



HAL
open science

Contribution au diagnostic qualitatif des procédés en intelligence artificielle

Eduardo Ribas Santos

► **To cite this version:**

Eduardo Ribas Santos. Contribution au diagnostic qualitatif des procédés en intelligence artificielle. Alimentation et Nutrition. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1996. Français. NNT : 1996INPL156N . tel-01751165

HAL Id: tel-01751165

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751165>

Submitted on 29 Mar 2018

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

[M] 1996 RIBAS SANTOS, E.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Thèse

présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Option
Génie des Procédés

par
Eduardo RIBAS SANTOS

Intitulée

**CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC QUALITATIF DES
PROCEDES EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

Soutenue publiquement le 16 Décembre 1996
devant la commission d'examen

Jury

Rapporteurs	M. A. ACCARY M. P. BOURSEAU
Examineurs	Mlle S. CAUVIN M. F. CHARPILLET M. J.P. CORRIOU M. C. FONTEIX

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire des Sciences du Génie Chimique du CNRS, dans le groupe de recherche "Traitement et Acquisition de l'information, Simulation et Commande des procédés" (TASC), sous la direction de Monsieur le Professeur J.P. CORRIOU.

Cette recherche a pu être effectuée grâce à une bourse accordée par le CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brésil.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur J.P. CORRIOU de m'avoir accueilli dans son équipe de recherche, pour la liberté de travail qu'il m'a accordée tout en me transmettant des connaissances nouvelles et des points de vue différents.

Je tiens à remercier Monsieur P. BOURSEAU, professeur à l'Université de Bretagne-Sud et Monsieur A. ACCARY, professeur à l'ENSC Mulhouse d'avoir bien voulu rapporter sur cette thèse ainsi que Mademoiselle S. CAUVIN de l'IFP, Monsieur F. CHARPILLET de l'INRIA Lorraine et Monsieur C. FONTEIX de l'ENSAIA d'avoir accepté d'être membres du jury. Je remercie en particulier S. CAUVIN et F. CHARPILLET pour les discussions intéressantes que nous avons eues au cours de cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur D. TONDEUR, Directeur du LSGC à mon arrivée au laboratoire, et Monsieur H.G. LINTZ, actuel Directeur du LSGC.

Je tiens à remercier tous les membres du groupe TASC pour les conseils précieux, en particulier Frantz FOURNIER, Mehdi BEN THABET et Sergio LUCENA.

Résumé

L'objectif de la supervision des procédés est de surveiller le fonctionnement d'une unité afin d'assurer la réalisation des objectifs fixés, quels que soient les incidents et perturbations extérieures pouvant intervenir. Il est nécessaire d'avoir une vue générale afin d'être en mesure de réagir et de se focaliser sur les points clés.

Dans cette thèse, nous proposons une modélisation de la connaissance du fonctionnement des procédés adaptée à la représentation généralement choisie par les spécialistes lors d'un problème donné: à l'aide d'un modèle complet du fonctionnement normal de l'unité, ils cherchent à trouver des fautes ou des combinaisons de fautes possibles. Les concepts proposés sont fondés sur une réflexion du processus d'acquisition de la connaissance qui permet au spécialiste de progresser dans l'analyse des activités en production. Ce processus inclut la formulation, à partir des modèles mathématiques contenant la description du comportement dynamique ou statique des systèmes, d'un modèle préliminaire, de telle manière qu'un spécialiste, pour améliorer ses connaissances, puisse s'appuyer sur celles composant un modèle créé par un autre spécialiste.

Dans un premier temps, nous introduisons une méthodologie pour la définition des connaissances permettant au spécialiste (ou, en général, à un individu placé au sein d'une organisation industrielle) de mieux représenter formellement les descriptions de problèmes afin de reproduire ses raisonnements. Dans un deuxième temps, nous proposons une formulation pour la représentation de la connaissance et pour le diagnostic, où la construction de la base de connaissances comprend des étapes résultant du processus d'acquisition de la connaissance qualitative.

Les concepts sont illustrés par des procédés simples choisis dans le domaine du génie des procédés. Ainsi, le diagnostic qualitatif d'un réacteur idéal continu parfaitement agité est examiné en détail dans le cadre général précédemment étudié.

Abstract

Chemical process supervision includes monitoring of the units in order to assure satisfaction of the goals in presence of an ever changing external environment. A global process view is necessary so that key points are focused and corrective measures can be selected.

In this work, we present a modeling of the knowledge of process operation adapted to the representation currently used by experts under process malfunctioning: from the normal unit functioning model, they imagine possible faults or combinations of faults. The proposed concepts are based on the way we think that knowledge is acquired by specialists, permitting them to progress in the definition of production activities. This process includes the definition of a preliminary model, formulated from the mathematical models containing the description of dynamic and static system behaviour. Since these models are based on fundamental knowledge, one specialist can ameliorate his knowledge using models created by other specialists.

In a first stage, we introduce a method giving to plant staff the opportunity to define knowledge in such a manner that experts can reproduce their reasoning. According to this method, descriptions of problems can be better represented and formalized by the experts themselves. In a second stage, we propose a formal system to represent knowledge and to make automatic diagnosis. The knowledge base is constructed by steps resulting from the qualitative knowledge acquisition process.

The application of the concepts is illustrated with the consideration of simple processes from the chemical engineering domain. The qualitative diagnosis of a continuous (ideal) stirred tank reactor is examined in detail in the previously described framework.

Table des matières

1	Introduction	11
2	Revue bibliographique	15
2.1	Graphes causaux	15
2.1.1	Graphes orientés	16
2.1.2	Graphes d'événements	22
2.1.3	Modélisation à partir de règles de causalité	23
2.2	Représentations hiérarchiques	27
2.2.1	Hiérarchie de dysfonctionnements	30
2.2.2	Hiérarchie d'objectifs	32
2.3	Conclusions	38
3	Acquisition des connaissances du fonctionnement des systèmes	41
3.1	Système industriel	41
3.2	L'acquisition des connaissances	43
3.2.1	Dépendance des faits	43
3.2.2	Dépendance des causes	46
3.2.3	Analyse des faits et des causes à partir de la représentation des connaissances	46
3.2.4	Caractérisation des faits et de leur dépendance	48
3.3	Caractérisation des faits et de leur dépendance	51
3.4	Caractérisation des faits en tant qu'objectifs	56
3.4.1	La traduction des objectifs par le contexte physique	57
3.4.2	La traduction des objectifs par les phénomènes	59
3.4.3	La traduction des objectifs par les effets	59
3.5	Conclusions	65
4	Définition des connaissances qualitatives	67
4.1	Définition des objectifs	67
4.1.1	Résultats souhaités	68
4.1.2	Conditions nécessaires	69
4.2	Satisfaction des exigences	70
4.2.1	Les conditions en tant qu'état favorable	71
4.2.2	Les conditions en tant qu'état non favorable	80

4.2.3	Interventions sur le fonctionnement à partir du traitement de l'in-formation	86
4.3	L'organisation des connaissances	90
4.3.1	La hiérarchie des objectifs	90
4.3.2	La hiérarchie des systèmes	93
4.3.3	Les relations entre les conditions	95
4.4	Conclusions	95
5	Formulation pour la représentation de la connaissance	97
5.1	Introduction	97
5.2	Construction de la base de connaissances	100
5.2.1	Définition de la hiérarchie des systèmes	102
5.2.2	Les systèmes	104
5.2.3	Les conditions nécessaires	106
5.2.4	Les altérations des conditions nécessaires	107
5.3	Définition du mécanisme d'inférence	110
5.3.1	L'hypothèse du dysfonctionnement	112
5.3.2	L'hypothèse du défaut	113
6	Diagnostic lors du dysfonctionnement d'un réacteur	117
6.1	Le modèle mathématique	117
6.1.1	Application du principe de conservation	118
6.1.2	Caractérisation des quantités fondamentales	120
6.1.3	Régulation	123
6.2	Définition des connaissances qualitatives	123
6.2.1	Les contributions et les influences	123
6.2.2	La réalisation des objectifs et les conditions	126
6.3	Les relations entre les faits	129
7	Conclusions générales	133

Chapitre 1

Introduction

L'objectif de la supervision des procédés est de surveiller le fonctionnement d'une unité afin qu'elle reste dans les plages de fonctionnement compatibles avec les spécifications établies pour les produits de sortie et les normes de sécurité, quels que soient les incidents et perturbations extérieures pouvant intervenir. Il s'agit d'avoir une vue générale afin d'être en mesure de réagir et de se focaliser sur les points clés. On ne travaille pas au niveau du détail car on prend en compte l'ensemble du dispositif et les interactions entre les différentes parties (Cauvin 1995). Selon cet auteur, l'architecture d'un environnement à base de connaissances pour la supervision de procédés peut comprendre:

- un module d'acquisition des données,
- un module de diagnostic des alarmes chargé de l'examen des problèmes liés au dispositif industriel,
- un module de diagnostic élaboré chargé de détecter des événements pouvant perturber le fonctionnement d'un procédé donné et de déterminer son mode de fonctionnement global,
- un module de conduite chargé de suggérer des actions correctrices à l'opérateur pour l'aider à maintenir le procédé dans un état de fonctionnement optimal,
- un module sommaire de tests des conclusions chargé de tester les plans d'actions suggérés par le module précédent sur un simulateur afin de les valider,
- un module de mise à disposition ergonomique des conclusions et d'explication du comportement du procédé par la connaissance des interactions à court terme entre les variables.

Cette architecture ne prend pas en compte les situations où les experts appliquent toute leur expérience et leur savoir de base pour adapter les procédures (ou même les installations et leur organisation) à partir du diagnostic. Afin de formaliser une telle connaissance, une méthode permettant d'élaborer de nouvelles connaissances doit être établie.

Dans ce but, nous proposons une modélisation de la connaissance du fonctionnement des procédés adaptée à la représentation généralement choisie par les spécialistes lors

d'un problème inconnu: avec un modèle complet du fonctionnement normal de l'unité, ils cherchent à trouver des fautes ou des combinaisons de fautes possibles.

Cette dualité pose des difficultés. D'un côté, le modèle doit être construit à partir de la connaissance a priori des causes et de leurs effets, traduisant le comportement prédictif du raisonnement. D'un autre côté, afin que de nouvelles connaissances puissent être introduites, le résultat du diagnostic doit traduire un autre comportement du raisonnement, qu'on appelle l'"explication": si A implique B, C implique B et B est vrai, trouver la vérité de C diminue la crédibilité de A. Dans la méthodologie proposée, ces deux aspects sont envisagés.

Dans le Chapitre 2, nous procédons à une revue bibliographique des travaux développés pour le diagnostic du dysfonctionnement des procédés basé sur des représentations qualitatives. Les modèles permettant le diagnostic sont fondés sur la connaissance physique que l'on a du phénomène, c'est-à-dire, sur les modèles mathématiques proposant la description du comportement statique ou dynamique des systèmes. Ces travaux sont groupés selon deux approches générales: la modélisation des connaissances au sein des structures qu'on appelle "graphes causaux" et la structuration des connaissances à partir de représentations hiérarchiques.

L'objectif du Chapitre 3 est d'introduire la problématique sur laquelle notre réflexion est fondée:

- une définition des systèmes industriels,
- le processus au sein duquel un spécialiste se sert de ses compétences pour structurer les connaissances permettant d'établir le diagnostic,
- la définition des éléments conduisant le spécialiste à appliquer la connaissance à partir de laquelle un modèle quantitatif du procédé est construit. Ces éléments peuvent servir de base pour la définition de la connaissance à utiliser lors d'un diagnostic.

Le Chapitre 4 présente notre approche pour la définition des connaissances à prendre en compte lors d'un diagnostic. La représentation des connaissances est proposée en fonction d'un ensemble d'exigences générales d'ordre technique, économique et social, qu'on attribue à un système industriel, et de l'ensemble des conditions dont dépend le processus tendant à la réalisation d'objectifs fixés.

Dans le Chapitre 5, nous proposons une formulation pour la représentation de la connaissance et pour le diagnostic à partir:

- de la représentation des faits qui peuvent être observés, en fonction d'une qualité fixée;
- de la représentation des faits conçus théoriquement, utilisés comme des hypothèses pour l'établissement de relations entre les faits observables;
- de la représentation des relations entre les hypothèses;
- de la représentation des relations entre les hypothèses et les faits observables.

Le diagnostic est réalisé en deux étapes:

- La sélection de l'hypothèse à partir de laquelle les faits observés provenant de l'interprétation des signaux du procédé peuvent être expliqués, que l'on désigne par hypothèse du dysfonctionnement.
- La sélection de l'hypothèse à partir de laquelle l'hypothèse du dysfonctionnement peut être expliquée, que l'on désigne par hypothèse du défaut.

La sélection de l'hypothèse du défaut dépend de la vérification des défauts possibles rapportés à l'altération de la structure matérielle des composants de l'installation ou de propriétés liées à la nature des éléments en transformation.

Afin d'illustrer la mise en oeuvre des concepts proposés, dans le Chapitre 6, le cas du diagnostic du dysfonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité est examiné.

Le Chapitre 7 présente nos conclusions.

Chapitre 2

Revue bibliographique pour le diagnostic du dysfonctionnement des procédés basé sur des représentations qualitatives

De nombreux travaux concernent le raisonnement qualitatif utilisé lors du dysfonctionnement des procédés. Ces travaux sont complémentaires car la représentation des connaissances dépend des formulations utilisées dans la modélisation.

Nous proposons un examen des travaux dont la complémentarité contribue à une meilleure caractérisation de l'ensemble des aspects de la connaissance à considérer. Ainsi, lors de certaines formulations, le diagnostic est basé sur des représentations où les relations entre les changements de la valeur des variables du procédé sont prises en compte. Lors d'autres formulations, le diagnostic est basé sur une représentation hiérarchique des systèmes qui composent les installations, ou des relations entre les activités conduisant à la réalisation des objectifs d'un système en fonctionnement.

2.1 Graphes causaux

Les représentations à partir des "graphes causaux" sont basées sur la connaissance des relations entre les variables d'un procédé. Ces relations sont établies au sein d'une représentation symbolique, correspondant à la variation des valeurs des variables par rapport à un état stationnaire. Normalement, les symboles sont définis de la manière suivante:

Soit $x(0) = x^s$ la valeur spécifiée d'une variable du procédé à l'état stationnaire.

Etant donné un état $x(t)$, où $t > 0$, considérons la variable d'écart $\delta x = x(t) - x(0)$.

Alors, les symboles x^+ , x^- et x^0 représentent, respectivement, les situations où $\delta x > 0$, $\delta x < 0$ et $\delta x = 0$.

Les symboles x^+ , x^- et x^0 désignent des états “qualitatifs” associés aux variables du procédé. En ce qui concerne les situations de dysfonctionnement, celles-ci sont prises en compte lors de l’identification d’états où la variable d’écart $\delta x \neq 0$. Ainsi, les défaillances sont associées aux valeurs des variables symbolisées par x^+ et x^- .

Le problème du diagnostic est l’inverse du problème de la modélisation de la propagation des défaillances, ce dernier étant plus simple. La modélisation de la propagation des défaillances comprend la représentation de la réponse du procédé à une perturbation (la cause). Le diagnostic, par contre, se sert d’un échantillon d’états qualitatifs (associés à des variables mesurées dont les valeurs ne correspondent pas aux valeurs désirées) pour générer une hypothèse. Cette hypothèse concerne la cause (la perturbation) qui provoque (ou qui a provoqué) l’apparition du dysfonctionnement. Cette dualité amène la méthode de diagnostic, au sein des formulations des graphes causaux, à prendre en compte, d’abord, la prédiction de l’impact des perturbations sur les variables mesurées. Cette caractéristique est due, peut-être, à la simplicité de la modélisation de la défaillance comparée au problème de diagnostic. En procédant de cette manière, on a l’avantage de pouvoir traiter le problème de modélisation en oubliant, au moins au début, les procédures du diagnostic.

Nous nous limiterons à la présentation de trois formulations considérées comme les plus adaptées à notre problématique¹. Elles proposent:

- à partir d’une structure désignée par un “graphe orienté”, une représentation des relations entre les états qualitatifs des variables mesurées et non mesurées;
- la réalisation d’une structure où les relations entre les états qualitatifs des variables mesurées définissent des “événements”;
- une représentation des connaissances basée sur des règles, en associant une structure où sont représentées les liaisons entre les équipements à une structure contenant la représentation de la connaissance de certains principes physiques. A partir de cette deuxième structure, les relations entre les états qualitatifs associés aux variables du procédé peuvent être établies.

2.1.1 Graphes orientés

D’après le formalisme proposé par Iri et Aoki (1979), des nombreuses études ont été menées (Kokawa et Shingai 1982), (Shiozaki et Matsuyama 1985), (Kramer et Palowitch 1987), (Oyeleye et Kramer 1988), (Mohindra et Clark 1993), (Wilcox et Himmelblau 1994). Nous examinerons les méthodes des graphes orientés et signés proposées par Iri et Aoki (1979), Shiozaki et Matsuyama (1985) et Kramer et Palowitch (1987).

Le diagnostic basé sur un graphe orienté consiste à trouver, par le moyen des relations de cause à effet, la connexion existant entre les états qualitatifs observés sur le procédé et l’état associé à une des variables représentées qui est à l’origine du dysfonctionnement. Les états observés peuvent être ceux correspondant à l’état stationnaire spécifié ou ceux

¹L’emploi du formalisme lors de la supervision des procédés est celui utilisé par Cauvin et Braunschweig (1993) et Cauvin et Bes (1995).

correspondant aux situations où la variable d'écart $\delta x \neq 0$. Ainsi, à partir de la représentation des connaissances, des "chemins" possibles de propagation d'une "défaillance" sont modélisés. Les défaillances sont transmises de variable à variable au sein de la structure.

La construction des graphes orientés consiste premièrement à modéliser les noeuds. Ces noeuds sont définis par les variables du procédé. Deuxièmement, la construction des graphes consiste à modéliser les arcs, qui représentent des influences causales entre les variables. Celles-ci peuvent être définies à partir du modèle quantitatif du procédé (Iri et Aoki 1979).

A chaque noeud, on peut attribuer un état qualitatif. Aux arcs, on attribue un signe "+" ou "-", à partir desquels le sens de la variation de la variable définissant le noeud "cible" par rapport à la variation de la variable définissant le noeud "source" est spécifié. Les états qualitatifs sont associés aux noeuds lors d'un diagnostic.

Le diagnostic peut être caractérisé à partir de deux étapes:

- la définition des interprétations du graphe sous forme d'arbres orientés (Kramer et Palowitch 1987),
- la génération des modèles de cause à effet (Iri et Aoki 1979).

Définition des arbres orientés (interprétations)

La génération des "arbres orientés" (que l'on désigne aussi par arbres de simulation ou interprétations) concerne la modélisation de la propagation des défaillances. Ces arbres sont définis à partir des relations entre les noeuds du graphe, et se ramifient à partir de noeuds choisis (noeuds "racine"), qui peuvent être définis par une variable mesurée ou non mesurée. A un noeud racine est associée une perturbation (un état qualitatif correspondant à une situation où la valeur de la variable définissant le noeud ne correspond pas à la valeur spécifiée de l'état stationnaire).

Un arbre orienté représente, alors, la prédiction des chemins dominants de propagation d'une perturbation. Il porte aussi l'information sur le sens de la variation (donné par le signe de la variable d'écart δx) des variables définissant chaque noeud connecté directement ou indirectement au noeud racine. Ainsi, pour chaque noeud racine, il y a plusieurs interprétations (arbres orientés) possibles sur la propagation des perturbations. Nous allons utiliser l'exemple présenté et analysé par Kramer et Palowitch (1987).

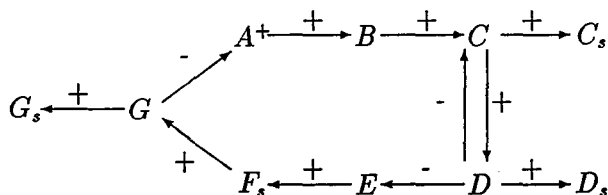


FIG. 2.1 - Relations entre les noeuds d'un graphe orienté et signé.

