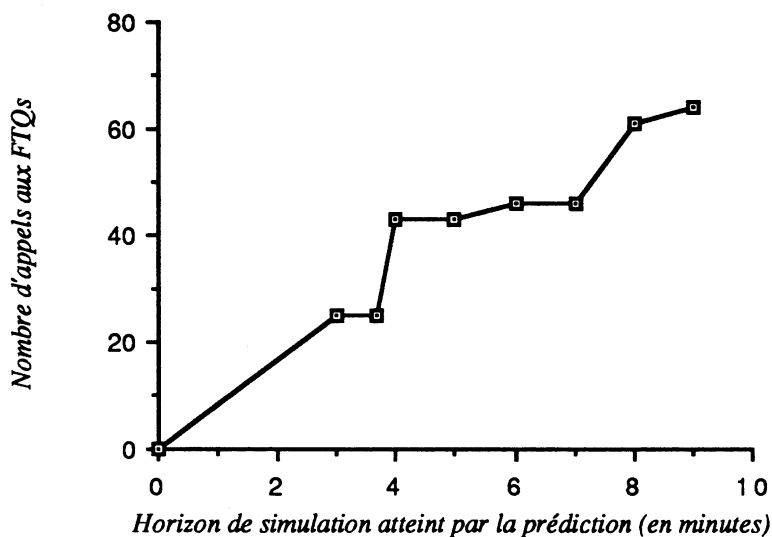


Figure 5.3 : Un exemple de répartition du coût de simulation en fonction du domaine temporel simulé.

Considérons la variable  $h$  qui donne la date de fin du prochain épisode à calculer par l'algorithme de simulation.

Nous avons vu que la variable  $h$  évolue de manière globalement croissante depuis le temps d'acquisition des mesures jusqu'à l'horizon de simulation  $H$ . Un comportement nominal de la tâche de prédiction peut donc être défini par l'équation  $h = \frac{H}{T} t$ . Cette équation traduit le rapport qu'il faut respecter entre le temps de simulation et le temps réel pour pouvoir répondre à l'objectif donné.

D'un point de vue pratique, ce test s'implante facilement en utilisant des accès à l'horloge interne de la machine.

## 4.2 Compromis entre coût de simulation et qualité de résultats

Pour implanter un asservissement de la tâche de prédiction, il faut adjoindre aux mesures de performance des techniques permettant de diminuer le coût de simulation, pour pouvoir rejoindre le comportement nominal. Notons que seuls les retards par rapport à l'objectif sont pris en compte dans notre application. Il existe bien sûr plusieurs manières possibles de réduire le coût d'une simulation. On peut par exemple décider de ne propager que les influences des épisodes représentant des évolutions "anormales" des variables. On peut aussi ne considérer qu'une partie du modèle pour la simula-

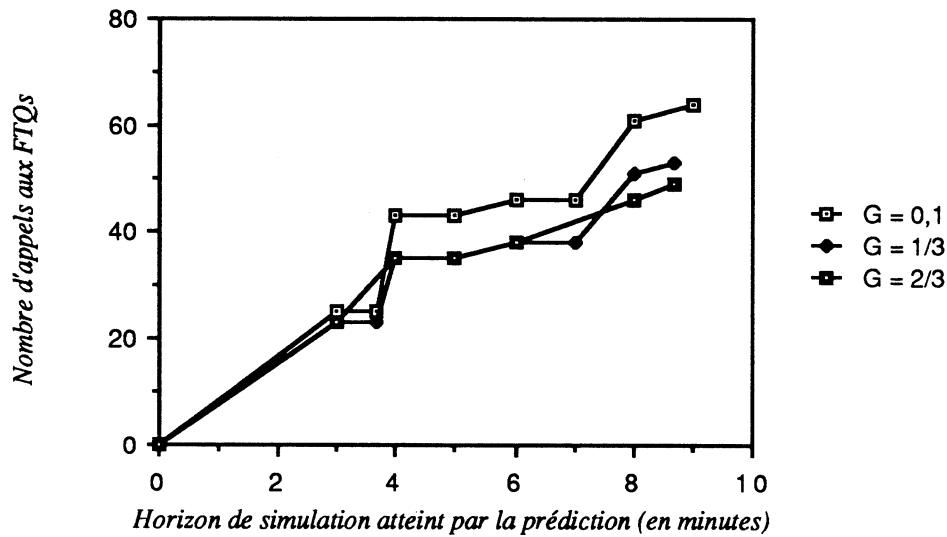


Figure 5.4 : L'influence instantanée de la granularité sur le coût de la simulation.

tion. Nous avons choisi dans un premier temps d'utiliser la granularité temporelle de l'algorithme.

La figure 5.4 montre l'influence de la granularité sur la courbe du coût de simulation en fonction de la période temporelle prédite dans les historiques. Ces courbes montrent une diminution du nombre des appels aux FTQs avec l'augmentation de la granularité. Les courbes de la figure 5.5 ont été réalisées à partir du fonctionnement global du système de supervision, avec des fichiers reproduisant des acquisitions de mesures à des fréquences diverses sur les variables, pendant des périodes de dix et vingt minutes. Elles mettent clairement en évidence que les changements de coût de simulation se font par sauts. Cela montre que les épisodes calculés dans les historiques n'ont pas des durées continues<sup>9</sup>.

<sup>9</sup>Pour mémoire, une FTQ décrit l'influence d'un épisode  $E$  par un ensemble d'épisodes  $E_i$ . Les durées des épisodes  $E_i$  sont calculées en fonction de celle de  $E$ , de manière à faire apparaître des constantes de temps importantes du procédé. Lorsque la durée de  $E$  est trop petite, cette décomposition de l'influence ne peut être faite parce qu'elle a la même durée que  $E$ . Dans ce cas, l'influence n'est composée que d'un seul épisode  $E_1$ . Le deuxième facteur qui joue sur la durée des épisodes des historiques est leur calcul par intersection entre les épisodes des influences. Il est intuitif que ces deux facteurs combinés peuvent conduire à un ensemble fini de valeurs possibles pour les durées des épisodes, fonction de l'ensemble des constantes de temps codées dans le modèle. Evaluer la taille de l'ensemble des valeurs possibles, et du même coup, la vraie complexité de l'algorithme, est un problème mathématique que nous n'avons pas eu le temps d'aborder.