Prenons le graphe illustré par la Figure 2.1, où les dépendances entre les variables, au sein d'un réseau abstrait, sont représentées. Les noeuds définis par des variables mesurées

sont signalés avec la notation en indice s . Pour simplifier, la représentation des capteurs est confondue avec celle de leur variable correspondante, en considérant que la mesure prise par les capteurs est suffisamment rapide, et qu'on ne modélise pas les défaillances des capteurs eux-mêmes. Alors, en considérant que le noeud A est choisi comme le noeud racine, le graphe peut être réduit (Figure 2.2).

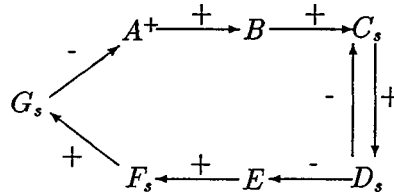


FIG. 2.2 - Relations entre les noeuds d'un graphe orienté et signé.

Le graphe peut encore être simplifié en éliminant les noeuds définis par des variables non mesurées, exception faite des noeuds qui peuvent être choisis comme racine. On peut remplacer les arcs liant ces noeuds. Pour cela, il suffit de prendre le signe de l'arc résultant égal au produit des signes des arcs que l'arc résultant remplace. De cette manière, on arrive à la représentation simplifiée, illustrée par la Figure 2.3, où le noeud A est le noeud racine.

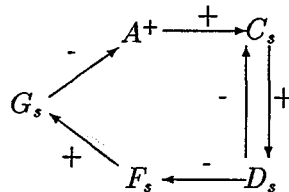


FIG. 2.3 - Relations entre les noeuds d'un graphe orienté et signé.

Par ailleurs, en ce qui concerne la génération des arbres orientés, deux aspects principaux doivent être pris en compte :

- l'élimination des boucles rétroactives,
- le traitement des boucles de commande.

L'élimination des boucles rétroactives

Lors de l'élimination des boucles rétroactives, on considère que les rétroactions négatives, générées par l'impact d'une perturbation sur une variable définissant un noeud, ne peuvent ni compenser ni surmonter la perturbation. Cette prémisse est rapportée à la notion de *transition simple*. Donc, par exemple, dans le graphe illustré par la Figure 2.3, on peut ignorer l'arc de retour liant les noeuds D_s et C_s (signe "-", pointé par le noeud C_s), puisque un état associé au noeud C_s ne peut pas retourner à l'état stationnaire quelque soit la perturbation (commencée en A, par exemple).

Alors, dès qu'au noeud A on attribue un état A^+ (Figure 2.3), deux interprétations pourront être dérivées. Cela correspond aux deux possibilités concernant la propagation de A^+ jusqu'au noeud F_s :

- (1) directement du noeud A (Figure 2.4);
- (2) en passant par les noeuds C_s et D_s (Figure 2.5).

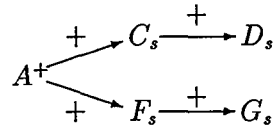


FIG. 2.4 - Arbres orientés (interprétations).

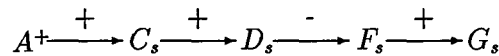


FIG. 2.5 - Arbres orientés (interprétations).

La considération de ces possibilités est nécessaire lorsqu'on ne connaît pas le rapport quantitatif entre les deux effets. Ces interprétations correspondent à l'effet dominant sur l'état associé à F_s à partir, respectivement, de A ou de D_s . Dans les situations où les effets sur F_s sont d'ordre de grandeur similaire, les prédictions correspondant aux deux interprétations se confondent.

Le traitement des boucles de commande

Lors du traitement des boucles de commande, on prend en compte leurs objectifs. Le but des boucles de commande est de supprimer l'effet des perturbations sur la variable contrôlée, en transférant celui-ci à la variable ou aux variables manipulées. La Figure 2.6 illustre un graphe orienté correspondant à une boucle de commande, où une perturbation peut être associée au noeud A et les états associés à la variable contrôlée et à la variable manipulée aux noeuds B et C, respectivement. Les noeuds D et E sont définis par des variables liées aux variables contrôlée et manipulée.

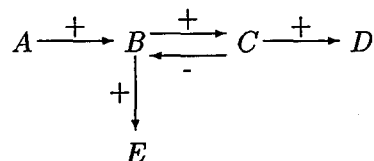


FIG. 2.6 - Graphe correspondant à une boucle de commande.

Dès qu'une perturbation est associée au noeud A, deux interprétations sont possibles:

- l'une, rapportée à l'obtention de la valeur souhaitée de la variable contrôlée;

- l'autre, concernant la saturation de la boucle de commande, lorsque l'amplitude de la perturbation excède la capacité de compensation de la boucle.

Lors du premier point ci-dessus, les états associés à B (et donc à E) ne changeront pas, alors que l'état associé à C changera de façon à compenser l'effet de la perturbation, en répondant dans le même sens (Figure 2.7). Par ailleurs, lors d'une situation de saturation de la boucle ou de changement de la consigne, la variable de contrôle va varier, transmettant l'effet de la perturbation à l'état associé au noeud E (Figure 2.8).

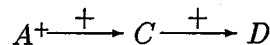


FIG. 2.7 - Arbres orientés (interprétations) d'un graphe correspondant à une boucle de commande.

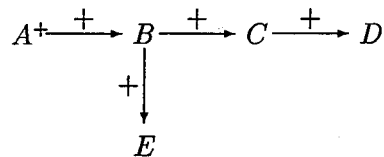


FIG. 2.8 - Arbres orientés (interprétations) d'un graphe correspondant à une boucle de commande.

Génération des modèles de cause à effet

Les interprétations étant extraites, le graphe peut être analysé à partir des effets provoqués par les états x^+ ou x^- associés aux variables définissant les noeuds racine (l'origine du dysfonctionnement). La simulation de chaque interprétation constitue un "modèle de cause à effet". Il est possible de générer autant de modèles de cause à effet que les simulations des arbres orientés du graphe le permettent.

En vue du diagnostic, les noeuds auxquels un état x^0 est associé n'offrent pas d'intérêt. Alors, étant donné un noeud n_j et un arc b_k :

1. n_j est valide si

$$\psi(n_j) \neq x^0$$

2. b_k est consistant si

$$\psi(\partial^+ b_k) \phi(b_k) \psi(\partial^- b_k) = +$$

où: $\psi(n_j)$ dénote l'état qualitatif associé au noeud n_j ,
 $\phi(b_k)$ dénote le signe attribué à l'arc b_k ;
 $\psi(\partial^+ b_k)$ et $\psi(\partial^- b_k)$ dénotent, respectivement, le signe des variables d'écart (δx) associées aux variables définissant le noeud source et le noeud cible de l'arc b_k .

Alors, d'après Iri et Aoki (1979):

Les défaillances ne se propagent que par des arcs consistants.

Pour illustrer cette définition, utilisons comme exemple la boucle de rétroaction présentée dans la Figure 2.9. Les noeuds A et B étant directement interconnectés, toute anomalie dans le procédé doit se manifester sur les deux noeuds, car l'effet d'une perturbation peut se présenter soit sur le noeud A soit sur le noeud B. Alors, dès qu'on observe un écart de même signe (caractérisant, respectivement, des états A^+ et B^+ ou A^- et B^-) sur les noeuds A et B, l'arc avec le signe "+" deviendra consistant (Figure 2.10). Dans cette situation, l'état associé au noeud A sera considéré comme l'origine de la défaillance. Dans le cas contraire (Figure 2.11), où l'arc avec le signe "-" devient consistant, on aura le noeud B comme l'origine de la défaillance.

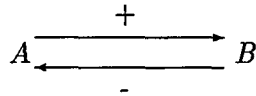


FIG. 2.9 - Boucle de rétroaction.



FIG. 2.10 - Modèles de cause à effet (boucle de rétroaction).



FIG. 2.11 - Modèles de cause à effet (boucle de rétroaction).

L'application de cette règle au graphe du procédé constituera le graphe général de cause à effet, où l'ensemble des modèles de cause à effet du système est pris en compte.

Le Tableau 2.1 présente l'ensemble des modèles de cause à effet qui peuvent être générés à partir des deux interprétations possibles de l'exemple de Kramer (Figures 2.4 et 2.5), lorsque un écart positif est attribué à la variable définissant le noeud A. La répétition des mêmes procédures au noeud A doté du signe "-", ainsi que pour les autres noeuds dont l'idée d'origine de défaillance est applicable, formera l'ensemble complet des modèles de cause à effet du système.

Le traitement de diagnostic consiste à appliquer, sur le graphe du système, les algorithmes pour la génération et l'essai des modèles de cause à effet, soit en temps réel (Iri et Aoki 1979), (Shiozaki et Matsuyama 1985), (Mohindra et Clark 1993), soit à partir d'un ensemble de règles, généré manuellement et interprété en temps réel (Kramer et Palowitch 1987). D'une manière simplifiée, un diagnostic est réalisé en comparant l'échantillon des états observés des variables mesurées avec les modèles de cause à effet possibles du système. Le diagnostic se termine quand il ne reste plus aucun modèle de cause à effet à essayer. Un diagnostic peut avoir, par conséquent, plusieurs solutions car, généralement, l'échantillon d'états observés peut se trouver parmi plusieurs modèles de cause à effet.

Interprétation 1					Interprétation 2				
A ⁺	C ⁰	D ⁰	F ⁰	G ⁰	A ⁺	C ⁰	D ⁰	F ⁰	G ⁰
A ⁺	C ⁺	D ⁰	F ⁰	G ⁰	A ⁺	C ⁺	D ⁰	F ⁰	G ⁰
A ⁺	C ⁺	D ⁺	F ⁰	G ⁰	A ⁺	C ⁺	D ⁺	F ⁰	G ⁰
A ⁺	C ⁰	D ⁰	F ⁺	G ⁰	A ⁺	C ⁺	D ⁺	F ⁻	G ⁰
A ⁺	C ⁰	D ⁰	F ⁺	G ⁺	A ⁺	C ⁺	D ⁺	F ⁻	G ⁻
A ⁺	C ⁺	D ⁰	F ⁺	G ⁰					
A ⁺	C ⁺	D ⁺	F ⁺	G ⁰					
A ⁺	C ⁺	D ⁰	F ⁺	G ⁺					
A ⁺	C ⁺	D ⁺	F ⁺	G ⁺					

TAB. 2.1 - Modèles de cause à effet.

2.1.2 Graphes d'événements

La formulation proposée par Finch Finch, Oyeleye, et Kramer (1990) est basée sur les graphes orientés et signés, en ajoutant de nouveaux aspects:

- chaque état qualitatif des variables est représenté par un noeud spécifique;
- tous les noeuds sont définis par des variables mesurées;
- les arcs ne sont pas signés, et leur représentation implique la considération des événements du passé;
- on ne se limite pas à la considération des états qualitatifs des variables, mais on représente aussi leurs tendances, l'état des équipements et les actions du personnel.

Le principe de base consiste en la décomposition de la représentation d'un graphe orienté et signé. Un noeud est décomposé en événements qui sont rapportés à des états qualitatifs différents. Cette décomposition mène à la représentation des modèles de cause à effet pour chacun de ces événements. Avec les graphes d'événements on peut, donc, représenter des modèles de cause à effet que la représentation avec les graphes orientés ne permet pas. On augmente les possibilités de représentation des contextes de dysfonctionnement du système.

En vue du diagnostic, des exemples de types d'événements, à prendre en considération dans la modélisation des procédés, sont parmi les suivants:

- les changements, au cours du temps, de l'état qualitatif des variables du procédé (p.e. la température était "normale" et maintenant est "élevée");
- les changements, au cours du temps, de la tendance au changement de la valeur d'une variable mesurée (p.e. "la tendance de la mesure de la concentration était de rester dans l'état stationnaire" et maintenant "tend à augmenter");
- les changements, au cours du temps, de l'état des équipements (p.e. "le capteur de niveau était en bon état" et maintenant est "en défaut");

- les changements, au cours du temps, de certaines "contraintes" (p.e. le bilan de matière était "satisfait" et maintenant est "violé-haut");
- les résultats des inspections adhoc;
- les actions initiées par le personnel des installations.

Considérons la représentation de la connaissance sur le fonctionnement d'un réservoir (Finch et al. 1990) (Figure 2.12) où le débit volumique à la sortie et la hauteur de fluide dans le réservoir sont mesurés. Les éléments illustrés dans la Figure 2.12 sont définis à partir des concepts suivants:

- (1) les noeuds sont définis par les états qualitatifs des variables mesurées (le débit volumique à la sortie et la hauteur de fluide);
- (2) les arcs sont définis par deux types de relations:
 1. des relations entre les états qualitatifs associés à deux variables différentes. Ces arcs représentent des relations de causalité
 2. des relations entre les états qualitatifs d'une même variable. Ces arcs ne représentent pas des causalités, mais l'apparition de l'événement.
- (3) les défauts des équipements sont attachés aux noeuds définis par les états qualitatifs des variables mesurées, et représentent des origines des défaillances;
- (4) des "conditions d'exception" sont attachées aux arcs du graphe.

Le diagnostic est réalisé en fonction de la vérification des conditions d'exception attachées aux arcs du graphe.

2.1.3 Modélisation à partir de règles de causalité

Les travaux menés par de Kleer et Brown (1984), (1985), Forbus (1984) et Kuipers (1986) présentent un autre courant d'idées pour la représentation des relations entre les variables du procédé. Réfléchissant la connaissance physique que l'on a du phénomène, ces travaux décrivent le système à partir d'un ensemble de variables d'états, et le processus causal sous-jacent comme un ensemble de relations entre les changements des variables. Dans la formulation proposées par de Kleer, les variables sont associées aux composants de l'installation, la description des composants donnant la causalité entre les variables et les connexions entre les composants décrivent la propagation des changements. Dans la représentation de Forbus les variables du système appartiennent au procédé qui décrit aussi les relations causales entre les changements de variables. Dans la formulation de Kuipers, les variables du procédé et leurs relations sont décrites simplement, sans aucune théorie particulière sur l'attribution des variables au procédé ou aux composants de l'installation.

La méthodologie proposée par Rich et Venkatasubramanian (1987), (1989), emploie la connexion d'une structure qui contient la représentation des liaisons physiques des

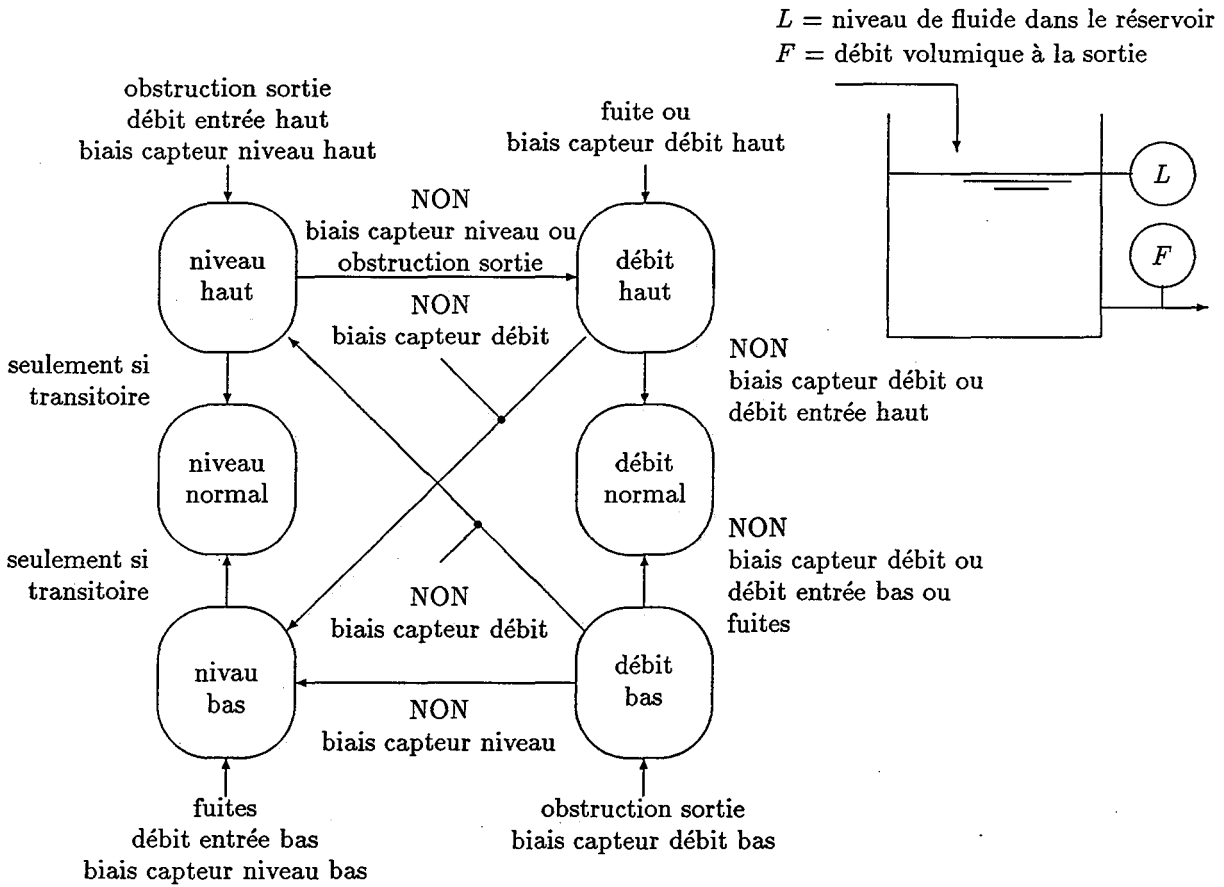


FIG. 2.12 - Graphe d'événements lors du dysfonctionnement d'un réservoir.

équipements des installations à une structure qui contient la représentation de certaines connaissances que l'on a des phénomènes physiques des procédés. Cette dernière structure décrit, sous la forme de règles, les "contraintes", les "équations de confluence" et les "modèles de défaillances" de chaque type d'équipement.

Rich propose une structuration des connaissances de façon à obtenir, durant l'établissement des diagnostics, des explications intuitives du raisonnement. Ainsi, un "raisonnement transparent" dans les systèmes experts peut être réalisé.

A chaque équipement du système est associée une structure d'informations, où les propriétés de l'équipement sont spécifiées. Cette structure contient la description des états qualitatifs des variables du procédé rapportées à l'équipement, les états de l'équipement, et les connexions physiques de l'équipement avec d'autres. Par exemple (Finch et al. 1990), au cours d'un diagnostic, la structure des propriétés d'un élément d'une installation, désigné par *courant 1*, peut se trouver dans la forme suivante:

Un ensemble de règles de production, définies à partir des lois physiques fondamentales, décrit les relations de causalité pouvant être établies entre les états qualitatifs des variables du procédé. Trois catégories de règles sont définies.

La première catégorie est désignée par les *contraintes*. Les contraintes représentent des

élément connecté à l'extrémité en amont de la conduite:	<i>vanne 1</i>
élément connecté à l'extrémité en aval de la conduite:	<i>réservoir 1</i>
débit volumique:	<i>bas</i>
pression:	<i>élevée</i>
température:	<i>normale</i>
conduite:	<i>obstruée</i>

restrictions physiques basées sur les principes de conservation de matière et d'énergie. Par exemple (Rich et Venkatasubramanian 1987), si une vanne fonctionne correctement et son ouverture est correct, le débit volumique à sa sortie doit être égal à celui à son entrée. La règle correspondant à cette contrainte prend la forme suivante:

SI <vanne> <état> est normal

ET <élément connecté en amont> <débit volumique> est <état établi>

ALORS <élément connecté en aval> <débit volumique> est <état établi>

où <vanne>, <état>, <état établi>, etc. sont des éléments, au sein des règles, pouvant supposer des valeurs rapportées à des instances spécifiques, telles que *vanne 1*, *ouverte*, *bas*, etc. dans l'ordre respectif. Dans le cas de l'application d'une contrainte à une pompe, par exemple, il est nécessaire que la pression à la sortie de la pompe soit supérieure à la pression à l'entrée de la pompe, à la condition que la pompe fonctionne correctement.