Dans l'exemple qui est donné, obtenir des valeurs qui sont des fractions de trois s'explique par le fait que la constante de temps  $\tau$  qui sert de base à la décomposition temporelle assurée par les

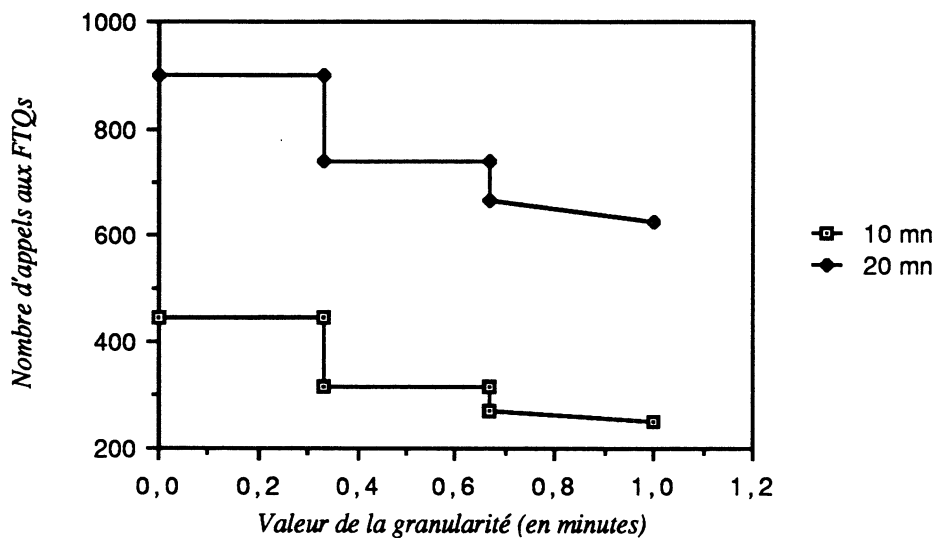


Figure 5.5 : L'influence de la granularité sur le coût de la simulation en moyenne.

Le caractère incrémental de l'algorithme de simulation permet de changer la valeur de la granularité en cours de calcul sans aucun problème de perte de cohérence des résultats obtenus. L'augmentation de la granularité a bien sûr des limites puisqu'elle conduit à des résultats de prédiction de plus en plus approximatifs.

### 4.3 Interruption de la tâche de prédiction

Pour pouvoir permettre une prise en compte rapide des alarmes et assurer que dans tous les cas la durée d'exécution de la tâche de prédiction ne dépasse pas le temps alloué, le superviseur doit pouvoir interrompre une prédiction. L'algorithme de simulation étant incrémental, il suffit d'insérer le test d'un indicateur d'interruption en début de boucle pour permettre des interruptions qui laissent les structures de données dans un état cohérent, tout en garantissant un très bon temps de réponse, sauf si l'interpréteur lisp est en train d'effectuer un "ramasse-miettes". Il faut supporter ce temps d'ininterruptibilité supplémentaire si l'on veut que l'interruption puisse être traitée dans le même environnement que les autres tâches et donc avoir accès aux mêmes données. Après traitement de l'interruption, il est alors possible de reprendre le traitement en cours sans craindre des problèmes de perte de cohérence dus aux effets de bord du traitement de l'interruption. Dans les cas où il n'est pas possible d'attendre le

---

FTQs est le tiers du temps de réponse d'un transfert, et que les temps de réponse sont approximatifs par des valeurs entières en minutes dans le modèle utilisé.

temps d'un "ramasse-miettes", le processus lisp peut être interrompu immédiatement au niveau du système unix. Mais dans ce cas, il n'est pas évident qu'il puisse être relancé sans une réinitialisation complète de la base de données.



---

---

# Conclusion

---

---

Le travail présenté dans cette thèse comporte deux parties essentielles.

Dans une première partie, nous avons défini une démarche de modélisation adaptée au problème de la supervision des procédés continus. Une originalité de cette démarche est d'essayer de combiner des représentations quantitatives et continues avec des représentations qualitatives c'est-à-dire discrètes.

Dans une seconde partie, nous avons présenté un ensemble de techniques informatiques qui ont été nécessaires pour le développement d'un système d'aide à la supervision connecté à un procédé réel.

Nous allons brièvement rappeler les points importants de ces deux aspects de notre travail et exposer les perspectives de nouveaux développements qu'ils ouvrent. Puis nous terminerons cette conclusion par un bilan de notre recherche, en analysant les contributions qu'elle apporte, tant du point de vue de l'automatique que de l'IA.

## **1 Traduction de données quantitatives en données qualitatives pour l'aide à la supervision**

Une représentation continue d'un procédé permet de prédire de façon précise son comportement. D'un autre côté, une représentation discrète permet de réduire l'information disponible sur l'évolution du procédé à des données adaptées aux différents types de raisonnement que doit effectuer l'opérateur.

Pour arriver à combiner ces deux types de représentation, nous avons adopté des hy-

pothèses simplificatrices. Les modèles quantitatifs comme qualitatifs ont la même forme syntaxique, celle d'un graphe orienté. Les nœuds de ce graphe sont des variables du temps qui représentent des grandeurs physiques intéressantes, et les arcs figurent des relations de causalité entre les variables. C'est le vocabulaire de quantification des variables qui différencie un modèle quantitatif d'un modèle qualitatif. Dans un premier temps, ces vocabulaires ne se distinguent que par leur cardinal, infini dans le cas quantitatif, fini dans le cas qualitatif. Au graphe d'un modèle est associé un autre type de graphe, une vue, qui représente des relations causales entre des parties pertinentes, appelées épisodes, des évolutions des variables. Grâce à des procédures qui sont attachées aux arcs du modèle, les Fonctions de Transfert Qualitatives, il est possible de coder des comportements types des variables, qui sont connus a priori. Un algorithme de simulation à événements discrets est utilisé pour prédire le comportement du procédé modélisé. Des techniques d'interprétation permettent alors de construire des vues plus abstraites que celle qui est obtenue par simulation. Ces vues décrivent les relations causales entre les évolutions des variables décrites qualitativement.

Plusieurs hypothèses simplificatrices ayant été adoptées pour pouvoir implanter un système opérationnel, des recherches futures pourraient être consacrées à en réduire l'importance :

- Tout en restant dans le cadre des modèles à fonctions de transfert, il doit être possible d'enrichir à la fois les niveaux quantitatifs et qualitatifs d'une modélisation d'un procédé. Au niveau quantitatif, les FTQs font des approximations de solutions d'équations différentielles par des fonctions linéaires par morceaux. Elles ne permettent pas de retrouver précisément les résultats donnés par un modèle à fonctions de transfert classiques. Combiner ces deux types de modèles permettrait de superposer aux courbes d'évolution calculées grâce à un modèle numérique fin leurs approximations par des suites d'épisodes, qui fournissent alors une interface avec les représentations qualitatives.

Au niveau qualitatif, nous avons proposé dans la section 6.1.2 d'implanter des techniques d'interprétation des résultats de simulation en un vocabulaire de description de la dynamique des variables. Suivant les besoins des utilisateurs du système de supervision, il doit être possible d'utiliser d'autres vocabulaires, adaptés à des tâches particulières. D'un autre côté, il n'existe pas à proprement parler de raisonnement symbolique dans le système que nous proposons. Il serait probablement très intéressant d'étudier sa connection à des systèmes logiques, qui seraient alimentés en faits par la traduction du quantitatif en qualitatif.

- Mais on peut vouloir remettre en cause les hypothèses de modélisation de façon

plus profonde. Il faudrait par exemple étudier si la démarche exposée dans cette thèse peut être appliquée lorsque les modèles quantitatifs et qualitatifs n'ont pas la même forme syntaxique. Nous avons en particulier évoqué l'intérêt qu'il y aurait à remplacer la représentation à fonctions de transfert par une représentation d'état. Ce type de représentation est matriciel et ne fait donc apparaître aucune relation privilégiée entre les variables. Définir alors un concept d'interprétation, dont le but est de fournir des relations causales entre des épisodes des variables, est sûrement une tâche ardue. De plus, il faudrait aussi étendre la notion d'abstraction qui a été volontairement restreinte à un critère uniquement temporel.