La deuxième catégorie de règles de production correspond aux *équations de confluence* (équations différentielles qualitatives (de Kleer 1985)). Ces équations représentent les influences entre les variables du procédé. Par exemple, si une vanne fonctionne correctement:

$$\frac{\Delta \text{débit volumique élément connecté en aval}}{\Delta \text{pression élément connecté en amont}} = +$$

ou aussi

$$\Delta \text{pression élément connecté en amont} - \Delta \text{débit volumique élément connecté en aval} = 0$$

où $\Delta \text{pression élément connecté en amont}$ et $\Delta \text{débit volumique élément connecté en aval}$ dénotent les signes des variables d'écart associées aux variables du procédé.

La règle correspondante est la suivante:

SI <vanne> <état> est normal

ET <élément connecté en amont> <pression> est <basse>

ALORS <élément connecté en aval> <débit volumique> est <bas>

La troisième catégorie de règles correspond à un répertoire de défaillances possibles, responsables des états qualitatifs x^+ et x^- associés aux variables du procédé. Par exemple un débit volumique bas, caractérisant l'état du fluide associé à un courant, peut être causé par:

- la rupture ou le blocage de la conduite;

- lorsqu'une vanne est connectée en amont:
 1. la vanne est fermée ou bloquée;
 2. l'ouverture de la vanne est correcte et la pression à l'entrée de la vanne est basse;
 3. l'ouverture de la vanne est correcte et le débit volumique d'un courant connecté en amont est basse.
- lorsqu'une pompe est connectée en amont:
 1. la pompe est en arrêt;
 2. la pompe est en défaut;
 3. la pompe fonctionne correctement et la pression d'un courant en amont est basse.
- une vanne fermée, connectée en aval;
- une pompe en défaut, connectée en aval.

Les connaissances ci-dessus peuvent être utilisées, par exemple, à partir de la règle suivante:

SI <courant> <débit> est bas
 ET <courant> <débit volumique> <état> est demandé
 ET il y a <vanne> connecté en amont de <courant>
 ET <vanne> <état> est méconnu
 ALORS demander à l'utilisateur de vérifier l'état de <vanne>

Alors si, lors d'un diagnostic, l'opérateur trouve la vanne fermée, la règle suivante se déclenche:

SI <courant> <débit volumique> est bas
 ET il y a <vanne> connecté en amont de <courant>
 ET <vanne> <état> est fermé
 ALORS <courant> <débit volumique> <état> est établi

Ces règles étant appliquées, les valeurs des propriétés des équipements se modifient, en entraînant l'application d'autres règles.

Le diagnostic est basé sur la stratégie classique (Pearl 1984) de réduction du problème. Le problème de l'identification des causes originelles des défaillances est décomposé en ensembles de problèmes plus simples, jusqu'à l'identification des causes locales. La forme de la démarche de recherche de la solution peut se représenter par un arbre ET/OU, où les noeuds sont définis par les états qualitatifs attribués aux variables du procédé et, les arcs par les relations causales établies à partir des règles.

Dans cette démarche, chaque noeud de l'arbre (chaque sous problème) est *résolu* si:

1. Le noeud est terminal; situation dont le problème est attribué à l'événement primaire (les causes locales), tel que le blocage d'une conduite.

2. Le noeud est non-terminal et ne contient que des successeurs liés par des connexions OU. Dans ce cas, au moins un des noeuds successeurs doit être résolu.
3. Le noeud est non-terminal et ne contient que des successeurs liés par des connexions ET. Dans ce cas, tous les noeuds successeurs doivent être résolus.

Par ailleurs, un noeud n'a pas une solution si:

1. Le noeud est non-terminal, et ne contient aucun successeur.
2. Le noeud est non-terminal, ne contient que des successeurs liés par des connexions OU, et tous les noeuds successeurs n'ont pas une solution.
3. Le noeud est non-terminal, ne contient que des successeurs liés par des connexions ET, et au moins un des successeurs n'a pas une solution.

La Figure 2.13 illustre la démarche d'un diagnostic d'un système simple (Rich et Venkatasubramanian 1987).

2.2 Représentations hiérarchiques

Une autre manière de structurer les connaissances est de rassembler les variables du procédé autour d'hypothèses structurées dans une hiérarchie préétablie. La hiérarchisation des hypothèses permet l'application d'un processus de classification, dont on se sert pour extraire un raisonnement qui part des hypothèses générales vers des hypothèses concernant des problèmes plus spécifiques. Cette approche, selon Shum et Davis (1988), Ramesh et Davis (1992), Chen et Modarres (1992), Chandrasekaran (1986), Noorsaman et Papastratos (1992), correspond à une démarche naturelle du raisonnement de diagnostic. L'avantage principal des approches hiérarchiques est justement de permettre une représentation "naturelle" des connaissances, réfléchissant la démarche dont successivement les spécialistes imaginent et "réduisent" les contextes des dysfonctionnements à partir de l'interprétation des données disponibles (Rasmussen 1985).

Le processus de diagnostic chez le personnel indique que le raisonnement basé sur les modèles quantitatifs n'est pas utilisé tout d'abord par les spécialistes. Au début de la vérification des anomalies, les spécialistes se servent de considérations qualitatives, extériorisées sous la forme de connaissances "compilées", et structurées sur la forme de règles. En faisant appel à ces connaissances, souvent le spécialiste est capable de résoudre le problème ou, dans des situations moins favorables, de restreindre considérablement le problème.

Par ailleurs, les connaissances quantitatives sont indispensables lors d'un échec. Le spécialiste applique ce type de connaissance en associant le problème à une partie des installations, de manière à pouvoir faire converger son raisonnement vers une solution finale. Alors, d'une façon générale, on peut décomposer la connaissance sous la forme d'hypothèses intermédiaires et structurer ces dernières de manière à établir une démarche d'investigation progressive de l'origine du dysfonctionnement.

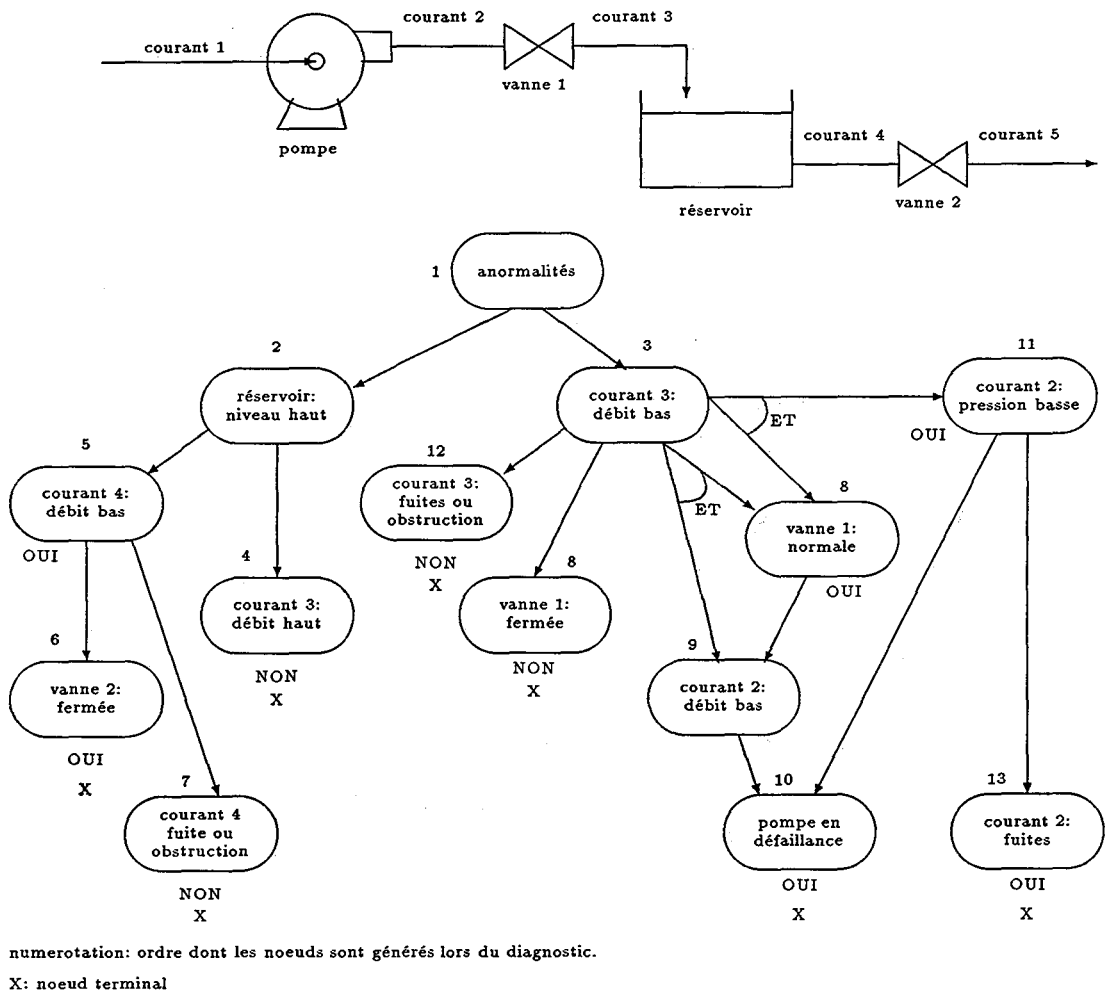


FIG. 2.13 - Séquence de diagnostic (d'après Rich).

L'assemblage des hypothèses au sein d'une structure hiérarchique peut refléter les connaissances théoriques du système, dans la mesure où on essaye de représenter préalablement la démarche dont se servent les spécialistes au cours de leur analyse des problèmes.

Ainsi, les connaissances sont représentées en intégrant deux critères de raisonnement:

- la représentation de connaissance "compilée" (basée sur des règles, probabilistique)
- la représentation de la connaissance théorique du procédé.

Le premier point ci-dessus correspond à la manière dont le raisonnement est structuré, en utilisant la vérification de l'état de certaines variables (symptômes) pour refuser ou préférer certaines hypothèses. Ces connaissances sont représentées sous la forme de règles ou de probabilités qui associent la vraisemblance des symptômes face aux hypothèses.

Le deuxième point correspond à l'ordre d'examen des hypothèses, du général vers le détaillé. Ces connaissances sont représentées au sein d'une structure hiérarchique, où les noeuds représentent les hypothèses. Un diagnostic commence, théoriquement, avec

la considération d'hypothèses concernant des ensembles larges de l'installation. Lorsque l'état de certaines variables (symptômes) nous permet d'établir une (ou plus d'une) de ces hypothèses, le processus de diagnostic continue, en exploitant les hypothèses inférieures de la hiérarchie, concernant les équipements. Dans le cas où l'hypothèse est refusée ou a une faible probabilité, toute une portion des installations sera mise de côté, et la vérification d'autres hypothèses, relatives à d'autres portions, sera essayée. Cette construction hiérarchique nous permet de conduire les décisions à partir d'un degré de généralité vers un degré de détail.

Un aspect important à prendre en compte, lors des représentations hiérarchiques, est rapporté à l'indépendance décisionnelle concernant une hypothèse. Chaque noeud doit être indépendant, au sens que les connaissances qui lui sont associées doivent être suffisantes pour établir ou refuser l'hypothèse concernant le noeud et, ainsi, transmettre le résultat des décisions aux noeuds voisins. Cette configuration correspond à une communauté de spécialistes (Chandrasekaran 1986), qui se coordonnent pour arriver à une décision générale sur les problèmes observés. Dès qu'une conclusion est établie sur l'hypothèse, le contrôle du processus décisionnel est transmis aux noeuds successeurs, jusqu'à arriver à un noeud final. Ce noeud final constitue l'hypothèse plus spécifique du problème en question, ce qui, d'un point de vue organisationnel, représente un avantage économique en faveur des organisations hiérarchiques.

Dans cette approche, des connaissances "déclaratives" et "procédurales" sont intégrées. Le mécanisme d'inférence est intégré dans la structure de la base de connaissances, puisque la hiérarchie des hypothèses est associée autant à l'organisation des connaissances qu'à la stratégie de résolution. Chaque noeud détient son autonomie pour la résolution locale du problème, de telle sorte qu'on peut trouver dans la structure des connaissances les spécifications de la façon dont les noeuds exécutent leurs décisions amenant à une solution globale.

La structure hiérarchique traduit la démarche de la construction de la base de connaissances. Ainsi, chaque noeud peut être modifié indépendamment des autres, puisque les stratégies d'inférence ne changent pas. La hiérarchie fonctionne comme un moyen de coordination des "spécialistes" et reste indépendante des mécanismes de raisonnement utilisés par les spécialistes lors de la sélection des hypothèses.

Nous nous limiterons à la présentation de deux formulations considérées comme les plus adaptées à notre problématique. Elles proposent:

- la représentation des connaissances au sein d'une hiérarchie d'hypothèses de dysfonctionnements (Shum et Davis 1988), (Ramesh et Davis 1992), en utilisant des règles ainsi qu'un mécanisme d'abduction et déduction pour l'évaluation et la sélection des hypothèses;
- la représentation des connaissances au sein d'une hiérarchie d'objectifs (Chen et Modarres 1992), en utilisant une méthodologie bayésienne (Pearl 1988) pour la sélection des hypothèses.

2.2.1 Hiérarchie de dysfonctionnements

Cette approche, dite "orientée-tâches" (Chandrasekaran 1986), postule que le raisonnement de diagnostic peut être représenté, d'un point de vue informatique, par l'intégration d'un petit nombre de tâches concernant des processus informationnels génériques. Chacune de ces tâches concerne une classe de problème à résoudre, et traduit, soit la manière dont les connaissances sont représentées, soit le mécanisme d'inférence spécifique à la résolution des problèmes. Deux tâches fondamentales sont identifiées:

- la tâche de "classification",
- le "mécanisme d'abduction et déduction".

La tâche de classification concerne le processus de sélection, dans un ensemble, de l'hypothèse qui s'applique le mieux à résoudre le problème. Le mécanisme d'abduction et déduction comprend l'élaboration d'une explication concernant la confrontation d'un ensemble d'hypothèses relatives à l'état des variables du procédé, non mesurées, et d'un ensemble de données observables (par exemple, concernant la qualité des produits). L'explication est recherchée de manière à obtenir des correspondances logiquement plausibles entre les hypothèses et les données observables (Figure 2.14).

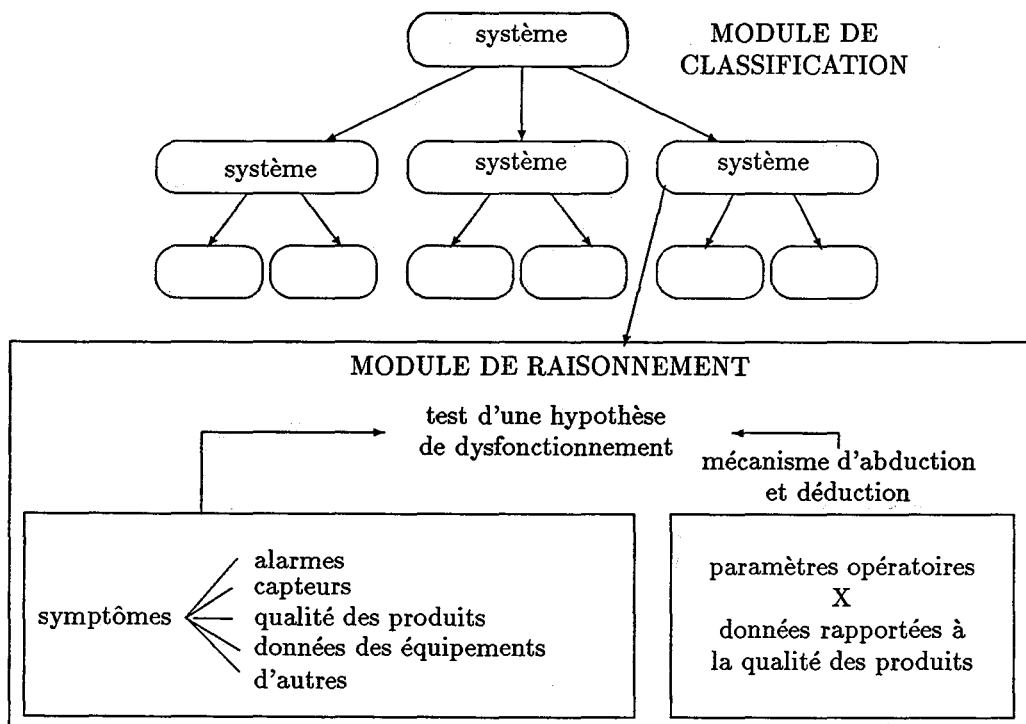


FIG. 2.14 - Hiérarchie de dysfonctionnements – schéma général des "tâches" (CatCracker [Ramesh, 1992]).

Classification

La tâche de classification dirige la sélection des hypothèses, et joue le rôle principal au sein d'une représentation basée sur une hiérarchie de dysfonctionnements. En fait, cette tâche consiste en une méthode qui s'appuie sur le principe qu'il est plus simple d'évaluer des catégories d'hypothèses que de prendre les hypothèses individuellement l'une après l'autre. On essaye de réunir les hypothèses en catégories (de dysfonctionnements), en formant une structure hiérarchique. Du point de vue du traitement informatique, on aurait avantage à pouvoir ne pas prendre en compte les groupes d'hypothèses n'ayant pas d'importance face à leurs symptômes (ou leurs conséquences) et, donc, à pouvoir éliminer les catégories inférieures de la hiérarchie.

Dès qu'une catégorie de dysfonctionnements est évaluée positivement, leurs sous-catégories seront examinées, en réduisant l'espace des possibilités. Les hypothèses plus spécifiques constituent la conclusion finale du diagnostic. L'évaluation de chaque catégorie (de chaque hypothèse de la hiérarchie) est effectuée en considérant un ensemble de symptômes représentatifs de la catégorie, lesquels aident à confirmer ou à refuser l'hypothèse.

La tâche de classification est calquée sur l'organisation des connaissances. La hiérarchie représente des niveaux d'abstraction, et exprime la façon naturelle de représenter le procédé à partir de sa décomposition fonctionnelle (Chandrasekaran 1994). Cette représentation est possible en considérant la correspondance entre la hiérarchie du fonctionnement normal du système et son dysfonctionnement.

A chaque noeud de la structure hiérarchique est associé un module de raisonnement qui a pour objectif d'établir ou de refuser l'hypothèse en se servant de l'interprétation des données contenues dans les règles.

Abduction et déduction

Souvent l'interprétation des données contenues dans les règles doit être exécutée à partir de l'interprétation d'un ensemble d'autres données qui expriment des états plus généraux du système. Cela a lieu dans les situations où, parmi les variables présentes dans les règles, certaines ne sont pas mesurées (l'évaluation de l'état de toutes les variables n'est pas possible). Alors, à partir d'autres données concernant le procédé, et en se servant du mécanisme d'abduction et déduction, des évidences peuvent être établies. Normalement, cette situation comprend la prise en compte à la fois d'un ensemble de variables non mesurées, et qui sont présentes dans les règles, et d'un ensemble de faits observables sur le procédé (Ramesh et Davis 1992).

Charpillat et Haton (1992) fournit une description informelle du mécanisme pour l'interprétation de données par abduction et déduction:

“ Dans cette approche, on essaye de prendre en compte à la fois les contraintes et les évidences induites par les données. Pour les exploiter, deux schémas de raisonnement sont requis: l'*abduction* et la *déduction*. L'*abduction* permet de suggérer des modèles qui rendent compte de tout ou partie des données observées. La *déduction* permet d'éliminer de manière valide les modèles qui sont incompatibles avec l'ensemble des données observées. Considérons un exemple d'école mettant en jeu trois modèles m_1 , m_2 , m_3 et quatre données d_1 , d_2 , d_3 et d_4 . Soit

$$\begin{aligned} &\{(m_1 \Rightarrow (d_1 \wedge d_2)), \\ &(m_2 \Rightarrow (d_1 \wedge \neg d_2 \wedge d_3)), \end{aligned}$$

$$(m3 \Rightarrow (d1 \wedge d4))\}$$

la connaissance liant données et modèles.

Supposons maintenant que les données observées (et à interpréter) soient $d1$, $d2$ et $d3$. Dans ce cas:

- trois modèles, $m1$, $m2$ et $m3$ rendent compte abductivement de $d1$,
- le modèle $m1$ rend compte abductivement de $d1$ et de $d2$,
- le modèle $m2$ rend compte abductivement de $d1$ et de $d3$.