- Enfin, notre travail n'a abordé que la traduction de données dans le sens du quantitatif vers le qualitatif. Or le problème inverse est tout aussi important lorsque l'on s'intéresse à automatiser des raisonnements simples sur des modèles. Pour prendre un exemple, une fois que les résultats d'une simulation sont interprétés qualitativement et comparés aux données provenant du système modélisé, on peut vouloir émettre des jugements sur la "qualité" des résultats obtenus. Il serait pertinent d'utiliser ces commentaires pour affiner le modèle, par exemple en contrôlant le sens de mise à jour de certains de ses paramètres. Plus simplement, nous avons aussi souligné l'importance d'un mode de représentation aisé des connaissances pour la construction d'un modèle : en particulier, il ne faut pas demander trop de valeurs numériques précises de paramètres aux spécialistes d'un procédé s'ils ne sont pas capables de les donner. Une traduction dans le sens du qualitatif vers le quantitatif serait dans ce cas fort utile.

## **2 Implantation d'un système d'aide à la supervision**

Pour implanter un système d'aide à la supervision qui soit efficace, il faut tenir compte de deux contraintes essentielles.

Tout d'abord, le système est construit autour d'un modèle du procédé dans lequel beaucoup d'approximations sont faites. Pour avoir la confiance de l'opérateur, il faut donc adapter le niveau de précision des informations qui lui sont présentées en fonction de leur qualité estimée. Il faut aussi que ces informations "collent" au plus près l'évolution réelle du procédé.

Deuxièmement, le système de supervision doit fonctionner en temps réel, c'est-à-dire produire des explications et des conseils d'actions qui soient exploitables à temps, étant



donnée la dynamique du procédé.

Pour répondre au premier besoin, des techniques de recalage des historiques prédits des variables du modèle assurent une bonne “robustesse” au système. Leur rôle est d’intégrer les différences entre les évolutions prédites et les évolutions mesurées des variables. On pallie donc les faiblesses de modélisation et les effets des approximations faites dans les FTQs par la capacité de se recalculer par rapport à l’évolution réelle du procédé (cette facilité ne concerne néanmoins que les variables observables et mesurables). De plus, les structures de données utilisées par l’algorithme de prédiction permettent de distinguer les prédictions portant sur des évolutions complètes, c’est-à-dire dépendant de conditions initiales toutes connues, des prédictions portant sur des évolutions partielles. Pour calculer ces dernières, on ignore les conditions initiales non connues en faisant l’hypothèse qu’elles sont nulles. Ces deux types d’information ne sont évidemment pas présentés de la même manière à l’opérateur.

Là encore, de nombreuses perspectives de développements supplémentaires sont ouvertes. L’implantation de vocabulaires qualitatifs de description de la dynamique des variables permettrait par exemple d’augmenter la fiabilité de la tâche de comparaison, qui est le maillon faible du système. Et l’utilisation du calcul flou dans les FTQs apporterait une estimation de l’imprécision des résultats, fonction croissante de leur éloignement temporel des conditions initiales.

Le caractère “temps réel” du système de supervision est dû à son découpage en tâches, qui sont des ensembles d’algorithmes associés à la satisfaction de buts particuliers. Un organigramme spécifie les dépendances logiques et temporelles qui lient ces tâches, auxquelles sont attachés des outils de mesure de leur performance et de compromis entre le coût d’obtention et la qualité des résultats fournis. Un superviseur gère les acquisitions synchrones et asynchrones de données provenant des capteurs du procédé, et l’activation des tâches. Nous avons souligné que disposer d’un modèle de la dynamique du procédé définit une notion de temps réel naturelle pour le système : c’est sa capacité à résoudre les problèmes en respectant les contraintes temporelles inférées grâce au modèle. L’intérêt de cette approche reste conditionné par le développement de techniques de planification temporelle dont la complexité soit négligeable devant celle des tâches planifiées.

L’application visée dans cette thèse pose un grand nombre de problèmes ; il n’est donc pas possible de clore l’inventaire de tous les développements qu’elle peut encore engendrer.

## **3 Un bilan de notre travail**

### **3.1 Du point de vue de l'automatique**

L'automatique est une des techniques qui ont largement bénéficié des progrès de l'informatique. Les matériels et logiciels de plus en plus performants ont en effet permis d'implanter des modèles mathématiques sophistiqués des procédés, dans le but de les commander. Nous avons exposé pourquoi les limites de ces techniques de modélisation numérique ont rendu claire la nécessité d'un niveau de contrôle supérieur à la commande qui est la supervision. Cette dernière inclut des traitements de natures variées comme la recherche de redondance d'équipements en cas de pannes, le diagnostic de pannes, la recherche d'actions permettant une reprise en main lorsque le système de contrôle-commande n'est plus efficace, etc. On cherche maintenant à automatiser ces traitements, et à les inclure dans les systèmes de contrôle-commande existants. Cet axe de recherche est recouvert par la dénomination "automatisation intégrée".

Notre travail se situe dans cette perspective. Sa première contribution est l'application proprement dite à l'aide à la supervision. Un système a été implanté sur site, dont le but est de proposer aux opérateurs des explications sur l'évolution du procédé, des conseils d'actions lors de situations perturbées, et des avertissements lorsque le procédé sort des hypothèses de modélisation. Potentiellement, le système est capable de filtrer les alarmes provenant du calculateur du procédé.

Mais notre travail apporte aussi des outils informatiques aux automaticiens. Un premier langage permet de coder les comportements types des variables importantes du procédé. Un deuxième langage permet de coder déclarativement des modèles du procédé, réduisant ainsi l'effort de programmation à néant. L'automaticien peut donc pleinement se consacrer aux problèmes de modélisation proprement dits. Il est aussi bon de rappeler la facilité de mise au point de programmes liée à l'emploi d'un langage déclaratif. Enfin, ce langage automatise la programmation d'entrées-sorties évoluées, puisqu'elles assurent un changement de type des données manipulées. Nous espérons que le lecteur aura été convaincu que programmer ce type d'entrées-sorties au milieu d'un programme de commande écrit, par exemple, en FORTRAN, n'est sûrement pas une chose aisée ...

### **3.2 Du point de vue de l'IA**

Le problème de la combinaison de représentations continues avec des représentations discrètes est souvent rencontré en Intelligence Artificielle. Cela n'est guère surprenant, puisque l'IA s'intéresse essentiellement aux méthodes de contrôle de la prise de

décisions, ce qui implique une représentation discrète, mais en appliquant souvent ces techniques à des problèmes pour lesquels les représentations efficaces sont continues. Ainsi, dans le domaine de la CAO, le système TROPIC de résolution de problèmes de conceptions de transformateurs (voir [Lat77]) mélange des données symboliques avec des données numériques. J.C. Latombe explique qu'une part des échecs de TROPIC est due à l'interdépendance non explicite des données numériques. C'est justement le type de problème qu'aborde le raisonnement qualitatif, tel que nous l'avons défini. On peut aussi citer le domaine du raisonnement temporel, où représentations symboliques et numériques coexistent sans pouvoir être facilement intégrées (J.F. Rit propose dans sa thèse, [Rit88], un formalisme qui combine des manipulations numériques et l'expression de relations symboliques disjonctives).

Notre travail n'apporte bien sûr comme contribution qu'une étude de cas supplémentaire. Peut-être permettra-t-il de favoriser l'apparition d'un cadre de modélisation et de programmation plus général. Son intérêt serait, selon moi, de dépasser définitivement la querelle maintenant classique, qui oppose les tenants de l'utilisation de la logique en IA à ceux qui lui nient tout intérêt pour la programmation de systèmes connectés au "monde réel". Dans un système qui utiliserait le raisonnement qualitatif, la sémantique des faits serait définie par les fonctions d'interprétation transformant les données numériques provenant des capteurs en symboles.

Notre intuition est que le raisonnement qualitatif est un point de passage obligé pour une utilisation efficace de programmes informatiques à base logique dans des systèmes autonomes.

---

---

## Bibliographie

---

- [AL86] J. Ancelin and P. Legand. Un système expert pour le traitement des alarmes d'un réacteur nucléaire. In *6èmes Journées Internationales - Les systèmes experts et leurs applications*. Avignon, 1986.
- [AP86] A. Alan and B. Pritsker. *Introduction to simulation and SLAM II*. Systems Publishing Corporation, 1986.
- [Aub87] J-P. Aubin. Equations qualitatives aux confluences. In *Annexe au rapport à l'INRIA*, 1987.
- [Bai83] L. Bainbridge. Ironies of automation. In *Automatica*, pages 775–779, 1983.
- [Bea86] S. Féray Beaumont. *Mémoire de D.E.A. L'automatique qualitative*. Technical Report, Laboratoire d'Automatique de Grenoble (ENSIEG), 1986.
- [Bea89] S. Féray Beaumont. *L'automatique Qualitative. Thèse à paraître*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, 1989.
- [Cal87] P. Caloud. Towards continuous process supervision. In *IJCAI*, pages 1086–1089, 1987.
- [CF87] J. W. Collins and K. D. Forbus. Reasoning about fluids via molecular collections. In *AAAI*, pages 590–594, 1987.
- [CK87] C. Chiu and B. Kuipers. Taming intractible branching in qualitative simulation. In *IJCAI*, pages 1079–1085, 1987.

- [CN85] A. B. Chambers and D. C. Nagel. Pilots of the future: human or computer ? In *Communications of the ACM*, pages 1187–1199, 1985.
- [DAm87] B. D'Ambrosio. Extending the mathematics in qualitative process theory. In *AAAI*, pages 595–599, 1987.
- [Dav87] E. Davis. Constraint propagation with interval labels. *Artificial Intelligence*, 32(1):281–331, 1987.
- [dK84] J. de Kleer. Choices without backtracking. In *AAAI*, pages 79–85, 1984.
- [dK86] J. de Kleer. An assumption-based tms. *Artificial Intelligence*, 28(2):127–162, 1986.
- [dKB83] J. de Kleer and J.S. Brown. The origin, form and logic of qualitative physical laws. In *IJCAI*, pages 1158–1169, 1983.
- [dKB84a] J. de Kleer and D. G. Bobrow. Qualitative reasoning with higher-order derivatives. In *AAAI*, pages 86–91, 1984.
- [dKB84b] J. de Kleer and J. S. Brown. A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence*, 24(1):7–83, 1984.
- [dKB86] J. de Kleer and J. S. Brown. Theories of causal ordering. *Artificial Intelligence*, 29(1):33–61, 1986.
- [Dor87] J.L. Dormoy. *Résolution qualitative : complétude, interprétation physique et contrôle. Mise en oeuvre dans un langage à base de règles : boojum*. Technical Report, Thèse de l'Université de Paris 6, Décembre 1987.
- [Doy77] J. Doyle. *Truth maintenance systems for problem solving*. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [Dub83] D. Dubois. *Modèles mathématiques de l'imprécis et de l'incertain en vue d'applications aux techniques d'aide à la décision*. Thèse d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble, 1983.
- [Dub85] G. Bel D. Dubois. Modélisation et simulation de systèmes automatisés de production. *APII*, 19(1):3–43, 1985.
- [FL85] J.C. Francis and R.R. Leitch. Artifact: a real-time shell for intelligent feedback control. In Cambridge University Press, editor, *Research and Development in Expert Systems*, pages 151–162, M.A. Bramer, 1985.

- [For84] K. D. Forbus. Qualitative process theory. *Artificial Intelligence*, 24(1):85–168, 1984.
- [For86] K. D. Forbus. Interpreting measurements of physical systems. In *AAAI*, pages 113–117, 1986.
- [Ga86] F. Gardin and al. The analogical representation of liquids in naive physics. In *ECAI*, pages 154–159, 1986.
- [GB83] M.P. Georgeff and U. Bonollo. *Procedural Expert Systems*. Technical Report, SRI International, 1983.
- [GL86] M.P. Georgeff and A.L. Lansky. *A system for reasoning in dynamic domains: fault diagnosis on the space shuttle*. Technical Report, SRI International, 1986.
- [Hay79] P. Hayes. The naive physics manifesto. In Michie, editor, *Expert systems in the micro-electronic age*, Edinburgh, 1979.
- [HLI87] L. Eshelman H. Lambert and Y. Iwasaki. *Using Qualitative Physics to guide the acquisition of diagnostic knowledge*. Technical Report, Carnegie Mellon University, 1987.
- [IS86a] Y. Iwasaki and H. A. Simon. Causality in device behavior. *Artificial Intelligence*, 29(1):3–32, 1986.
- [IS86b] Y. Iwasaki and H. A. Simon. Theories of causal ordering : reply to de kleer and brown. *Artificial Intelligence*, 29(1):63–72, 1986.
- [Kae86] Leslie Pack Kaelbling. *An architecture for Intelligent Reactive Systems*. Technical Report, Artificial Intelligence Center SRI International and Stanford University, April 1986.
- [Kui84] B. Kuipers. Commonsense reasoning about causality: deriving behavior from structure. *Artificial Intelligence*, 24(1):169–203, 1984.
- [Kui85] B. Kuipers. The limits of qualitative simulation. In *IJCAI*, pages 128–136, 1985.
- [Kui86] B. J. Kuipers. Qualitative simulation. *Artificial Intelligence*, 29(1):289–339, 1986.
- [Lat77] J.C. Latombe. *Une application de l'intelligence artificielle à la conception assistée par ordinateur*. Thèse d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble, 1977.