A cette étape, si l'on utilise une approche abductive pure, des critères de préférence doivent être utilisés pour caractériser les meilleurs modèles parmi tous les modèles abductifs possibles. Par exemple, les modèles abductifs les plus simples qui rendent compte d'autant de données que possible sont préférés. Ainsi, dans l'exemple précédent, il n'y a aucun moyen abductif de préférer un des deux modèles $m1$ ou $m2$ en s'appuyant sur cette définition puisque tous deux rendent compte de deux sous-ensembles de données observées maximaux pour l'inclusion ensembliste et puisque tous deux sont également simples *a priori*. Il est donc nécessaire, dans une approche abductive pure, de rechercher de nouvelles données pour effectuer un choix parmi les modèles en compétition. Cependant, un tel travail est totalement inutile ici: par *déduction*, on peut prouver que $m2$ n'est pas le modèle rendant compte des données observées puisqu'il n'est pas compatible avec $d2$. En résumé, l'approche consiste à:

Abduction: calculer les modèles qui rendent compte abductivement de tout ou partie des données observées, et sélectionner les meilleurs d'abord.

Déduction: éliminer les modèles abductifs incompatibles avec l'ensemble complet des données observées."

2.2.2 Hiérarchie d'objectifs

La représentation des connaissances basée sur une hiérarchie d'objectifs utilise une construction permettant l'application du théorème de Bayes. Ainsi, hypothèses et symptômes sont liés par des associations probabilistiques, exprimant la plausibilité des hypothèses par rapport aux symptômes (données observables) disponibles. Ce sont des associations que les spécialistes sont capables d'établir selon leur expérience passée. La hiérarchie d'objectifs essaye alors de résumer cette expérience, reproduisant le processus sur lequel les spécialistes diminuent l'incertitude en décomposant les hypothèses générales en hypothèses plus détaillées. Le diagnostic se fait en fonction de la vraisemblance que certains symptômes présentent face à certains groupes d'hypothèses.

Les travaux de Chen et Modarres (1992) utilisent cette approche pour la conception d'un système spécialiste pour le diagnostic de défaillances, adaptant la méthode bayésienne d'inférence à une décomposition hiérarchique des objectifs du système. Cette décomposition hiérarchique correspond à la représentation des connaissances théoriques du système.

Les connaissances "compilées", nécessaires au traitement du diagnostic, sont représentées sous la forme des relations probabilistiques entre hypothèses et symptômes de dysfonctionnement. Les hypothèses sont rapportées à la non réalisation des objectifs. Ainsi,

on peut conduire l'attention vers les échecs des objectifs qui semblent les plus probables face aux symptômes observés.

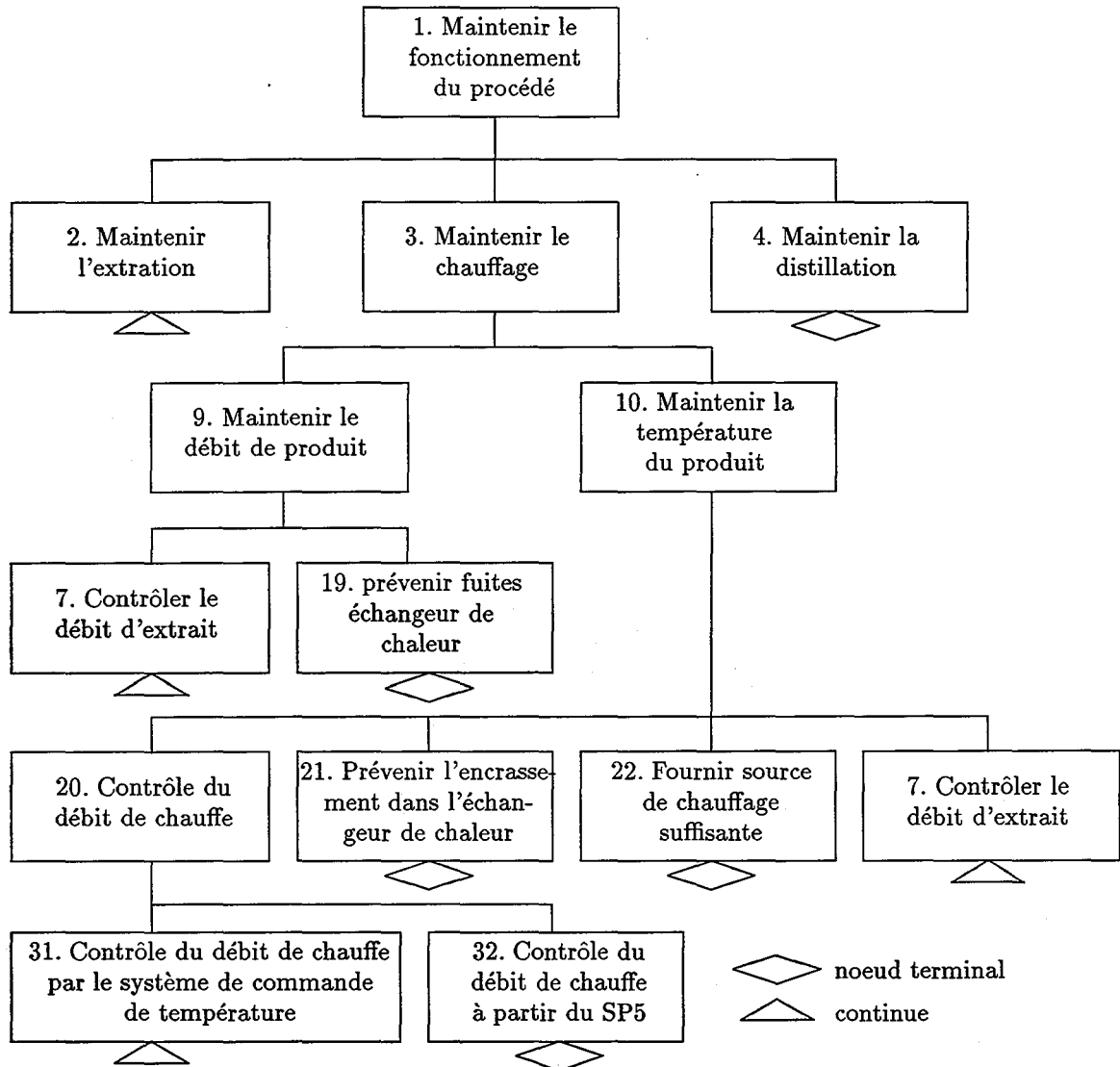


FIG. 2.15 - Hiérarchie d'objectifs (d'après FAX [Chen, 1992]).

La décomposition du système selon la réalisation d'objectifs fixés part de l'idée d'obtenir une représentation qui rende compte simultanément de l'identification du problème (diagnostic) et des stratégies pour l'application des actions correctives. Pour le faire, on prend en compte l'ordre dans lequel les sous-objectifs peuvent être exploités. Dans cette approche hiérarchique, chaque fois qu'un sous-problème est établi, plusieurs objectifs sont imaginés et, pour ceux-ci, un ordre de priorité est retenu. Cette façon d'analyser et de décomposer les problèmes est présentée par Douglas (1985), envisageant la conception d'une méthode efficace pour la conception économique des procédés.

Par ailleurs, les actions de commande (Rasmussen 1985) sont calquées surtout sur

les connaissances, détenues par les opérateurs, de comment et pourquoi les sous objectifs du système doivent être ordonnés et exploités. Ces connaissances comprennent l'utilisation mentale d'une hiérarchie d'abstractions, où les activités de supervision concernant le maintien du fonctionnement normal du système sont imaginées. Dans ce cadre, les états de dysfonctionnement ne peuvent être définis que par rapport aux objectifs retenus durant la conception du système. Considérant que les causes des dysfonctionnements sont trouvées du bas vers le haut de la hiérarchie, et que les raisons du bon fonctionnement sont dérivées en décomposant les objectifs du système (du haut vers le bas), ces deux aspects apparaissent naturellement conjugués au sein d'une démarche de supervision et de diagnostic.

L'efficacité du diagnostic et des actions correctives subséquentes dépend, donc, de l'ordre dans lequel les objectifs sont exploités (du haut vers le bas), prenant en compte les causes possibles du dysfonctionnement (du bas vers le haut). Dans cette perspective, la correction d'un dysfonctionnement dépend des connaissances du fonctionnement normal du système et de sa traduction aux scénarios de dysfonctionnement possibles.

La structure des objectifs

La structure est définie à partir des objectifs généraux du procédé. Chen recommande la procédure suivante:

- un objectif étant fixé, il doit être possible de définir, à partir de la définition d'autres objectifs placés dans les niveaux hiérarchiques inférieurs, *comment* cet objectif est réalisé;
- un objectif étant donné, il doit être possible de définir, en fonction des objectifs placés dans les niveaux supérieurs de la structure, *pourquoi* l'objectif en question doit être réalisé.

La structure résultante de l'application de ces règles est arbitraire, mais cohérente par rapport aux relations entre les noeuds. Les aspects des objectifs, rapportés au "comment" et au "pourquoi", sont représentés d'une manière implicite, en fonction de la composition des niveaux d'abstraction. Au sein de la hiérarchie on représente seulement les objectifs assurants du fonctionnement normal du système. La Figure 2.15 présente un exemple extrait de Chen et Modarres (1992) (système FAX).

Le mécanisme bayésien d'inférence

A chaque noeud de la hiérarchie d'objectifs est associée une structure de données contenant les éléments nécessaires pour l'application des règles de la théorie des probabilités. En fait, cette structure consiste en un module de connaissances, et contient les groupes de données suivants:

- (1) les symptômes associés à chaque noeud;
- (2) les noeuds "descendants" du noeud en question (les sous-objectifs);
- (3) les données correspondant aux estimations à utiliser dans les règles de la théorie des probabilités.

La technique bayésienne est rapporté à la formule de Bayes:

$$P(H | e) = \frac{P(e | H)P(H)}{P(e)} \quad (2.1)$$

où la croyance qu'on peut accorder à l'hypothèse H face à une évidence e peut être obtenue par la multiplication de notre croyance préalable $P(H)$ par la vraisemblance $P(e | H)$.

$P(e | H)$ exprime la possibilité de réalisation de e , H étant vraie. $P(H | e)$ est appelée la probabilité *a posteriori* et $P(H)$ la probabilité *a priori*. Le dénominateur $P(e)$ consiste en une constante de normalisation $P(e) = P(e | H)P(H) + P(e | \neg H)P(\neg H)$, ce qui fait que $P(H | e) + P(\neg H | e) = 1$.

L'équation (2.1) est interprétée comme une *règle normative* (Pearl 1988) pour l'actualisation des croyances face aux évidences. La formule de Bayes nous permet d'exprimer la quantité $P(H | e)$ comme une fonction de quantités qui peuvent être obtenues à partir de nos connaissances empiriques.

L'expression directe de $P(H | e)$ — souvent difficile à estimer — devient alors une tâche relativement simple. La règle de Bayes énonce que la force de notre croyance en une hypothèse H , basée autant sur un ensemble de connaissances préalables C que sur une évidence e , doit être le produit de deux facteurs: la probabilité *a priori* $P(H)$ et la vraisemblance $P(e | H)$. Le premier facteur mesure le support *prédictif* ou *prospectif* accordé à H par l'ensemble des connaissances préalables seul, tandis que le second représente le support de *diagnostic* ou *rétrospectif* attribué à H par l'évidence réellement observée. Alors, la vraisemblance $P(e | H)$ dépend du contenu des connaissances disponibles sur C .

L'avantage des techniques bayésiennes vient du fait que sur un raisonnement causal la relation $P(e | H)$ est locale, c'est-à-dire que, une fois que H est vraie, la probabilité de e peut être estimée naturellement et ne dépend pas d'autres propositions de l'ensemble des connaissances C . Par exemple, si on établit qu'un patient souffre d'une maladie H , il sera naturel d'estimer qu'il y aura une probabilité qu'il développe un symptôme e . L'organisation des connaissances médicales repose sur le paradigme qu'un symptôme est une caractéristique de la maladie et, par conséquent, ne dépend pas d'autres facteurs tels que des épidémies, des maladies préalables ou des équipements de diagnostic défaillants.

Lorsque l'hypothèse H comprend un ensemble d'états possibles H_i associés à une évidence spécifique e , on peut réécrire l'équation (2.1) sous la forme:

$$P(H_i | e) = \frac{P(H_i)P(e | H_i)}{\sum_{j=1}^n P(H_j)P(e | H_j)} \quad (2.2)$$

avec

- n = nombre de sous objectifs de l'objectif sous investigation
- H_i = chaque hypothèse d'échec du sous-objectif dont on calcule la probabilité *a posteriori*
- H_j = hypothèse d'échec de chacun des sous-objectifs
- e = symptôme, associé aux hypothèses d'échec des sous-objectifs de l'objectif sous investigation

Appliquée à la structure d'objectifs, H est associée à l'échec de l'objectif sous investigation; H_i est associée à l'échec de chacun des sous-objectifs de l'objectif sous investigation;

et e constitue un symptôme associé à H à partir duquel on peut estimer les probabilités *a posteriori* $P(H_i | e)$ des états possibles de H (l'ensemble des échecs des sous-objectifs). La Figure 2.16 illustre les relations entre les hypothèses et les évidences (sous-objectifs — objectif sous investigation — symptômes) lors de l'investigation des noeuds par le mécanisme d'inférence.

Si on a plus d'un symptôme associé à l'échec de l'objectif sous investigation, l'équation (2.2) prend la forme (Pearl 1988):

$$P(H_i | e^1, e^2, \dots, e^N) = \frac{P(H_i) \prod_{k=1}^N P(e^k | H_i)}{\sum_{j=1}^n P(H_j) \prod_{k=1}^N P(e^k | H_j)} \quad (2.3)$$

où N correspond au nombre de symptômes à partir desquels on peut estimer les probabilités *a posteriori* de l'échec de chacun des sous objectifs.

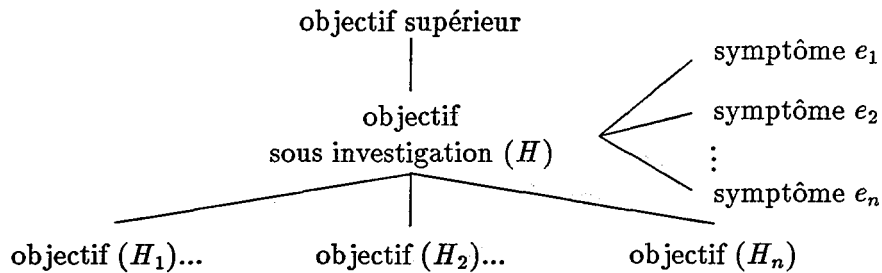


FIG. 2.16 - Structuration des hypothèses et des évidences.

Pour illustrer l'application du concept, reprenons l'exemple de Chen (Figure 2.15). Considérons le noeud numéro 10. D'après Chen et Modarres (1992), les données associées au noeud 10 sont, essentiellement, les suivantes:

nom de l'objectif:	objectif 10
description:	"maintenir la température du produit"
sous objectifs:	(obj. 7, obj. 20, obj. 21, obj. 22)
probabilité <i>a posteriori</i> $P(H e)$:	0,0
état:	SUCCESS
symptômes e^k :	(bilan d'énergie violé autour de l'échangeur HX1 (HX1-ENG-BIL-V); dérive de la température T4; flux de chaleur F9 présent; débit de produit anormal)
probabilités <i>a priori</i> $P(H_i)$:	(0,29; 0,36; 0,07; 0,28)
vraisemblances $P(e^k H_i)$:	((0,05; 0,05; 1,0; 0,05); (0,05; 1,0; 0,2; 1,0); (0,05; 0,05; 0,05; 1,0); (1,0; 0,05; 0,05; 0,05))

Le but étant d'obtenir les probabilités *a posteriori* de l'échec de chacun des sous-objectifs, sur cette structure:

1. L'objectif 10 est l'objectif sous investigation. Son état présente la valeur "succès"

Valeurs de la vraisemblance	Explication (à partir de l'échec de l'objectif)
1,0	L'observation de l'évidence est sûre
0,8	L'observation de l'évidence est probable.
1,0	L'évidence peut ou ne peut pas être observée.
1,0	L'observation de l'évidence n'est pas probable.
1,0	L'observation de l'évidence n'est pas rapportée à l'échec de l'objectif.
1,0	L'observation de l'évidence est incompatible avec l'échec de l'objectif.

TAB. 2.2 - Guide pour l'estimation des valeurs des vraisemblances.

parce que le diagnostic commence à partir de ce noeud et, par conséquent, aucune probabilité *a posteriori* ne lui a été associée.

2. Quatre symptômes sont associés au noeud sous investigation. Ces symptômes constituent des évidences pour l'évaluation des hypothèses correspondant à l'échec des sous-objectifs (noeuds 7, 20, 21 et 22).
3. Les quatre probabilités *a priori* correspondent aux probabilités *a priori* associées à l'échec de chacun des sous-objectifs. Ces probabilités sont estimées préalablement à partir des connaissances empiriques des taux de défaillances de chacun des sous-objectifs. Ce sont, par conséquent, des données permanentes de la base de connaissances.
4. Les quatre ensembles de valeurs de vraisemblance contiennent les valeurs de croyance qu'on attribue à chacune des hypothèses d'échec des sous-objectifs face aux évidences correspondant aux quatre symptômes, dans l'ordre respectif. Par exemple, les valeurs (0,05; 0,05; 1,0; 0,05) correspondent, respectivement, aux vraisemblances $P(\text{HX1-ENG-BIL-V} \mid \text{échec noeud 7})$, $P(\text{HX1-ENG-BIL-V} \mid \text{échec noeud 20})$, $P(\text{HX1-ENG-BIL-V} \mid \text{échec noeud 21})$ et $P(\text{HX1-ENG-BIL-V} \mid \text{échec noeud 22})$. Celles-ci sont des données empiriques, estimées préalablement par les spécialistes. Chen et Modarres (1992) présente un "guide" pour l'estimation des vraisemblances, que nous reproduisons dans le Tableau 2.2.

Considérons, alors, que seulement le symptôme "bilan d'énergie violé autour de l'échangeur HX1" est observé. Il faut, donc, obtenir les probabilités *a posteriori* de l'échec des sous-objectifs $P(H \mid e)$. Pour cela, on applique l'équation (2.3) et on obtient:

$$\text{noeud 7: } P(H \mid e) = 0,12$$

$$\text{noeud 10: } P(H \mid e) = 0,15$$

$$\text{noeud 21: } P(H \mid e) = 0,61$$

$$\text{noeud 22: } P(H \mid e) = 0,12$$

Ces valeurs remplaceront les valeurs de "probabilité *a posteriori*", respectivement, dans la structure de données associée aux noeuds 7, 20, 21 et 22. Ainsi, les probabilités *a posteriori* de l'échec des sous objectifs sont actualisées, permettant la continuation du diagnostic. Du fait que le noeud 21 présente la plus haute valeur de probabilité, il sera le premier à être examiné.

A partir du mécanisme bayésien d'inférence, les relations entre un ensemble d'évidences et un ensemble d'hypothèses sont établies. Le diagnostic est possible grâce aux connaissances préalables des valeurs des probabilités $P(e | H)$ (vraisemblances) et des probabilités *a priori* $P(H)$ (les taux de défaillances), lesquelles sont indépendantes du processus d'inférence lui-même.

Cependant, une telle application est seulement possible si l'on dispose d'une structure d'hypothèses appropriée, de façon à pouvoir établir autant les probabilités *a posteriori* que les probabilités *a priori*. Dans le cas présent, ces relations sont possibles grâce à l'hypothèse intermédiaire (dans l'exemple, l'objectif 10) entre les symptômes et les hypothèses associées aux sous-objectifs; l'hypothèse intermédiaire fonctionne comme un point d'appui pour l'établissement des relations et, par conséquent, conduit le raisonnement du haut vers le bas de la hiérarchie.

L'aspect fondamental à considérer est donc la détermination de la structure liant les hypothèses et les symptômes. La conception de la structure hiérarchique d'objectifs réfléchit la conception du système, les modélisateurs se mettant à la place des concepteurs. L'aspect fondamental de ce type de représentation est qu'elle permet, dans une situation pratique, d'associer des hypothèses représentées sur plusieurs niveaux d'abstraction, et liées par les relations exprimant le fonctionnement souhaité du procédé. Les inférences sont plausibles grâce aux connaissances causales qui sont implicites à la représentation de la hiérarchie: la structure qui lie un objectif aux sous objectifs décrit comment les sous-objectifs se composent pour "satisfaire" l'objectif "père". Ainsi, à chaque hypothèse d'échec ou de succès de l'objectif on peut associer les données (symptômes) respectifs au niveau de généralité (ou de détail) du problème à résoudre.

La règle normative du mécanisme d'inférence réfléchit la démarche déterministe de la conception du système — elle exploite les relations qu'on suppose avoir été prévues durant la conception du système. L'utilisation du mécanisme d'inférence basé sur la règle de Bayes présuppose donc une structure d'hypothèses élaborée à partir de la *compréhension* du fonctionnement et de la conception du système.

2.3 Conclusions

L'habileté de celui qui utilise autant les informations prédictives que les informations extraites d'un diagnostic constitue une composante très importante du raisonnement plausible (Pearl 1988).

L'analyse du discours courant nous présente le comportement qu'on qualifie de raisonnement "abductif": si A implique B, alors trouver la vérité de B augmente la crédibilité de A. Ce comportement implique un raisonnement qui est fait dans les deux sens, de A à B et de B à A. L'homme, en général, ne se trompe pas dans ces situations, apparemment parce qu'il n'a pas besoin de recourir à deux règles différentes pour exécuter ces inférences. Par exemple, si on prend comme première règle la phrase "la présence de feu implique la vérification de fumée", on ne trouve aucun problème pour invoquer une deuxième phrase "la présence de fumée augmente la crédibilité sur la présence de feu".

Lors d'un diagnostic, la deuxième règle est utilisée. Toutefois, comme l'application de la première règle dépend de la manière dont les connaissances sont représentées, on peut

se trouver dans des situations où celle-ci doit être enlevée du modèle. Suivant le modèle, on peut créer un cycle où quelque évidence en faveur de la vérification de A sera amplifiée via B et renvoyée de retour à A, en amenant à une confirmation renforcée autant de A que de B – sans aucune vérification factuelle convaincante.

Cependant, l'élimination de l'élément prédictif empêche le système d'exprimer un autre comportement du raisonnement plausible, qui est ce qu'on appelle "l'explication". Si A implique B, C implique B et B est vrai, alors trouver la vérité de C diminue la crédibilité de A. En résumé, on diminue la crédibilité d'une première explication en trouvant une deuxième explication pour le même fait.

Les solutions pour ces problèmes sont recherchées dans les représentations de la connaissance pour le diagnostic présentées. Les "graphes causaux", fondés sur la représentation des relations de cause à effet entre les variables du procédé, privilégient l'aspect prédictif du raisonnement, en présentant des problèmes concernant les résultats du diagnostic. Les hypothèses sélectionnées (et donc les explications) n'ont souvent aucun rapport avec les situations réelles.

La représentation des connaissances à partir d'une "hiérarchie de dysfonctionnements" est faite en fonction de l'exécution des tâches d'inférence, ce qui empêche l'explicitation des relations causales.

Par ailleurs, le traitement de ces questions est facilité lorsque la connaissance est représentée en fonction des objectifs fixés pour les installations. Dans cette approche, les variables du procédé sont prises en compte à partir des relations entre les activités menant à l'obtention des résultats souhaités. L'organisation de ces activités étant connue, il est possible d'établir un ordre de causalité entre les hypothèses. Lorsque les relations entre les hypothèses traduisent des circonstances de dysfonctionnement indépendantes, les deux comportements du raisonnement plausible peuvent être modélisés et utilisés sans conflit.

Dans les chapitres qui suivent, nous recherchons une méthodologie permettant la représentation explicite des relations entre les hypothèses.

Chapitre 3

Acquisition des connaissances du fonctionnement des systèmes industriels

La maîtrise du flux d'information illustré dans la Figure 3.1 ci-dessous constitue un facteur majeur de compétitivité pour une entreprise (Asbjornsen 1986). Il concerne autant les domaines techniques généraux que le cas particulier de la supervision des procédés. L'acquisition de l'expérience industrielle dépend donc d'un processus dynamique d'acquisition des connaissances et de leur formalisation.

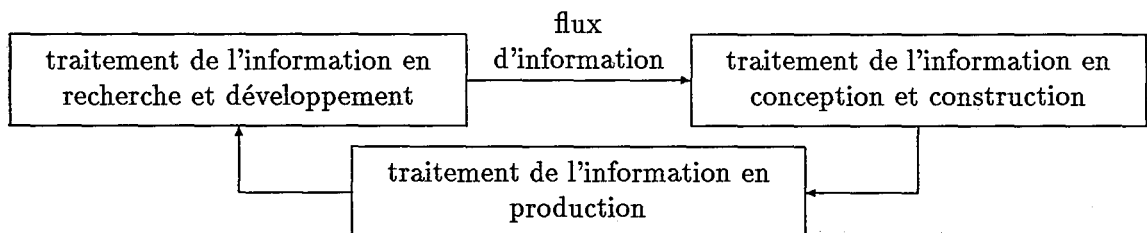


FIG. 3.1 - Flux d'information lors de l'acquisition de l'expérience industrielle.

Ces connaissances sont souvent rapportées à celles sur lesquelles un modèle mathématique, contenant la description du comportement statique ou dynamique d'un système, est fondé. Elles sont utilisées par les spécialistes autant dans la spécification des installations, de manière à réaliser les objectifs fixés, que dans la résolution des problèmes liés à la non obtention des résultats lors des dysfonctionnements. Dans cette perspective, les possibilités d'utilisation des connaissances modélisées dépendent du rôle attribué aux spécialistes et au modèle permettant le diagnostic.

3.1 Système industriel

Le terme système est susceptible d'avoir plusieurs formes d'interprétation et d'usage. Dans l'industrie, il est souvent associé aux systèmes informatiques et de contrôle. Toutefois, ce terme a une signification générale bien définie et peut être employé pour décrire

avec efficacité "un ensemble coordonné d'éléments en fonctionnement" (Asbjornsen 1989). De ce point de vue, on peut considérer que:

- (1) Un système industriel est composé d'un ensemble structuré de fonctions de production, ainsi qu'un ensemble d'unités, de parties ou d'éléments concrets qui forment un tout unitaire et complexe, lequel exécute l'ensemble de ces fonctions.
- (2) Derrière un système industriel de production, il existe aussi un ensemble clair et structuré de fonctions administratives. Ces fonctions sont exécutées à partir de procédures, ainsi que d'un ensemble d'algorithmes, de modèles, de faits et de principes. Ces éléments concernent des pensées ou des domaines de connaissance particuliers, qui servent de support pour la gestion et pour le diagnostic.

Avec la définition (1), on fait souvent allusion aux procédés de production proprement dits ainsi qu'aux installations en intégrant leur système de supervision et de commande. Avec la définition (2), on fait allusion à l'organisation, aux connaissances et à l'expertise, c'est à dire aux structures logiques et aux procédés utilisés lors du pilotage et du traitement de l'information.

Ainsi, il existe, premièrement, un rapport clair entre le fonctionnement du système et un ensemble d'éléments matériels ou conceptuels, qui sont ordonnés et qui interagissent à l'intérieur d'une structure spécifiée. Deuxièmement, il existe un rapport clair entre le fonctionnement de cet ensemble et la réalisation d'objectifs (des buts) fixés.

Le modèle du fonctionnement d'un procédé de production (lors de l'analyse technique), doit prendre en compte tous ces aspects propres à un système industriel (Figure 3.2).

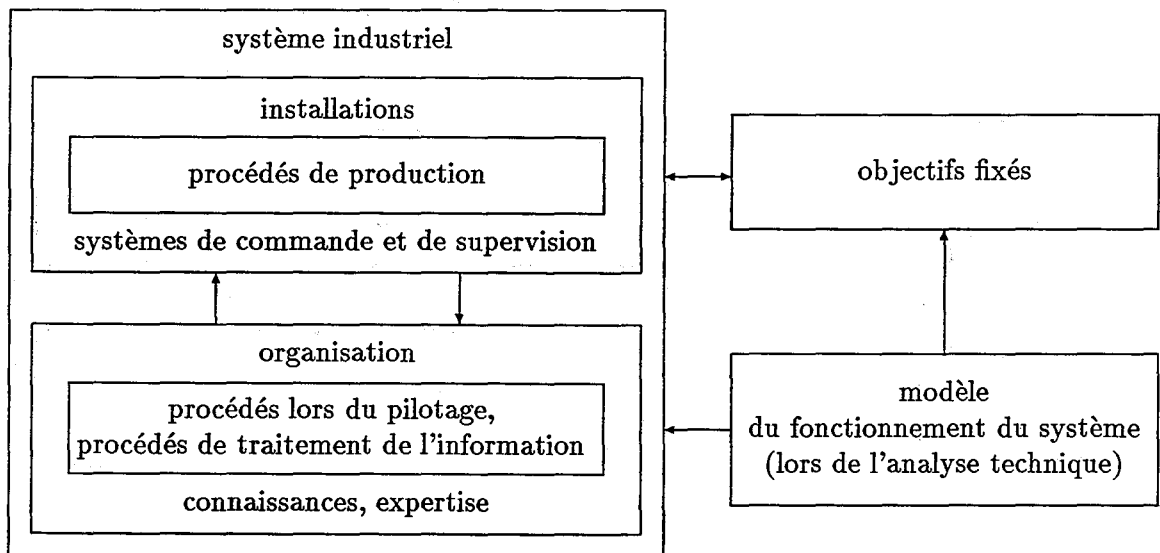


FIG. 3.2 - Système industriel et le modèle de son fonctionnement lors de l'analyse technique.

3.2 L'acquisition des connaissances

L'acquisition des connaissances peut être vue comme un procédé, activé par la recherche des causes des phénomènes. C'est grâce à cette recherche que le rapport entre les faits est progressivement établi. Le spécialiste est l'agent principal de ce procédé, où les entrées sont les causes et les sorties, les faits (Figure 3.3).

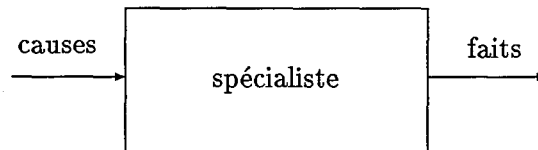


FIG. 3.3 - Processus d'acquisition de connaissances.

Un modèle de connaissance permettant le diagnostic peut être ajouté. Ainsi, lors de ce processus, on peut considérer deux phases:

- une phase de représentation des causes, des faits et de leurs relations,
- et une phase de diagnostic, où les causes sont identifiées à partir des faits observés.

Le spécialiste réalise la représentation des connaissances dans le modèle (la construction du modèle) et, par son esprit, le diagnostic. A partir du modèle, où sont représentés les faits, les causes et leurs relations, seule la phase de diagnostic a lieu (Figure 3.4).

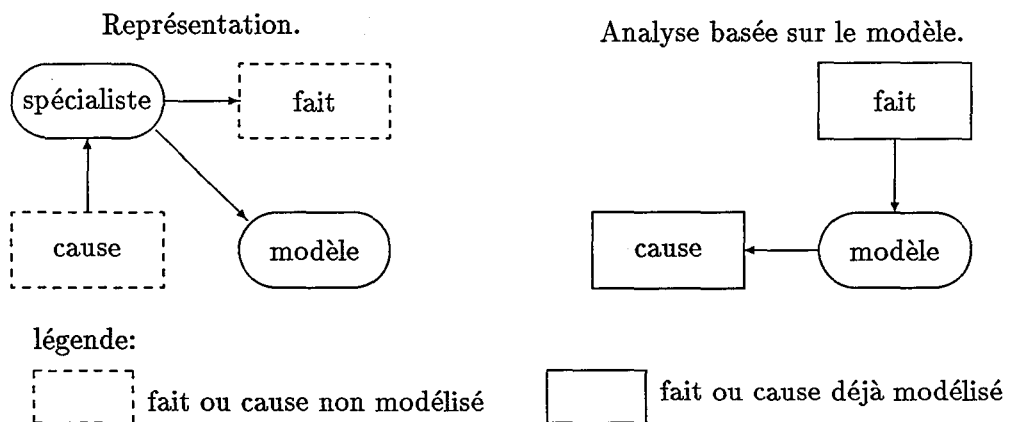


FIG. 3.4 - Les phases du processus d'acquisition de connaissances.

3.2.1 Dépendance des faits

L'analyse des faits, ceci afin de déterminer les causes qui peuvent les provoquer, dépend des circonstances dans lesquelles les faits sont observés. Ainsi, il y a des situations où un diagnostic ne peut pas être établi. En particulier, il n'est pas possible d'analyser sur la base des seules connaissances du spécialiste, ou sur celle des seules connaissances contenues

dans le modèle. Cela est dû au fait que les circonstances, à partir desquelles des relations entre les faits peuvent être établies, ne sont pas représentées dans le modèle et/ou dans l'esprit du spécialiste.

Afin d'examiner cette limitation, considérons les faits F1 et F2 dans les scénarios suivants:

- (1) à partir du modèle, l'analyse du fait F1, pour établir deux causes C1 ou C3 qui peuvent le provoquer, est accomplie;
- (2) le spécialiste, par son esprit, en face du fait F2, détermine une cause C2 qui provoque ce fait (ou, tout du moins, que le spécialiste croit provoquer);
- (3) l'analyse des faits F1 et F2, autant à partir du modèle que par le spécialiste, pour déterminer une seule cause, n'est pas accomplie.

Dans les scénarios (1) et (2), les connaissances du spécialiste et celles sur lesquelles le modèle est fondé sont suffisantes pour établir les causes. Ces premières réussites sont dues à la considération de l'indépendance des faits, c'est à dire la détermination de la cause C1, C2 ou C3 n'est, en principe, pas conditionnée par un rapport entre les faits F1 et F2.

Toutefois, dès qu'au fait F1 on associe le fait F2 (et vice versa), les connaissances ne sont plus suffisantes. Dans ce scénario, ce qui caractérise la dépendance des faits est une seule cause. Alors, dès que le spécialiste ne connaît pas le rapport entre cette cause et les faits F1 et F2, et que ce rapport n'a pas été modélisé, le diagnostic n'est pas possible (Figure 3.5).

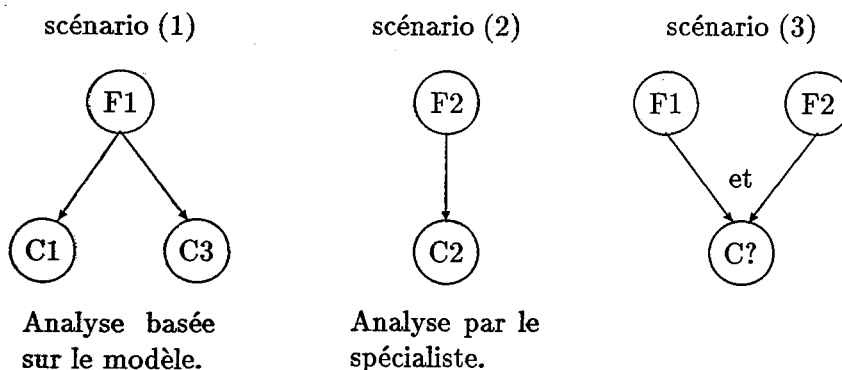


FIG. 3.5 - Analyse des faits selon les circonstances de dépendance ou d'indépendance.

Supposons, maintenant, que le spécialiste, pendant qu'il analyse le fait F2, a accès au résultat de l'analyse du fait F1 (faite à partir du modèle), c'est à dire les causes C1 et C3. Supposons aussi que le spécialiste se rend compte que la cause C3, dans certaines circonstances, est un effet provoqué par la cause C2. Alors, en combinant l'analyse du fait F1 (à partir du modèle) et celle du fait F2 par l'esprit du spécialiste, une solution pour le scénario (3) est possible: les faits F1 et F2 sont provoqués par la cause C2 (Figure 3.6).

Néanmoins, il faut remarquer que la solution pour le scénario (3) n'est valable que dans le contexte précisé par l'ensemble des causes et des effets (Figure 3.6). Cette condition est nécessaire parce que la cause C3, seule (hors le contexte des faits), est candidate à

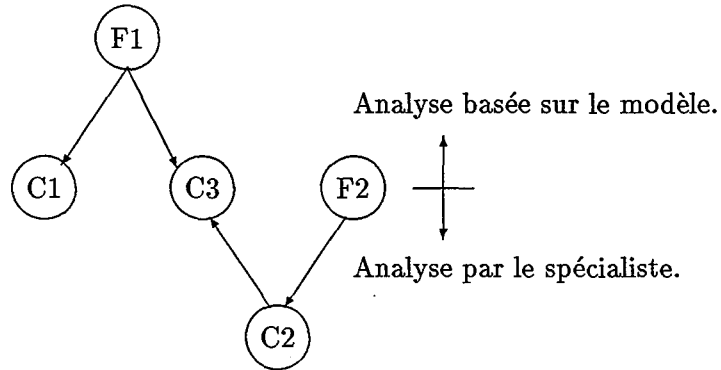


FIG. 3.6 - Rapport entre les faits en combinant l'analyse basée sur le modèle et les connaissances du spécialiste.

plusieurs interprétations. Alors, C3 doit pouvoir être interprétée par le spécialiste autant comme un effet qui est provoqué par C2 que comme une cause qui provoque F1. De la même façon, le spécialiste doit pouvoir considérer F2 comme un effet provoqué par C2 dans les mêmes circonstances où F1 est provoqué par C2. C'est ce raisonnement qui définit le contexte où la dépendance des faits F1 et F2, en tant qu'effets de la cause commune C2, est valable. Ce contexte est lié aux circonstances dans lesquelles la relation entre les faits F1 et F2 est considérée.

Alors, au fur et à mesure que le spécialiste est sollicité afin d'établir la dépendance entre ces deux premiers faits et d'autres, le même raisonnement sera nécessaire. Ce raisonnement est celui que le spécialiste utilise pour représenter la dépendance des faits dans son esprit. La Figure 3.7 illustre les situations où un nouveau fait F3 et une nouvelle cause C4 sont considérés.

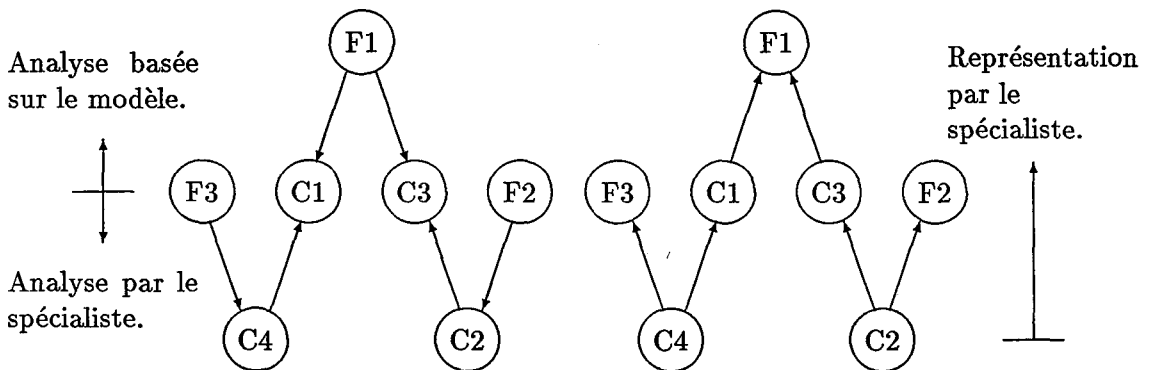


FIG. 3.7 - Représentation, par le spécialiste, de la dépendance des faits.

3.2.2 Dépendance des causes

On voit, dans la Figure 3.7, que les deux phases de l'acquisition des connaissances sont indissociables: le spécialiste, pour avancer dans l'analyse des faits et des causes, doit s'appuyer sur une représentation des connaissances. Le procédé est "démarré" par l'analyse du fait F1 à partir du modèle, et par l'analyse des faits F2 et F3 par l'esprit du spécialiste. Ensuite, la considération du contexte où la dépendance des faits F1 et F2 et des faits F1 et F3 est valable, est basée sur la représentation, par le spécialiste, des circonstances où l'effet de C1 et de C3 (c'est à dire, F1) peut être vérifié. Ces circonstances sont celles où F1 et F2 sont des effets déterminés par C2, et où F1 et F3 sont des effets déterminés par C4. Cette considération permet au spécialiste d'intégrer ses connaissances à celles du modèle.