- [Lei87] R. R. Leitch. Modelling of complex dynamic systems. In *IEE Proceedings*, Vol. 134, Pt. D, No. 4, pages 245–250, July 1987.
- [Let83] S. Letovsky. *Qualitative and quantitative temporal reasoning*. Technical Report, YALEU/CSD/RR296, December 1983.
- [Lux85] A. Lux. *Algorithmique et contrôle en vision par ordinateur*. Thèse d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Institut National Polytechnique de Grenoble, 1985.
- [Ma83] S. Masui and al. Decision-making in time-critical situations. In *IJCAI*, pages 233–235, 1983.
- [Ma84] R.L. Moore and al. A real time expert system for process control. In *IEEE: the first conference on A.I. Applications*, pages 569–576, 1984.
- [Mey83] P. Meyer, editor. *Physiologie Humaine*. Flammarion Médecine Sciences, 1983.
- [Mor87] A. J. Morgan. Predicting the behaviour of dynamic systems with qualitative vectors. In *AISB*, pages 81–95, 1987.
- [Nel82] W.R. Nelson. Reactor: an expert system for diagnosis and treatment of nuclear reactor accidents. In *AAAI*, pages 296–299, 1982.
- [PCG87] S. Féray Beaumont P. Caloud and S. Gentil. Qualitative modelling for process supervision systems. In *First European Meeting on Cognitive Approaches to Process Control*, 1987.
- [Pra85] D. Dubois H. Prade. *Théories des possibilités*. Masson, 1985.
- [Ra86] O. Raiman and al. Dedale: illustration du raisonnement approximatif dans un diagnostic. In *6èmes Journées Internationales - Les systèmes experts et leurs applications*. Avignon, pages 614–631, 1986.
- [Rai84] O. Raiman. *Mémoire de D.E.A. Système expert pour la résolution de problèmes de PH en Physique Qualitative*. Technical Report, Laboratoires de Marcoussis, 1984.
- [Rai86a] J.L. Dormoy O. Raiman. Physique qualitative : la représentation des connaissances en physique qualitative pour l'intelligence artificielle. In *Journées Nationales Sur l'Intelligence Artificielle du P.R.C. I.A.*, pages 37–50, 1986.
- [Rai86b] O. Raiman. Order of magnitude reasoning. In *AAAI*, pages 100–105, 1986.

- [RG77] C. Rieger and M. Grinberg. The declarative representation and procedural simulation of causality in physical mechanisms. In *IJCAI*, pages 250–256, 1977.
- [Rit88] Jean-Francois Rit. *Modélisation et propagation de contraintes temporelles pour la planification*. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, LIFIA, 1988.
- [Sa86] P.A. Sachs and al. Escort: an expert system for complex operations in real time. *Expert Systems*, 3(1):22–29, January 1986.
- [Sac87] E. Sacks. Piecewise linear reasoning. In *AAAI*, pages 655–659, 1987.
- [Sai85] B. Saint-Servin. Causalité (philosophie). In *Encyclopaedia Universalis*, pages 426–429, 1985.
- [SJ80] G.J. Sussman and G.L. Steele Jr. Constraints: a language for expressing almost-hierarchical descriptions. *Artificial Intelligence*, 14(1):1–39, 1980.
- [Tho77] R. Thom. *Stabilité structurelle et morphogénèse*. InterEditions, Paris, 1977.
- [Tho85] R. Thom. La science malgré tout ... In *Encyclopaedia Universalis*, pages 73–77, 1985.
- [Ver85] Didier Vernet. Extase: exemple de traitement d'alarmes par système expert. In *Journées ORIA '85*, 1985.
- [Ver87] M. Lepetit D. Vernet. Physique qualitative et contrôle de processus. In *Journées d'Avignon 87*, pages 1229–1247, 1987.
- [Wel86] D. S. Weld. The use of aggregation in causal simulation. *Artificial Intelligence*, 30:1–34, 1986.
- [Wil84] B. Williams. The use of continuity in a qualitative physics. In *AAAI*, pages 350–354, 1984.
- [Wil86] B. Williams. Doing time: putting qualitative reasoning on firmer ground. In *AAAI*, pages 105–111, 1986.
- [Wit83] A. P. Witkin. Scale-space filtering. In *IJCAI*, pages 1019–1023, 1983.
- [Yip87] K. M. Yip. Extracting qualitative dynamics from numerical experiments. In *AAAI*, pages 665–670, 1987.





---

---

# Annexe A

## Remarques sur les FTQs

---

---

Cette annexe décrit brièvement le cadre d'écriture des Fonctions de Transfert Qualitatives. Des exemples sont donnés de l'influence des hypothèses de modélisation choisies sur la combinatoire de l'algorithme de simulation qui a été développé.

### 1 L'utilisation du principe de superposition

Le problème principal de l'écriture d'une Fonction de Transfert Qualitative est dû à son caractère local : une FTQ doit permettre d'inférer l'influence d'un épisode quelconque de l'historique d'évolution d'une variable. Mais ce mécanisme d'inférence doit être cohérent, au sens où la somme des influences inférées depuis des épisodes considérés de manière indépendante doit être égale à l'influence de l'évolution constituée par les épisodes pris dans leur ensemble.

A titre d'exemple, la FTQ *q-condo* présentée dans le chapitre 3 n'obéit pas à ce principe. Si un créneau de tension est décrit par plusieurs épisodes, la somme des influences inférées sur la charge du condensateur n'est pas égale à l'influence propagée depuis un épisode unique décrivant le créneau. Effectivement, la mise en équations de l'évolution de la charge  $Q$  est faite avec l'hypothèse que la durée du créneau de tension qui en est la cause est connue. Pour se passer de cette hypothèse, il faudrait que la FTQ garde en mémoire les épisodes précédant l'épisode donné en paramètre.

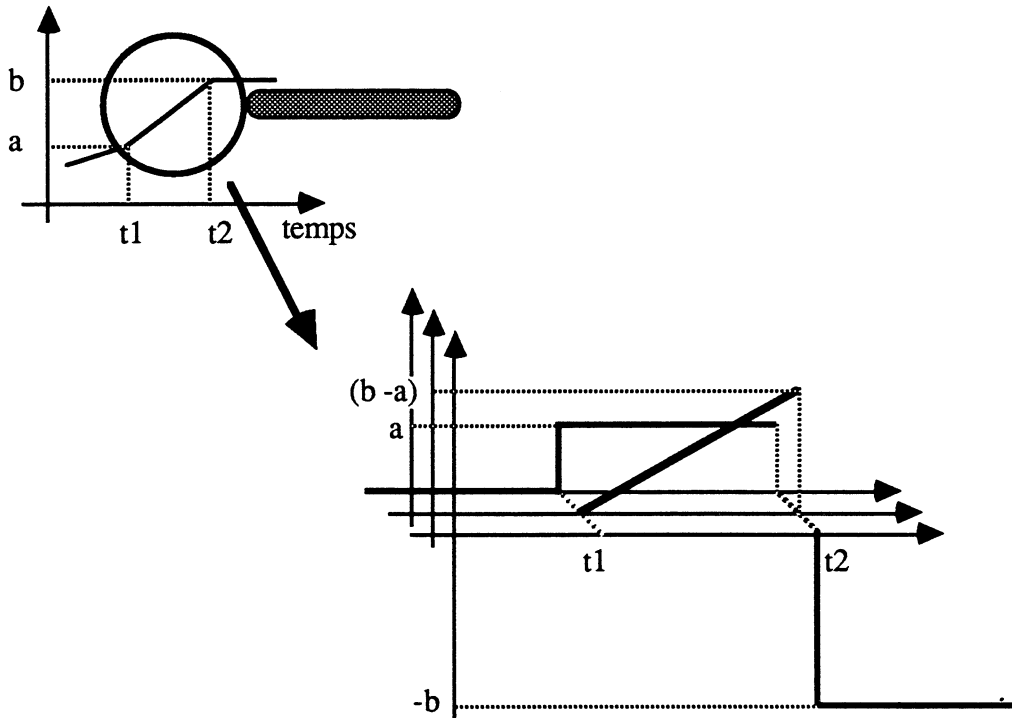


Figure A.1 : La décomposition d'un épisode faite par les FTQs

Il existe donc deux manières d'aborder l'écriture de FTQs :

- La première consiste à gérer un état pour toute contrainte liant deux nœuds du graphe. Cet état comprend suffisamment de variables pour permettre de reconstituer des conditions initiales qui permettent le calcul de l'influence de tout épisode. Cette solution présente le désavantage de créer de nouveaux types de données<sup>1</sup> ou de devoir programmer des fonctions de calcul de ces données par accès aux épisodes déjà inférés.
- La deuxième façon d'envisager l'écriture des FTQs consiste à assurer un principe d'indépendance. Dans ce cas les FTQs donnent un cadre de programmation fonctionnelle de la propagation de formes d'évolutions, en évitant de devoir explicitement maintenir un état global.