Supposons, alors (Figure 3.8), que le spécialiste veut chercher la dépendance des causes C2 et C4 à partir d'une nouvelle cause C5, indépendamment d'un fait nouveau. Pour cela, il doit se baser sur les faits provoqués par les causes C2 et C4. Cette démarche comprend la représentation, dans son esprit, de la relation entre C2 et C4 avec des effets observables, c'est à dire les faits F1, F2 et F3. Ces relations sont construites à partir de l'effet de C2 sur F2, de C2 sur C3, de C3 sur F1, de C1 sur F1, de C4 sur C1 et de C4 sur F3. En procédant de cette manière, le spécialiste peut, indépendamment d'un fait nouveau, analyser les dépendances des causes et caractériser, progressivement, des dépendances plus générales entre faits.

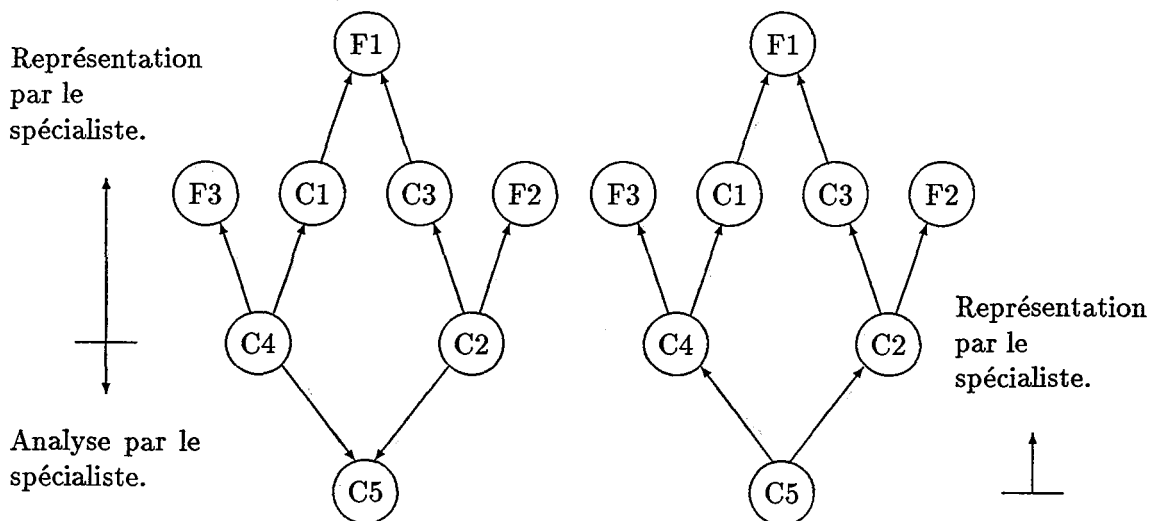


FIG. 3.8 - Représentation, par le spécialiste, de la dépendance des causes.

3.2.3 Analyse des faits et des causes à partir de la représentation des connaissances

De ce qui précède, il est possible de déduire que la représentation des connaissances par le spécialiste a aussi comme effet d'assurer son interprétation des relations entre causes,

entre effets et leurs circonstances. Sans un tel support, il lui serait impossible d'améliorer ses analyses.

D'un autre côté, comme nous l'avons vu, le spécialiste, pour améliorer ses analyses, doit souvent s'appuyer sur les analyses exécutées à partir des connaissances exogènes, c'est à dire celles composant le modèle créé par un autre spécialiste. De ce fait, le spécialiste doit être assuré que l'interprétation qu'il donne aux causes, en face des circonstances, est la même interprétation qui est prise en compte dans les analyses faites à partir d'un modèle permettant le diagnostic.

Le spécialiste ne peut modifier le modèle qu'après avoir intégré dans son esprit les connaissances à partir desquelles ce modèle est construit; il doit en effet respecter l'unité d'interprétation (il ne pourra pas se servir uniquement des analyses faites à partir du modèle).

Pour que les deux phases du "procédé d'acquisition des connaissances" puissent être accomplies:

1. Une méthode pour la définition des connaissances est nécessaire. Cette méthode doit permettre la représentation des connaissances lors des circonstances dans lesquelles les relations entre les faits et les causes sont considérées. Grâce à cette méthode, le spécialiste peut se servir des connaissances représentées dans le modèle pour avancer dans ses analyses. De la même façon, le spécialiste peut représenter de nouvelles connaissances (réutilisables par tout autre spécialiste) dans le modèle.
2. La définition de mécanismes pour le traitement des connaissances représentés dans le modèle, en respectant la méthodologie de représentation, est aussi nécessaire. Ces mécanismes doivent être utilisés sur le modèle pour le diagnostic.

Nous devons, donc, approcher le processus d'acquisition de connaissances à partir de deux éléments indispensables pour la construction d'un modèle permettant le diagnostic: la "méthodologie de représentation" et le "mécanisme d'analyse".

Ainsi, la phase "d'analyse" (Figure 3.9) est caractérisée par l'interaction du modèle et du mécanisme d'analyse, et par l'influence du modèle sur le spécialiste. La phase "de représentation" est caractérisée par l'interaction du spécialiste et de la méthodologie de représentation, et par l'influence du spécialiste sur le modèle. Grâce à ces interactions, une intégration entre les connaissances du spécialiste et celles sur lesquelles le modèle est fondé est possible (Figure 3.9).

L'intégration entre les connaissances du spécialiste et celles du modèle est traduite par l'emploi de la méthodologie de représentation et du mécanisme d'analyse. L'emploi de la méthodologie de représentation permet au spécialiste de visualiser et de transcrire dans le modèle de nouvelles connaissances qui sont éveillées dans son esprit par un fait nouveau, ou par la perception d'une nouvelle dépendance des faits. L'emploi du mécanisme d'analyse permet au spécialiste d'utiliser les connaissances modélisées lors de la représentation de nouvelles situations. La Figure 3.10, basée sur les scénarios présentés dans la Figure 3.8, illustre les résultats obtenus à partir de cette intégration.

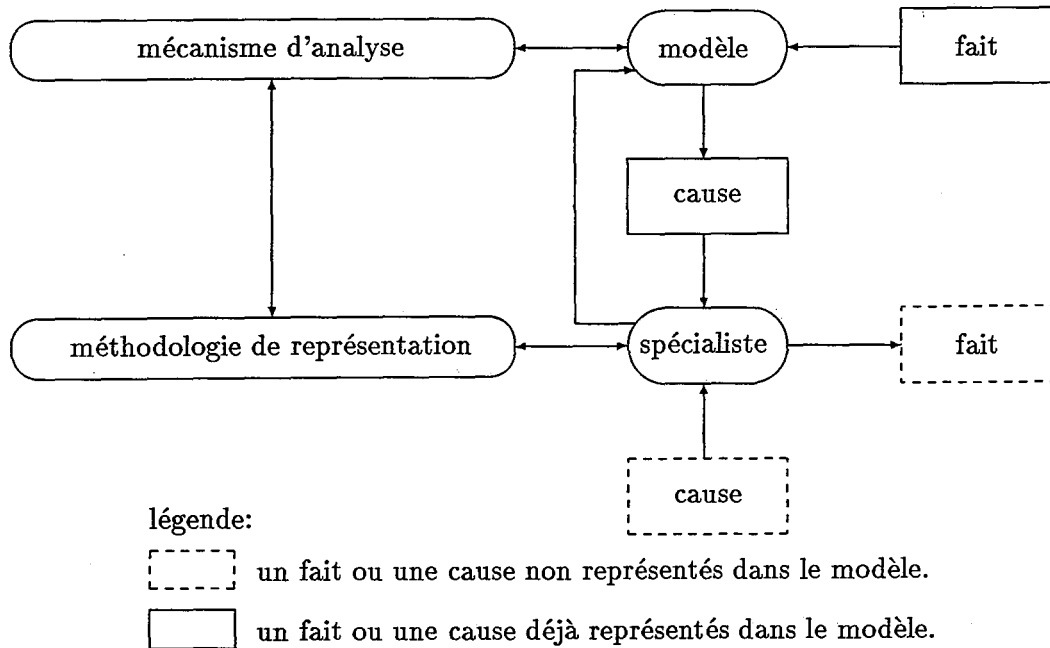


FIG. 3.9 - Interaction entre le modèle, le spécialiste, le mécanisme d'analyse et la méthodologie de représentation.

3.2.4 Caractérisation des faits et de leur dépendance

Le modèle construit à partir de ce processus d'acquisition des connaissances contient la représentation de la dépendance des faits.

Dans la phase d'analyse on considère:

- les effets observables provoqués par les causes puis,
- les dépendances intercausales.

Néanmoins, la phase de représentation est construite dans le sens opposé. Dans la représentation, on considère:

- l'effet qu'une cause provoque sur d'autres causes puis,
- les effets observables provoqués par les causes.

Le sens, dans lequel est faite la représentation, a une importance particulière, car les causes ne peuvent être représentées que par rapport aux effets observés. Par conséquent, dans le modèle, une cause est une caractérisation plus ou moins générale des faits, en même temps que ceux-ci représentent une succession (ou une somme) de causes.

Afin d'appliquer cette démarche, nous proposons, dans un premier temps, la définition de trois "pierres" de la connaissance. Elles nous aideront à répondre à trois questions:

- Quelles sont les éléments pouvant intervenir dans les faits?
- Comment interviennent-ils?

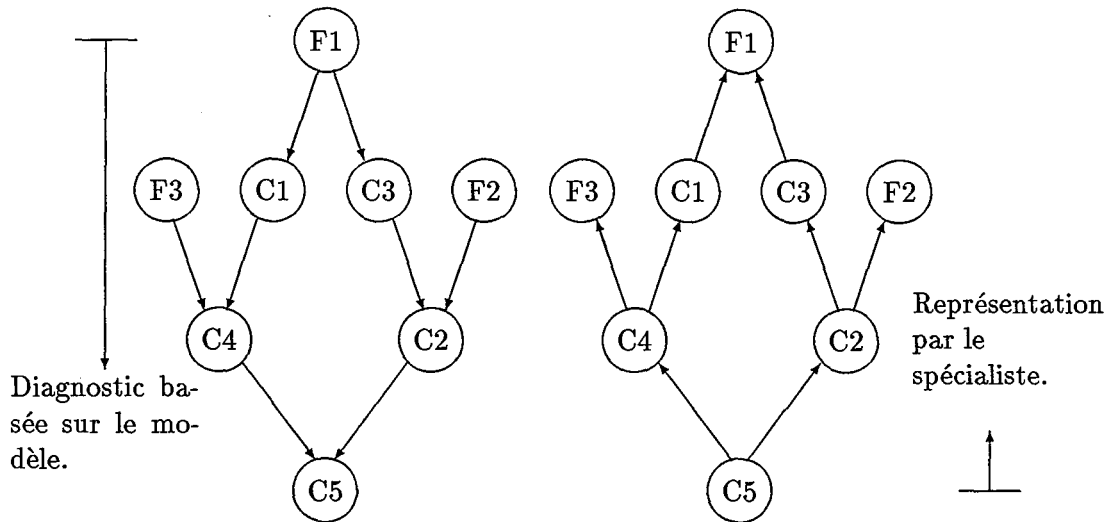


FIG. 3.10 - Intégration des connaissances du spécialiste et du modèle.

- Pourquoi interviennent-ils?

Les pierres proposées (Figure 3.11) comprennent, respectivement:

1. Les "influences". Grâce aux "influences", on représente quelles sont les causes à partir desquelles le fonctionnement du système est conditionné. Aux "influences", un ensemble de faits F1 peut être associé.
2. Les "contributions". Avec les "contributions", on représente comment le fonctionnement du système est conditionné par les causes. A partir des "contributions", une traduction du fonctionnement du système, dans le contexte défini par les "influences", est établie. Un ensemble de faits F2 (sur le fonctionnement du système) peut être associé aux "contributions".
3. Les "relations". Avec les "relations", on doit pouvoir représenter pourquoi le fonctionnement du système est conditionné par les causes. A partir des "relations", une corrélation logique entre les faits est établie.

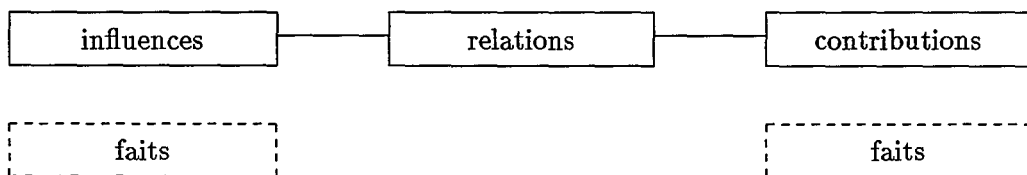


FIG. 3.11 - Trois "pierres" de la connaissance pour la représentation du fonctionnement des systèmes.

Par ailleurs, nous pouvons approcher le fonctionnement d'un système par l'interaction de ses composants. Dans cette perspective, les faits et les dépendances, déterminés à partir

des "influences", des "contributions" et des "relations", peuvent être caractérisés de la façon suivante:

1. Les "influences" et les "contributions" sont rapportées aux effets résultant de l'activité des composants du système en interaction, dans un environnement précis. Alors, les "influences" sont représentées en prenant en compte l'influence de l'état des composants sur l'activité du système. Les "influences" sont définies, par conséquent, par les facteurs, rapportés à l'état des composants, qui déterminent l'activité du système. D'un autre côté, à partir des effets sur les composants on peut représenter les "contributions". Donc, les "contributions" sont définies par l'état des composants, résultant de leur interaction.
2. Ainsi, les faits sont rapportés à l'état des composants (ou à un effet à partir duquel l'état d'un ensemble des composants en interaction peut être caractérisé) qui conditionne l'activité du système ou qui est conditionné par celle-ci (Figure 3.12).

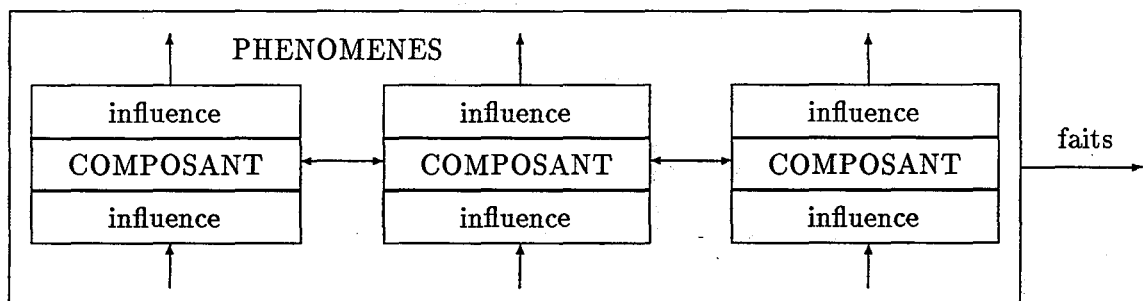


FIG. 3.12 - Interaction des composants d'un système en fonctionnement.

3. Les corrélations entre les faits sont définies à partir des "relations" entre les "influences" et les "contributions". Ces relations expriment le rapport entre les phénomènes qui décrivent l'influence des composants sur l'activité du système et les phénomènes qui décrivent les effets sur les composants, résultants de cette activité (Figure 3.13).

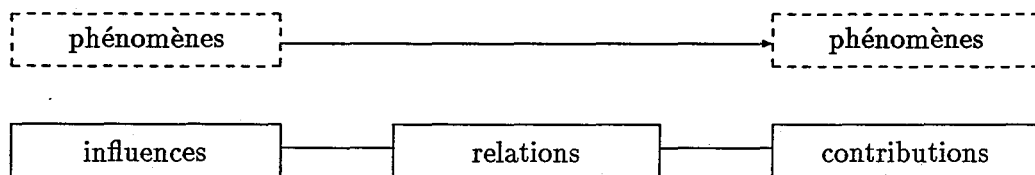


FIG. 3.13 - Effets résultants de l'interaction des composants.

La représentation des causes par rapport aux effets provoqués sur le fonctionnement du système, sera basée sur ces concepts. Le modèle peut être vu comme un objet qui contient les connaissances du fonctionnement du système, traversé par un "flux" circonstanciel.

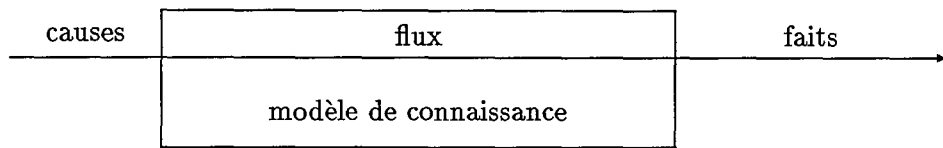


FIG. 3.14 - Modèle des connaissances du fonctionnement d'un système.

Ce "flux" représente la dépendance des faits, rapportés au fonctionnement du système (Figure 3.14).

Selon ce qui précède, nous proposons une représentation de la connaissance du fonctionnement des systèmes industriels à partir des concepts "d'influence", de "contribution" et de "relation". Si ceux-ci sont caractérisés à partir de quantités, on dit que le modèle contient des connaissances "quantitatives" sur le fonctionnement du système. D'un autre côté, dès que ces quantités sont définies en fonction de la réalisation d'objectifs, les "influences", "contributions" et "relations" caractérisent un processus d'obtention d'une qualité du fonctionnement. Le "flux" circonstanciel, cité ci-dessus, concerne ce processus. Nous allons, ainsi, approcher la connaissance du fonctionnement d'un système à partir de ces deux aspects.

3.3 Caractérisation des faits et de leur dépendance à partir des connaissances quantitatives

Un modèle basé sur des connaissances quantitatives est nécessaire à la description du comportement statique ou dynamique d'un système. Le système est modélisé à partir de la considération des phénomènes rapportés à une quantité de matière délimitée par un volume de contrôle, dans lequel sont considérés les échanges entre le système et son environnement.

Ainsi, le modèle, intégrant la connaissance physique que l'on a du phénomène, est formé par:

1. Un ensemble de quantités fondamentales dépendantes, dont les valeurs décrivent l'état naturel du système ainsi qu'un ensemble de paramètres;
2. Un ensemble d'équations, formées par des relations entre les quantités fondamentales. Ces équations décrivent comment l'état naturel du système change dans le temps.

Essentiellement, la masse, l'énergie et la quantité de mouvement constituent les quantités fondamentales considérées dans les procédés physiques.

Bien souvent, ces quantités ne peuvent pas être mesurées directement. Ainsi, d'autres variables sont sélectionnées afin de déterminer leurs valeurs, comme, par exemple, la concentration, la température ou le volume. Lorsque ces variables caractérisent les quantités fondamentales, elles sont appelées "variables d'état", ceci parce que l'état du système peut être défini à partir de leurs valeurs.

Les équations du modèle sont dérivées à partir de l'application du "principe de conservation" sur les quantités fondamentales. Par exemple, le principe de conservation sur une quantité S est énoncé sous la forme:

$$\frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité totale de } S \\ \text{qui s'accumule} \\ \text{dans le système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de } S \\ \text{qui entre} \\ \text{dans le système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} - \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de } S \\ \text{qui sort} \\ \text{du système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} + \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de } S \\ \text{générée} \\ \text{dans le système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} - \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de } S \\ \text{consommée} \\ \text{dans le système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} \quad (3.1)$$

Les paramètres sont, normalement, des grandeurs dont les valeurs devraient être indépendantes des valeurs des variables d'état. Ces valeurs sont déterminées expérimentalement, afin d'ajuster les valeurs des variables dépendantes modélisées aux valeurs mesurées sur le procédé réel. Les paramètres prennent en compte les caractéristiques du procédé, des composants et de l'installation.

Si le système est considéré en mode dynamique, on intègre le système d'équations différentielles. Les valeurs des variables d'état, au cours du temps, décrivent le comportement du système.

Par ailleurs, aux termes de l'équation générale (3.2) on peut associer les résultats de l'activité d'un ensemble de composants:

- la variation d'une quantité fondamentale S , qui définit l'état de la matière associé à un volume de contrôle VC , caractérisé par une variable dépendante x ;
- les termes à droite, représentant des grandeurs G , à partir desquelles les phénomènes physiques, associés à un volume de contrôle VC , sont pris en compte lors de l'application du principe de conservation sur la quantité fondamentale S .

L'interaction des composants peut être alors considérée à partir des relations entre les quantités S et les grandeurs G .

Exemple 3.1

Considérons le fonctionnement d'un réservoir, dont le niveau h de liquide stocké peut varier en fonction du débit volumique d'alimentation de liquide par le haut du réservoir Q_{ve} et du débit de liquide Q_{vs} qui, par l'action de la force de gravité, s'écoule par une conduite horizontale, installée dans la base du réservoir.

Les quantités fondamentales, dont les valeurs fournissent des informations sur le système, sont:

- (a) la quantité totale de masse de liquide dans le réservoir;
- (b) la quantité de mouvement du liquide contenu dans la conduite de sortie.

Ces quantités sont rapportées à la masse de liquide et à la quantité de mouvement considérées, respectivement, dans un volume de contrôle dont les frontières définissent un système S_1 , et dans un volume de contrôle dont les frontières définissent un système S_3 (Figure 3.15).

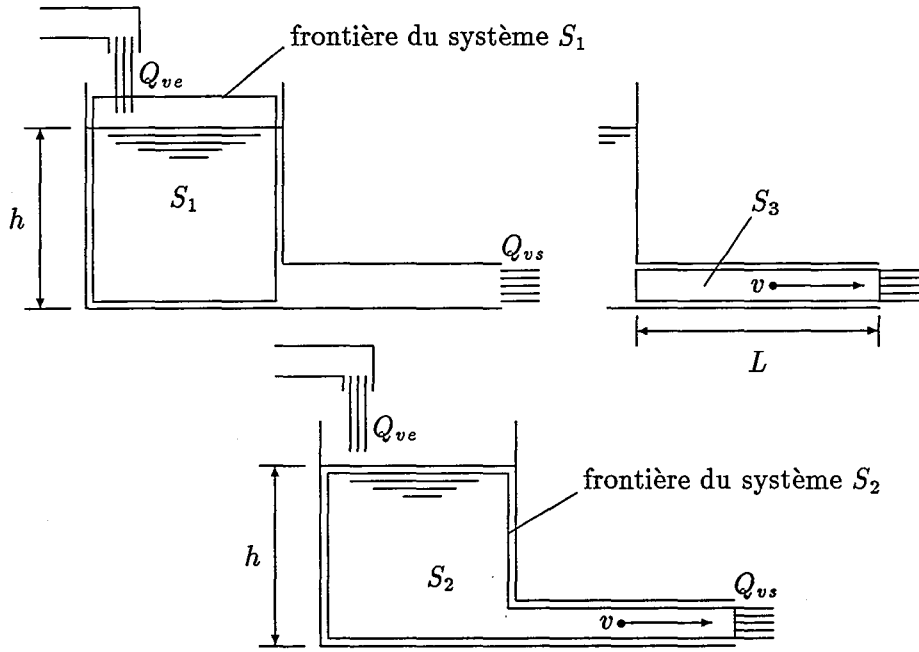


FIG. 3.15 - Réservoir et volumes de contrôle.

La masse totale de liquide dans le réservoir (système S_1) est donnée par:

$$\text{masse totale} = \rho V = \rho A h \quad (3.2)$$

où ρ est la masse volumique du liquide (kg.m^{-3}), V est le volume du liquide dans le réservoir (m^3), A est l'aire de la base du réservoir (m^2), et h est la hauteur du liquide par rapport à la base du réservoir (m).

La quantité de mouvement du liquide contenu dans la conduite de sortie, c'est à dire, dans le système S_3 , est donnée par:

$$\text{quantité de mouvement} = \rho V_t v = \rho A_t L v \quad (3.3)$$

où V_t est le volume de liquide dans la conduite de sortie (m^3), A_t est l'aire de sa section transversale (m^2), L est sa longueur (m), et v est la vitesse du liquide dans la direction horizontale (m.s^{-1}), considérée uniforme dans tout le volume de contrôle.

L'application de la loi de la conservation de masse sur le système S_1 nous amène à l'équation de continuité:

$$\frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité totale de} \\ \text{masse qui s'accumule} \\ \text{dans le système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de masse} \\ \text{qui entre} \\ \text{dans le système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} - \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de masse} \\ \text{qui sort} \\ \text{du système} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} \quad (3.4)$$

c'est à dire:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_e Q_{ve} - \rho_s Q_{vs} \quad (3.5)$$

où ρ_e, ρ_s = masse volumique du liquide qui entre et du liquide qui sort du système S_1 (kg.m^{-3})

Q_{ve}, Q_{vs} = débit volumique de liquide qui entre et qui sort du système ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

V = volume de liquide stocké dans le système (m^3)

Le principe de conservation de la quantité de mouvement, par rapport à un volume de contrôle, d'après la deuxième loi du mouvement de Newton, est donné par:

$$\left[\begin{array}{c} \text{somme} \\ \text{algébrique} \\ \text{des forces qui} \\ \text{agissent sur} \\ \text{le volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right] = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de} \\ \text{mouvement qui} \\ \text{sort} \\ \text{du volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} - \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de} \\ \text{mouvement qui} \\ \text{entre} \\ \text{dans le volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} + \frac{\left[\begin{array}{c} \text{quantité de} \\ \text{mouvement qui} \\ \text{s'accumule} \\ \text{dans le volume} \\ \text{de contrôle} \end{array} \right]}{\text{unité de temps}} \quad (3.6)$$

où les forces reçues sont comptées positivement.

Partant de l'hypothèse que le liquide est incompressible et que la section transversale de la conduite est constante dans toute sa longueur, les deux premiers termes à droite de l'équation s'annulent. Ainsi, l'application de ce principe au volume de contrôle qui définit les frontières du système S_3 (Figure 3.15), nous mène à l'équation:

$$\frac{d(\rho A_t L v)}{dt} = \sum F \quad (3.7)$$

où F = forces qui agissent sur le système S_3 (N), et le terme à droite de l'équation représente la quantité de mouvement du système qui s'accumule par unité de temps.

La résultante des forces $\sum F$ peut être obtenue à partir de l'application du principe de conservation de l'énergie sur le volume de contrôle qui définit les frontières du système S_2 (Figure 3.15). Ainsi, l'expression des forces agissant sur le système S_3 , à un instant t , est donnée par:

$$\sum F = A_t \rho (e_p - e_k - e_u) \quad (3.8)$$

où e_p = énergie potentielle (spécifique) du fluide ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$):

$$e_p = gh \quad (3.9)$$

e_k = énergie cinétique (spécifique) du fluide ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$):

$$e_k = \frac{v^2}{2} \quad (3.10)$$

e_u = perte d'énergie interne (spécifique) due au frottement du fluide dans la conduite ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$), donnée par:

$$e_u = K_P \frac{v^2}{2} \quad (3.11)$$

Dans les équations (3.9), (3.10) et (3.11), ci-dessus:

g = accélération de la gravité ($\text{m}.\text{s}^{-2}$)

h = hauteur de liquide dans le réservoir (m)

v = vitesse du fluide dans la conduite de sortie ($\text{m}.\text{s}^{-1}$)

K_P = constante adimensionnelle, rapportée à la nature du fluide et de la conduite, et qui caractérise le changement de l'énergie interne du fluide en écoulement turbulent.

Le paramètre K_P , pour les fluides en écoulement stationnaire, en conditions isothermes, dans les conduites circulaires (Perry 1984), est donné par:

$$K_P = \frac{4fL}{D} \quad (3.12)$$

où f = facteur de frottement de Fanning (adimensionnel), obtenu expérimentalement en fonction du nombre de Reynolds $N_{Re} = D.v.\rho/\mu$, avec D = diamètre interne de la conduite, v = vitesse du fluide, ρ = densité du fluide, μ = viscosité du fluide, et en fonction de la rugosité de la paroi interne ϵ de la conduite.

L = longueur de la conduite (m)

D = diamètre interne de la conduite (m)

Le facteur de frottement f est supposée constant en écoulement turbulent.

Pour les vannes et accessoires, K_P est défini par la longueur équivalente d'une conduite qui produit la même perte d'énergie sur le fluide.

Alors, les équations (3.5) et (3.7) peuvent être réécrites de façon à mieux caractériser les variables d'état des systèmes S_1 et S_3 . Ainsi, si l'on considère, dans l'équation (3.5), que $\rho_e = \rho_s = \rho$, que $Q_{vs} = v.A_t$, et que $V = h.A_r$, où A_r = aire de la base du réservoir, on obtient:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{ve}}{A_r} - \frac{A_t}{A_r}v \quad (3.13)$$

et, à partir des équations (3.9), (3.10) et (3.11):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{L} \left(gh - \frac{v^2}{2} - K_P \frac{v^2}{2} \right) \quad (3.14)$$

Dans les équations (3.13) et (3.14) ci-dessus, la masse totale du fluide contenu dans le réservoir et la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie sont caractérisées, respectivement, par les variables dépendantes h et v .

D'un autre côté, les résultats de l'activité d'un ensemble de composants peuvent être pris en compte à partir des termes des équations (3.13) et (3.14) ci-dessus. On peut considérer ces composants comme étant:

- le fluide contenu dans le réservoir (système S_1)
- le fluide contenu dans le réservoir et dans le courant de sortie (système S_2)
- le fluide contenu dans le courant de sortie (système S_3)
- le fluide contenu dans le courant d'alimentation
- le matériau de la conduite de sortie
- le matériau du réservoir

Ainsi, par exemple:

- à partir de la relation entre la masse entrante (Q_{ve}/A_r) associée au système S_1 , et la variation de la masse totale (dh/dt), on peut prendre en compte l'interaction entre le fluide contenu dans le courant d'alimentation et le système S_1 ;
- du fait qu'autant la masse totale du système S_1 comme l'énergie potentielle associée au système S_2 (définie par $(gh)/L$ dans l'équation (3.14)) dépendent de h , on peut prendre en compte l'interaction des système S_1 et S_2 .

La Figure 3.16 illustre les relations à partir desquelles on peut prendre en compte l'interaction entre les composants.

Dans ces relations, l'influence des composants sur les phénomènes et l'influence des phénomènes sur les composants (sur l'état de la matière dont ils sont constitués) sont prises en compte .

3.4 Caractérisation des faits en tant qu'objectifs

De la manière dont nous avons défini un système industriel, il existe un rapport clair entre le fonctionnement du système et un ensemble d'éléments matériels ou conceptuels, qui interagissent à l'intérieur d'une structure précise. Il existe aussi un rapport clair entre le fonctionnement de cet ensemble et la réalisation d'objectifs. Le comportement du système doit tendre à la réalisation des objectifs.

Le comportement du système est conditionné par les facteurs concourant à la réalisation des objectifs fixés. Cette relation est prise en compte dans la structure en fonction de

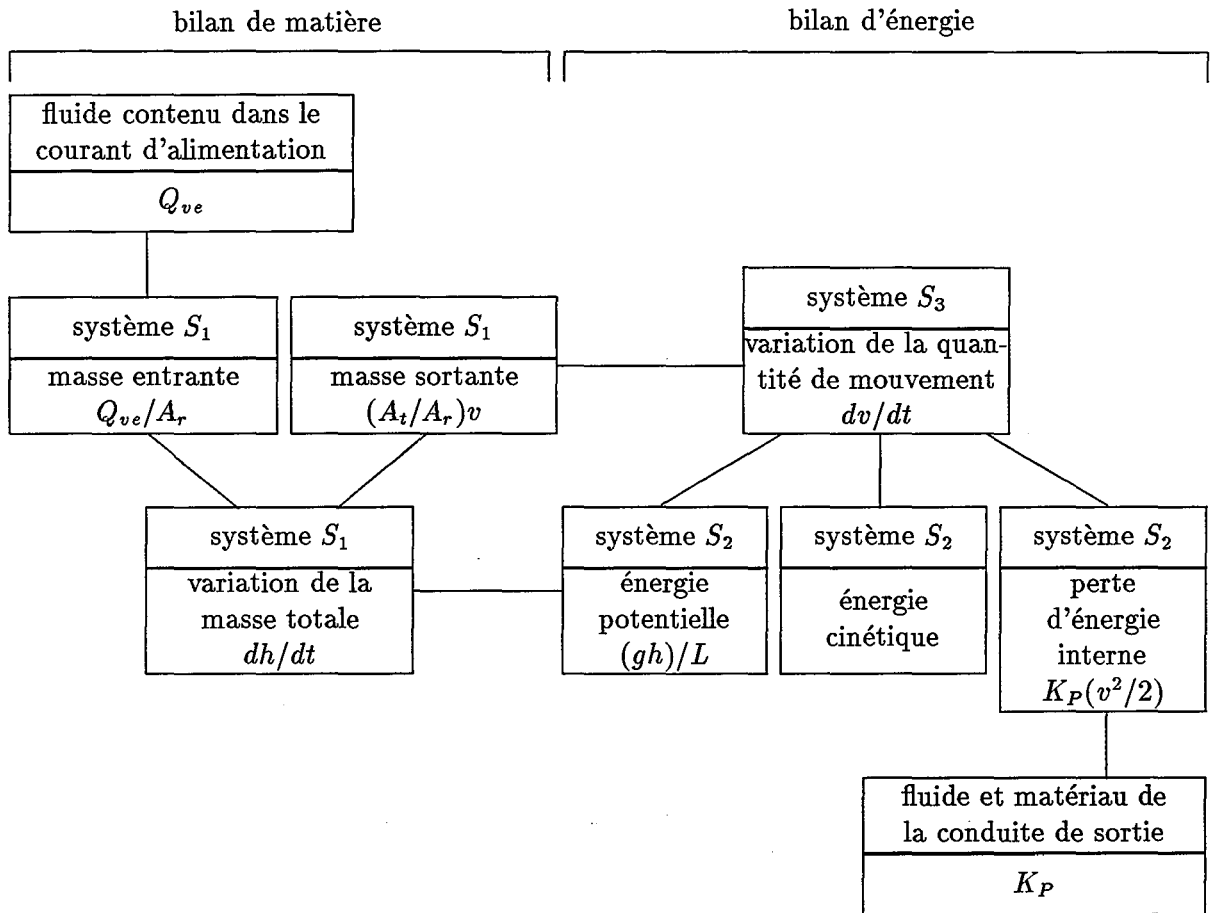


FIG. 3.16 - Relations entre les termes des équations du système "réservoir".

l'interaction des composants, de manière à ce que le comportement de chacun des composants soit un facteur qui détermine le comportement désiré des autres. Le comportement désiré du système est l'effet résultant de l'interaction des composants au sein d'une telle structure.

Ainsi, la représentation des faits, en tant qu'objectifs, est rapportée essentiellement à des valeurs désirées, définies à partir de la considération de l'interaction d'un ensemble de composants au sein d'une structure. Lorsque cette représentation est basée sur un modèle quantitatif de connaissance, ces valeurs peuvent être celles qui sont fixées (la valeur des paramètres ou des variables indépendantes) ou produites (la valeur des variables d'état) dans la simulation du système. Dès qu'on se propose de représenter les connaissances à partir des concepts "d'influence", de "contribution" et de "relation", celles-ci sont définies à partir de ces valeurs.

3.4.1 La traduction des objectifs par le contexte physique

Comme on l'a vu, le modèle de connaissance quantitatif est formé par un ensemble de relations entre des variables dépendantes, qui décrivent l'état naturel du système.

Ces relations sont définies à partir de la considération des phénomènes rapportés à une quantité de matière en interaction avec un environnement précis. Dans le modèle, cette interaction est caractérisée par des grandeurs à partir desquelles on peut définir l'influence de cet environnement sur l'état et sur le changement d'état du système. Ainsi, l'état du système, simulé à partir du modèle des connaissances, est conditionné par un ensemble de valeurs fixées. Cette considération est nécessaire, car le rapport entre les phénomènes concernant le système, et à partir duquel la représentation de sa dynamique est basée, ne peut être défini qu'à partir de la considération d'un contexte, ou des circonstances, connues (donc fixées).

En adoptant une représentation plus générale, on peut considérer l'interaction entre le système et l'environnement à partir de l'interaction d'un ensemble de composants. Les valeurs fixées doivent caractériser l'influence des composants sur les résultats de leur interaction; ceci dans des circonstances où l'état de certains composants ne change pas lors d'un changement de l'état d'autres.

Ainsi, deux contextes sont modélisés:

- le contexte défini par les résultats de l'interaction des composants, dans les circonstances où ces résultats changent lors d'un changement de l'état des composants;
- le contexte défini par l'état des composants, dans les circonstances où l'état des composants ne change pas lors d'un changement des résultats de leur interaction.

Le deuxième point ci-dessus a une importance particulière, puisque c'est à partir de cette considération qu'un rapport logique entre les phénomènes peut s'établir. Dans ce rapport un lien de cause à effet est évoqué.

Alors, dès qu'on considère la réalisation d'objectifs, ce raisonnement concerne la possibilité d'identifier, à partir des valeurs fixées, les phénomènes du processus qui déterminent l'obtention des valeurs désirées. L'identification de ces phénomènes permet une structuration du raisonnement, basée sur un processus d'obtention de résultats à partir de circonstances précisées. Le concept "d'influence" a été introduit afin de mettre en oeuvre ce raisonnement.

Donc, les grandeurs dont les valeurs sont fixées, et qui décrivent l'influence des composants sur les résultats de leur interaction, définissent les "influences". Ces grandeurs peuvent être caractérisées par les paramètres et par les variables indépendantes représentées dans le modèle de connaissance quantitatif. Les "influences" représentent une traduction des objectifs par le contexte physique défini par ces grandeurs, et on les considère comme les causes à partir desquelles le fonctionnement désiré du système est conditionné.

Exemple 3.2

A partir du modèle du réservoir décrit dans l'Exemple 1, parmi les paramètres ou les variables indépendantes qui décrivent l'influence des composants sur l'activité du système, on peut citer:

1. Le coefficient de perte de charge K_P (équation (3.14)), caractérisant le résultat de l'interaction entre la conduite et le fluide. K_P , est défini par les facteurs liés à la nature du fluide et de la conduite. Ceux-ci déterminent, par conséquent, l'influence du fluide et de la conduite, due à leur nature, sur l'état du système (modélisé comme

une quantité de fluide). C'est dans ce sens que e_u est représentée comme une fonction de K_P et de v .

2. Le débit volumique Q_{ve} . On peut considérer que Q_{ve} est défini par l'état d'un système caractérisé par la vitesse du fluide contenu dans le courant d'entrée, lequel n'est pas affecté par l'état du fluide contenu dans le réservoir et dans la conduite de sortie.

3.4.2 La traduction des objectifs par les phénomènes

L'application du principe de conservation met en rapport les phénomènes physiques liés à chaque quantité fondamentale considérée. Lors de l'application du principe de conservation sur une quantité fondamentale S , ces phénomènes sont pris en compte à partir des grandeurs G (les termes à droite dans l'équation (3.2)). Ces grandeurs G sont définies en fonction des variables indépendantes, des paramètres et des variables dépendantes. Ainsi, les quantités S comme les grandeurs G traduisent les effets sur l'état du système (tel qu'un composant), résultant des "influences". Dès que les "contributions" sont définies par les quantités S et les grandeurs G , elles représentent une traduction des objectifs par les résultats de l'interaction des composants.

Exemple 3.3

Dans les équations (3.13) et (3.14) (Exemple 1), les "contributions" sont rapportées à:

- la variation de la masse totale, définie par le terme dh/dt dans l'équation (3.13);
- la masse entrante, définie par le terme (Q_{ve}/A_r) ;
- la masse sortante, définie par le terme $(A_t/A_r)v$;
- la variation de la quantité de mouvement, définie par le terme dv/dt dans l'équation (3.14);
- l'énergie potentielle (spécifique) $e_p = gh$, dans la même équation;
- l'énergie cinétique (spécifique) $e_k = v^2/2$;
- la perte d'énergie interne $e_u = K_P(v^2/2)$.