C'est cette dernière solution qui a été choisie dans l'application aux procédés continus. Le cadre de modélisation choisi par S. Gentil et S. Féray Beaumont est linéaire (les

<sup>1</sup>Par exemple, en créant une "fermeture" (closure) des FTQs de toutes les contraintes entre nœuds du graphe ; les variables rémanentes des fermetures permettent de conserver un état associé à chaque contrainte.

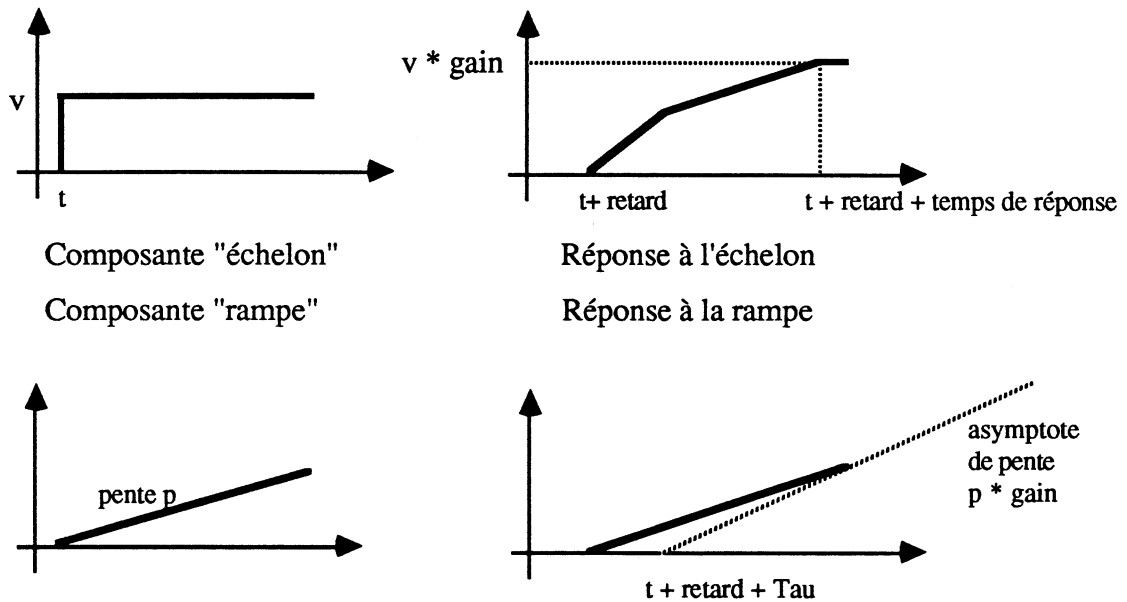


Figure A.2 : Les réponses aux composantes d'un épisode

influences propagées par les FTQs sont solutions d'équations différentielles linéaires). Dans ce cas, selon le principe de superposition, la réponse à une somme d'entrées sur une variable est la somme des réponses à chacune des entrées prises séparément (dans le vocabulaire des fonctions de transfert).

Ce principe permet effectivement de considérer l'évolution d'une variable comme une somme de fonctions égales à un épisode sur son domaine de définition et à 0 ailleurs (même si ces "entrées" proviennent bien de la même variable). Mais il permet aussi de calculer l'influence de chaque épisode de manière indépendante en utilisant la décomposition donnée par la figure A.1. Chaque épisode est la somme de deux échelons et d'une rampe. Il suffit de connaître les réponses à l'échelon et à la rampe du transfert codé pour pouvoir calculer l'influence de tout épisode. La figure A.2 donne un exemple de réponse à un épisode complet.

De nombreuses FTQs ont été écrites par S. Féray Beaumont, à des niveaux d'approximation variés.

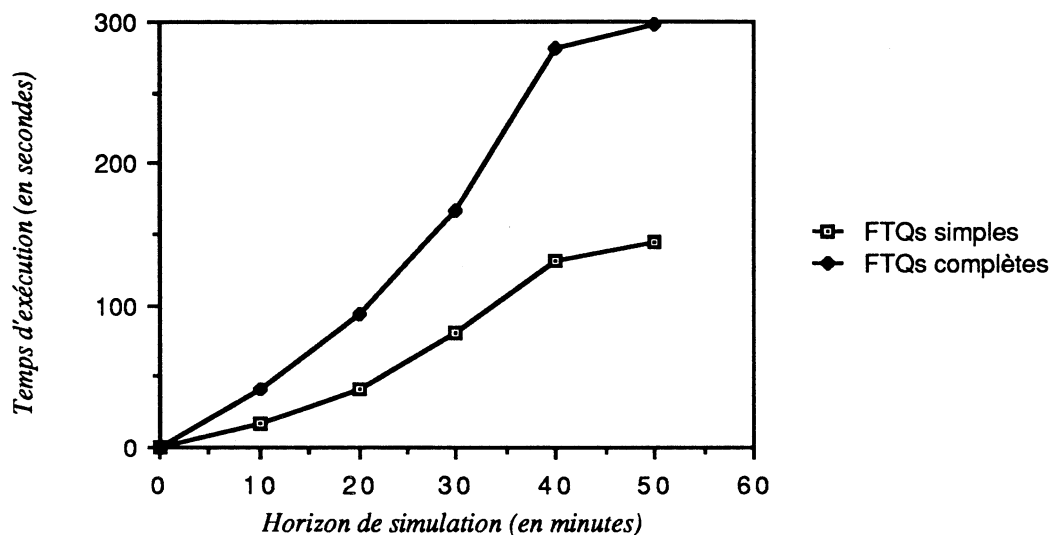


Figure A.3 : Temps d'exécution de simulations suivant la nature des FTQs

## 2 Résultats

La forme des FTQs est bien sûr très importante dans l'évaluation de la complexité réelle des techniques de simulation mises en œuvre. Nous avons fait des mesures de performance de simulations sur des horizons variables en considérant deux ensembles de FTQs. Le premier ensemble obéit à la loi de décomposition générale des épisodes qui vient d'être explicitée. Le deuxième ensemble est formé de FTQs plus simples, codées en partant de la constatation suivante : lorsque les épisodes sont construits à partir de mesures en joignant tout simplement les points de mesure, il n'y a jamais de discontinuités dans les historiques des variables. Dans ce cas, les réponses des échelons "montants" annulent exactement les réponses des échelons "descendants" des épisodes. Les FTQs peuvent donc se borner à calculer uniquement la réponse à la composante rampe de la décomposition d'un épisode. Or la description d'une réponse à une rampe fait intervenir moins d'épisodes que la réponse à un échelon, pour un épisode de durée donnée. Il y a donc globalement moins d'épisodes inférés.

Les figures A.3 et A.4 présentent des résultats de simulation. Ces simulations ont été faites à partir de fichiers de mesures des variables du modèle de la SET (17 variables) portant sur des durées variant de dix à cinquante minutes. Les périodes d'acquisition varient suivant les variables et les diverses simulations. La première figure donne les temps de simulation sur une station de travail HP 9000-350 supportant le langage Common-Lisp. La deuxième figure donne le nombre d'appels aux FTQs. L'allure des courbes est globalement linéaire, les écarts étant dus à la différence des périodes

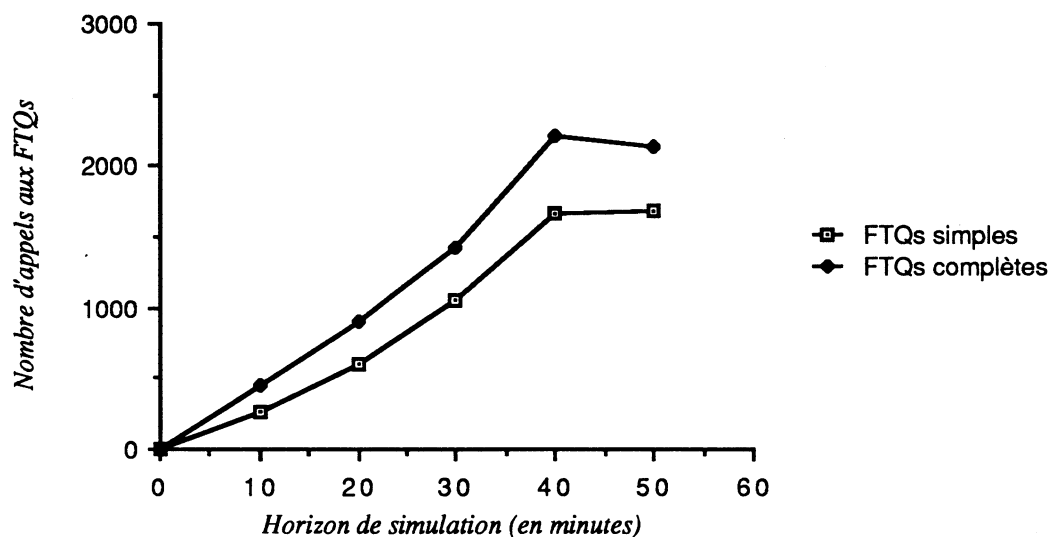


Figure A.4 : Nombre d'appels aux FTQs suivant leur nature

d'acquisition des fichiers de mesures. L'aspect convexe du début de la courbe de la figure A.3 peut trouver une explication par l'encombrement croissant de la mémoire qui entraîne des appels de plus en plus fréquents au "ramasse-miettes", et donc un temps d'exécution qui ne croît pas linéairement (cependant, les historiques des variables sont régulièrement tronqués, ce qui permet en théorie un fonctionnement du système pendant un temps infini). La moindre croissance du coût d'exécution comme du nombre d'appels aux FTQs (figure A.4) dans le cas du fichier de mesures portant sur une période de cinquante minutes ne peut s'expliquer que par un hasard (voir le phénomène de non convergence de la durée des épisodes décrit à la section 4.2, qui est peut être particulièrement important pour certaines combinaisons de valeurs des périodes d'acquisition et des constantes de temps du modèle).



---

---

# Annexe B

## Une trace de simulation

---

---

Une trace des propagations d'influences d'une simulation est donnée pour le modèle et les conditions initiales décrites par la figure B.1. La trace détaille les inférences faites par les FTQs (les épisodes sont décrits par une liste (date-de-début,date-de-fin,pente)), et les entrées et sorties des variables de la liste  $L_{a-simuler}$  :

---

simulation au temps 5

Là-simuler est initialisée à :

((V3 . 5) (V4 . 5))

;;

La propagation d'influence par la FTQ de type M+ sur l'arc V3 -> V1

depuis l'épisode de bornes [0.0,5.0] a créé les épisodes suivants :

[0] (1 2.3333335 0.90444446)

[1] (2.3333335 5 0.02888822)

[2] (5 6 -0.39999986)

[3] (6 7.3333335 -0.33600006)

[4] (7.3333335 10 -0.19733337)

10

;;

Ajout dans Là-simuler de la variable V1 à la date 2.3

La variable V3 est sortie de Là-simuler à la date 5.0

;;

La propagation d'influence par la FTQ de type M+ sur l'arc V1 -> V2

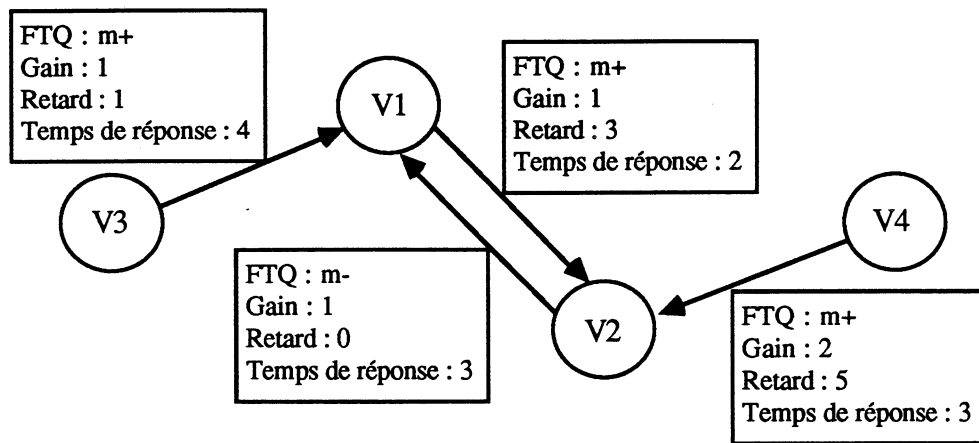
depuis l'épisode de bornes [1.0,2.3] a créé les épisodes suivants :

[0] (4 4.6666665 0.30148146)

[1] (4.6666665 5.3333335 0.30148152)

20





avec comme conditions initiales :

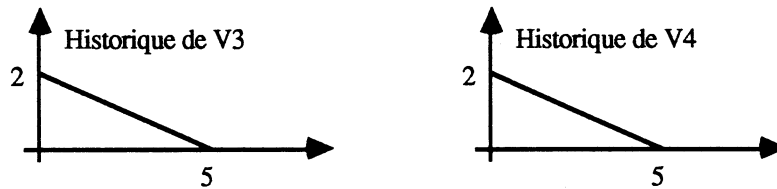


Figure B.1 : Le modèle pris comme exemple pour donner une trace de simulation

[2] (5.3333335 6.0 -0.37986666)  
 [3] (6.0 7.3333335 -0.2230963)

.....

Ajout dans Là-simuler de la variable V2 à la date 4.7

30

La variable V1 est sortie de Là-simuler à la date 4.0

.....

La propagation d'influence par la FTQ de type M- sur l'arc V2 -> V1  
 depuis l'épisode de bornes [4.0,4.7] a créé les épisodes suivants :

[0] (4 4.6666665 -0.20098764)  
 [1] (4.6666665 5.6666665 0.12662221)  
 [2] (5.6666665 7.6666665 0.07436543)

40

.....

Ajout dans Là-simuler de la variable V1 à la date 4.0

La variable V2 est sortie de Là-simuler à la date 5.0

.....

La propagation d'influence par la FTQ de type M+ sur l'arc V1 -> V2  
 depuis l'épisode de bornes [2.3,4.0] a créé les épisodes suivants :

50

[0] (5.3333335 6.0 0.5746148)  
 [1] (6.0 7 0.25820547)

[2] (7 7.6666665 -0.5246768)  
 [3] (7.6666665 9 -0.30814353)

.....  
 Ajout dans Là-simuler de la variable V2 à la date 5.0

La variable V1 est sortie de Là-simuler à la date 4.7

60

.....  
 La propagation d'influence par la FTQ de type M+ sur l'arc V4 -> V2  
 depuis l'épisode de bornes [0.0,5.0] a créé les épisodes suivants :

[0] (5 6.0 1.9866667)  
 [1] (6.0 8 0.41333342)  
 [2] (8 10 -1.6000001)  
 [3] (10 11.0 -0.50399995)  
 [4] (11.0 13 -0.29599997)

70

.....  
 Ajout dans Là-simuler de la variable V2 à la date 5.0

La variable V4 est sortie de Là-simuler à la date 5.0

.....  
 La propagation d'influence par la FTQ de type M- sur l'arc V2 -> V1  
 depuis l'épisode de bornes [4.7,5.0] a créé les épisodes suivants :

[0] (4.6666665 5 -0.16380498)  
 [1] (5 6.0 0.103197135)  
 [2] (6.0 8 0.060607843)

80

.....  
 Ajout dans Là-simuler de la variable V1 à la date 4.7

.....  
 La propagation d'influence par la FTQ de type M+ sur l'arc V1 -> V2  
 depuis l'épisode de bornes [4.0,4.7] a créé les épisodes suivants :

90

[0] (7 7.6666665 0.45199794)  
 [1] (7.6666665 8.333333 -0.2847587)  
 [2] (8.333333 9.666666 -0.16723923)

.....  
 Ajout dans Là-simuler de la variable V2 à la date 5.3

La variable V1 est sortie de Là-simuler à la date 5.0

100

.....  
 La propagation d'influence par la FTQ de type M- sur l'arc V2 -> V1  
 depuis l'épisode de bornes [5.0,5.3] a créé les épisodes suivants :

[0] (5 5.3333335 -0.6369423)  
 [1] (5.3333335 6.3333335 0.40127367)  
 [2] (6.3333335 8.333334 0.23566866)

.....  
 Ajout dans Là-simuler de la variable V1 à la date 5.0

*; le reste de la simulation est passé à propager les influences entre les  
; variables V1 et V2 du circuit*

---

La figure B.2 donne les historiques et les agendas des deux variables V1 et V2.

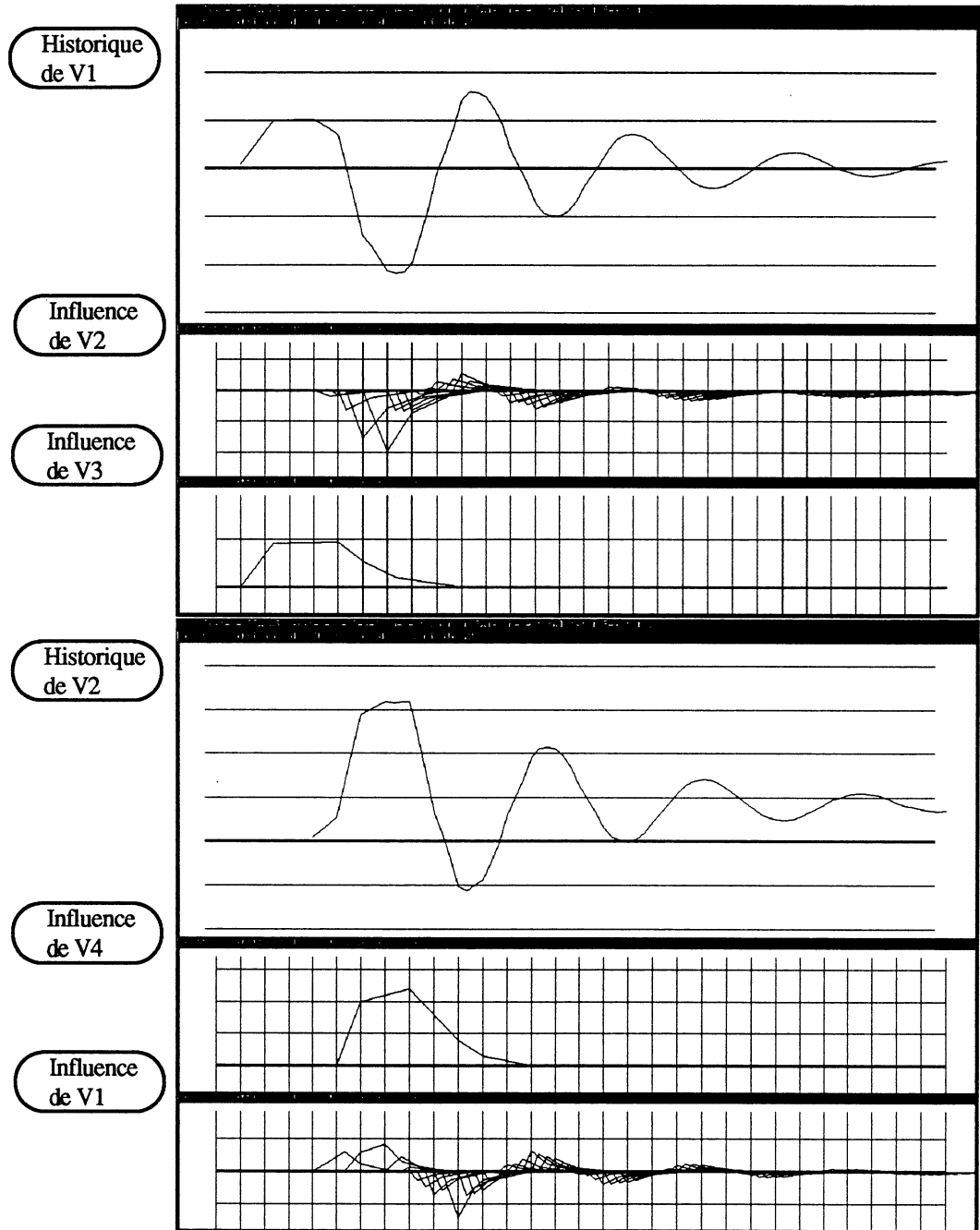


Figure B.2 : Historiques et agendas des variables V1 et V2