3.4.3 La traduction des objectifs par les effets

Le contexte physique, qui gouverne le fonctionnement du système, est une expression des décisions de conception. Ces décisions concernent la définition de la structure, où les résultats désirés sont obtenus à partir de l'interaction des composants. Dans cette perspective, les "influences" constituent la base de cette structure, puisque l'ordre dans lequel les composants interagissent est représenté par ce concept.

D'un autre côté, les résultats sont définis par les phénomènes qui décrivent les effets, sur l'état du système, déterminés par l'état des composants. Le système est, dans ce cas, un élément où les facteurs qui contribuent à l'obtention des résultats peuvent être mis en rapport.

Donc, c'est à partir des relations entre les phénomènes, qui décrivent les effets (sur l'état du système) résultant des "influences", qu'on peut définir la structure où les résultats sont produits.

Toutefois, les "influences", de la manière dont on les a définies, déterminent les résultats, mais ne dépendent pas de ceux-ci. Alors, leur rapport ne peut être établi que par les résultats, c'est à dire par les "contributions". Les relations entre les "influences" sont établies à partir des relations entre les "contributions". Cette considération est basée sur les critères à partir desquels sont prises les décisions de conception:

- les circonstances où l'état (désiré) des composants n'est pas déterminé par l'effet de leur interaction;
- les circonstances où l'effet désiré de l'interaction des composants est déterminé par l'état des composants.

Ces critères, intégrés, déterminent le sens dans lequel le système tend à la réalisation des objectifs. Ils déterminent, aussi, le sens dans lequel est faite la représentation des connaissances. Ainsi, les "contributions", en tant qu'éléments à partir desquels sont établies les relations entre les "influences", représentent l'expression des causes, en tant que produits des décisions, en étapes.

La structure, où les résultats désirés sont obtenus à partir de l'interaction des composants, est caractérisée:

- par les relations entre les "contributions" et les "influences", où sont prises en compte les décisions de conception;
- par les relations entre les "contributions", où sont prises en compte les circonstances où les effets résultants de l'interaction des composants tendent à la réalisation des objectifs.

Les relations entre les contributions et les influences

Soit $g(t)$ une variable indépendante ou un paramètre, représentés dans les équations du modèle quantitatif, à partir de laquelle une "influence" est définie. Une relation $R(G, g(t))$ est établie si $g(t)$ est représenté dans un terme définissant une grandeur G . Dans ces relations, la "contribution" définie par la grandeur G est un effet de $g(t)$.

Les relations entre les contributions

A partir du modèle quantitatif, les relations sont établies de la manière suivante:

- Pour chaque équation $\dot{S} = \sum_{i=1}^n G_i$, les relations $R(S, G_i)$. Dans ces relations, la "contribution", définie par la quantité S , est un effet d'une des grandeurs G .
- Etant donné deux variables dépendantes x_1 et x_2 caractérisant, respectivement, deux quantités S_1 et S_2 , une relation $R(G, S_1)$ est établie si G est définie par l'un des termes de $\dot{S}_2 = \sum_{i=1}^n G_i$, et x_1 est représentée dans le terme définissant la grandeur G . Dans ces relations, la grandeur G est un effet de la quantité S .

Ainsi, les sens des relations exprime le rapport logique entre les phénomènes, à partir duquel un lien de cause à effet peut être évoqué.

La Figure 3.17 présente schématiquement les relations entre les "contributions" et entre les "contributions" et les "influences", rapportées à la connaissance représentée dans les équations (3.13) et (3.14) (Exemple 3.1).

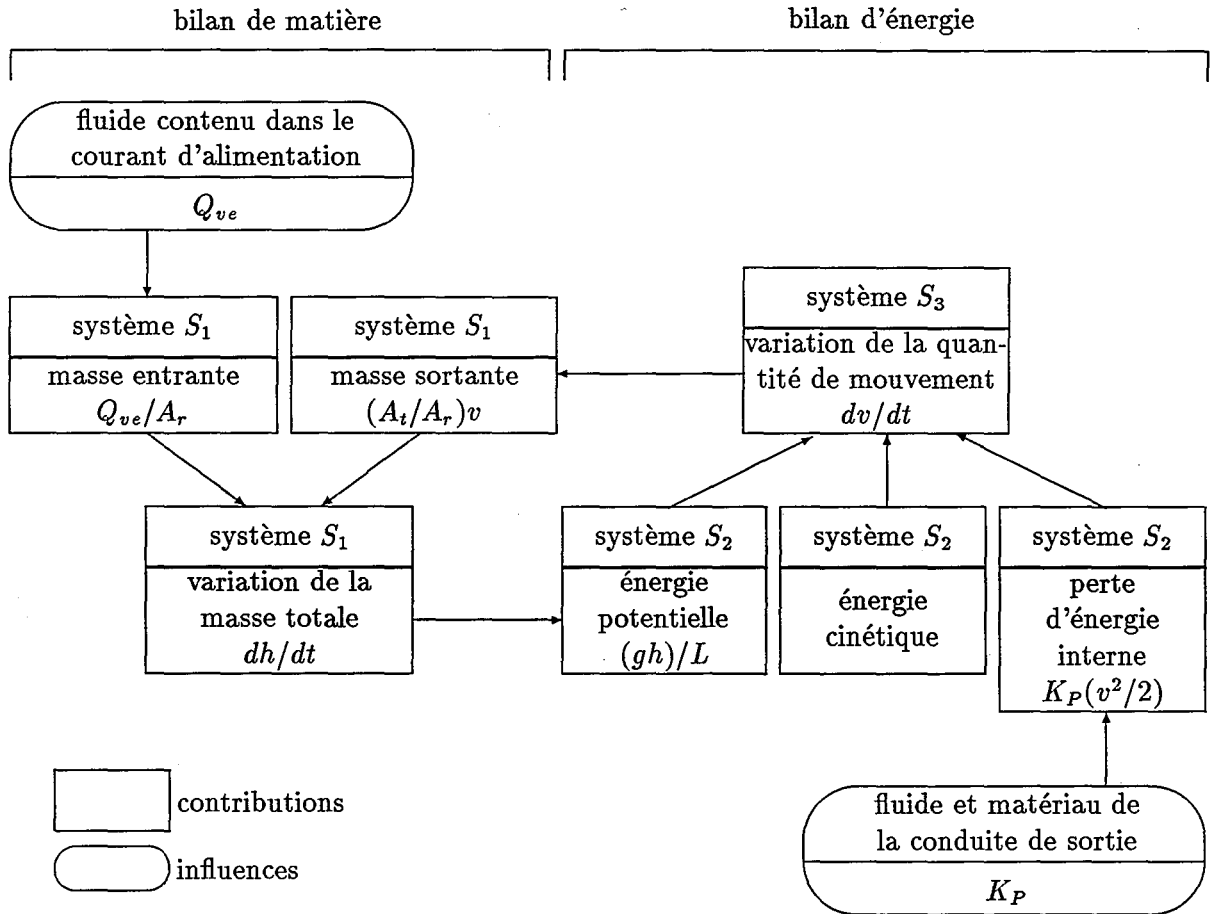


FIG. 3.17 - Relations entre les "contributions" et les "influences" rapportées au fonctionnement du réservoir.

Exemple 3.4

Considérons le comportement du réservoir, obtenu à partir de la solution du système d'équations différentielles (3.13) et (3.14). Plus précisément, considérons le comportement du système dans les deux scénarios suivants:

- (1) le système fonctionne initialement en régime stationnaire et, à partir d'un instant donné, un changement de la valeur de Q_{ve} est effectué (débit du fluide du courant d'entrée du réservoir), de façon à obtenir des nouvelles valeurs désirées de v (vitesse du fluide contenu dans la conduite de sortie), et de h (hauteur de fluide contenu dans le réservoir);
- (2) le système fonctionne initialement en régime stationnaire, défini par les mêmes conditions qu'au scénario ci-dessus et, à partir d'un instant donné, un changement de la

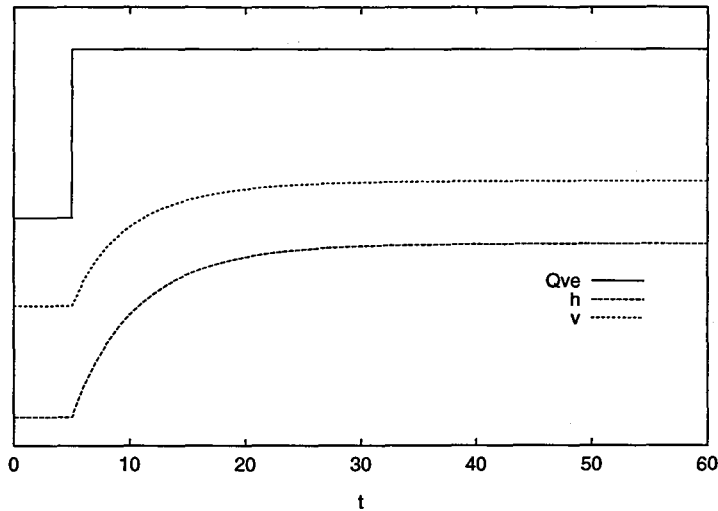


FIG. 3.18 - Simulation du scénario (1), avec le changement du débit du courant d'entrée.

valeur de K_P est effectué (coefficient de la perte de charge du fluide contenu dans la conduite de sortie), de façon à obtenir des nouvelles valeurs désirées de v et de h .

Dans l'intervalle de temps $[t_0, t_1 = 5 \text{ min}]$, quand le système fonctionne en régime stationnaire, les valeurs des paramètres et des variables d'état ne changent pas et correspondent à:

$$\begin{aligned}
 v &= 1,3 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\
 h &= 5,0 \text{ (m)} \\
 Q_{ve} &= 0,04 \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)} \\
 A_r &= 1,0 \text{ (m}^2\text{)} \\
 A_t &= 0,0314 \text{ (m}^2\text{)} \\
 L &= 300,0 \text{ (m)} \\
 D &= 0,02 \text{ (m)} \\
 f &= 0,006 \text{ (adimensionnel)} \\
 K_P &= 60,0 \text{ (adimensionnel)}
 \end{aligned}$$

A l'instant $t = 5 \text{ min}$, la valeur désirée de Q_{ve} est modifiée: $Q_{ve} = 0,06 \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$, et maintenue constante dans le temps qui reste.

A l'instant $t = 5 \text{ min}$, la valeur désirée de K_P est modifiée: $K_P = 135$, et maintenue constante dans le temps qui reste.

En présence de ces changements, les variables d'état (h et v) changent. A partir de l'intégration des équations (3.13) et (3.14), on obtient $h(t)$ et $v(t)$ comme des fonctions du temps. Les Figures 3.18 et 3.19 présentent les résultats des simulations correspondant aux deux scénarios.

Les scénarios (1) et (2) simulés, peuvent être représentés à partir des relations entre les "contributions" et les "influences" modélisées dans la Figure 3.17. Cela peut être fait à partir d'une représentation symbolique.

Soit $x(0) = x^i$ la valeur initiale ($t = 0$) d'une grandeur $g(t)$, d'une grandeur G ou

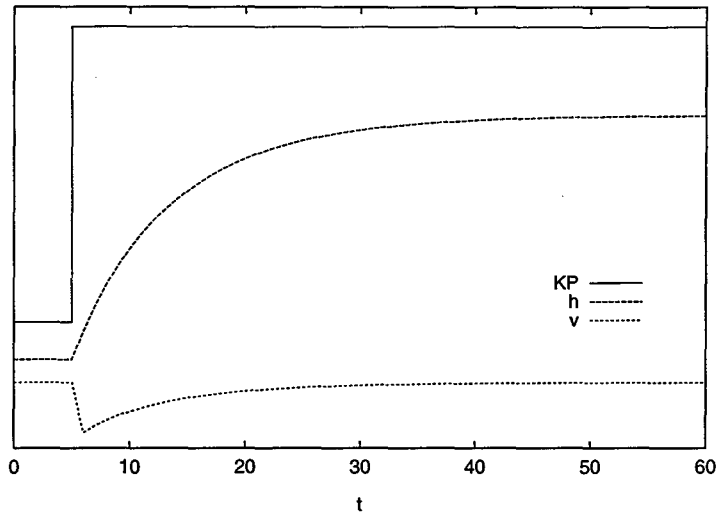


FIG. 3.19 - Simulation du scénario (2), avec le changement du coefficient de perte de charge du courant de sortie.

d'une quantité S . Etant donné un état $x(t)$, où $t > 0$, considérons la variable d'écart $\delta x = x(t) - x(0)$. Alors, les symboles x^+ , x^- et x^0 représentent les situations où, à un instant $t > 0$, $\delta x > 0$, $\delta x < 0$ et $\delta x = 0$ (respectivement).

En adoptant cette représentation symbolique, on présente, dans la Figure 3.20, des relations entre les "influences" et "contributions", concernant le fonctionnement du réservoir, correspondant aux scénarios (1) et (2).

Par ailleurs, la masse totale et la quantité de mouvement (Exemple 3.1, équations (3.13) et (3.14)) sont caractérisées, respectivement, par les variables h et v . Ainsi, dès que h et v sont mesurées, des faits observables, représentés par les symboles h^+ , h^- , h^0 , v^+ , v^- et v^0 , peuvent être associés, respectivement, aux "contributions" définies à partir de la représentation symbolique de ces quantités fondamentales. D'une façon similaire, dès que Q_{ve} et K_P peuvent être mesurées, on peut associer des faits observables aux "influences" définies à partir de celles-ci (Figure 3.20).

Supposons, maintenant, qu'à partir de la représentation des relations entre les faits observés, "influences" et "contributions", concernant le fonctionnement du réservoir, on puisse établir les causes qui provoquent les faits.

Alors, dans le scénario (1), et à l'instant $t = 10$ min (Figure 3.18), à partir des mesures de h (représentée dans la Figure 3.20 par h^+) et de Q_{ve} (représentée par Q_{ve}^+), l'"influence" représentée par Q_{ve}^+ est établie comme cause possible.

D'un autre côté, supposons qu'un spécialiste, dans une situation réelle qui correspond au scénario (2) simulé, procède à l'analyse de la mesure de v . A un même instant équivalent $t = 10$ min, il détermine comme cause possible, à partir de ses connaissances, le phénomène associé à la valeur de K_P (le frottement du fluide contenu dans la conduite de sortie) (Figure 3.21).

Alors, dès que l'on considère l'indépendance des faits v^- et h^+ , les résultats des deux analyses sont valables. La détermination des causes Q_{ve}^+ ou K_P^+ n'est, en principe, pas

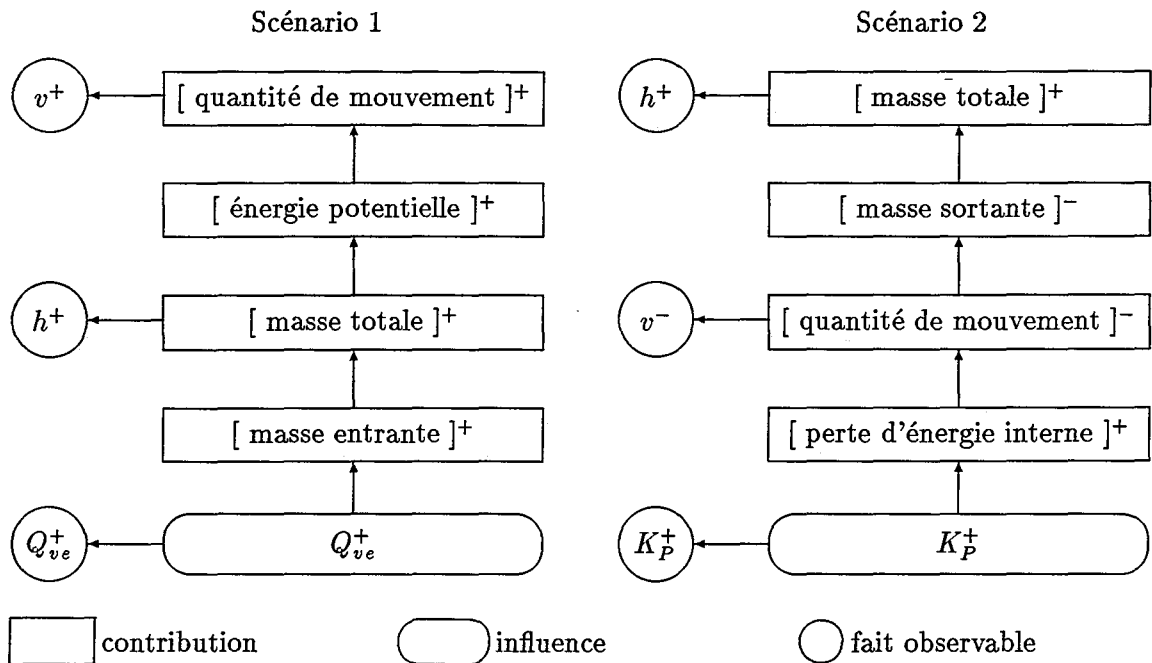
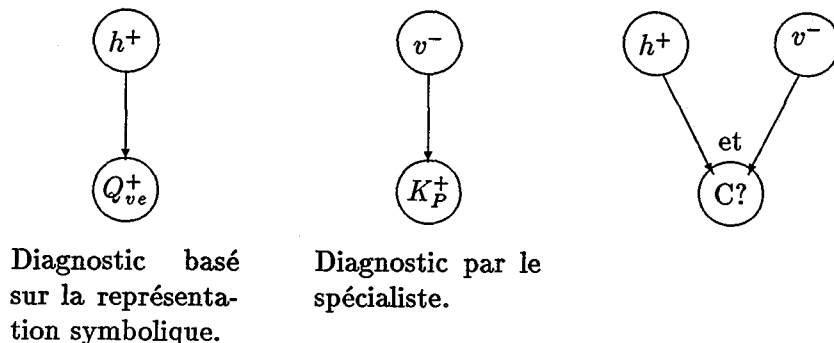


FIG. 3.20 - Représentation qualitative des relations entre les "faits", "influences" et "contributions", correspondant aux scénarios (1) et (2).

conditionnée par un rapport entre les faits h^+ et v^- . Effectivement, les circonstances, illustrées par les scénarios (1) et (2), où les effets sont produits, sont distinctes :

- dans le premier scénario les "influences" sont définies par une augmentation de la valeur de Q_{ve} , la valeur de K_P étant maintenue constante;
- dans le scénario (2), les "influences" sont définies par une augmentation de la valeur de K_P , la valeur de Q_{ve} étant maintenue constante .

D'un autre côté, ces circonstances doivent être prises en compte dès qu'on cherche à établir un rapport entre les faits. Ainsi, lorsqu'on cherche à déterminer une seule cause qui



Diagnostic basé sur la représentation symbolique.

Diagnostic par le spécialiste.

FIG. 3.21 - Circonstances, concernant le fonctionnement du réservoir, dans lesquelles les relations entre les causes et les faits sont considérées.

caractérise la dépendance de h^+ et v^- , les relations qui décrivent les scénarios (1) et (2) doivent être considérées. Par exemple, la dépendance entre les faits h^+ et v^- est donnée, dans la représentation correspondante au scénario (2), par “l’influence” représentée par K_p^+ (Figure 3.20).

A partir de cette représentation, le spécialiste, qui d’abord ne détient pas la connaissance du rapport entre h^+ et v^- , peut, à partir des connaissances sur lesquelles le modèle est fondé, établir la liaison entre ces deux “faits”. Cette connexion est donnée par la connaissance des relations entre les “contributions”. Dans le modèle (Figure 3.20), la “contribution” définie par [masse totale]⁺ opère comme effet autant de la masse sortante définie par la valeur du terme $(A_i/A_r)v$ que de la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie.

3.5 Conclusions

De ce qui précède, il est possible de déduire que les concepts “d’influence”, de “contribution” et de “relation” proposés constituent un moyen d’établir des relations formelles entre les éléments d’une représentation symbolique du fonctionnement des procédés. Cela permettrait aux spécialistes de partager leurs connaissances. Un spécialiste, pour améliorer ses connaissances, peut s’appuyer sur celles composant un modèle créé par un autre spécialiste.

Toutefois, l’application d’un modèle basé sur cette représentation est limitée aux circonstances où le fonctionnement correspond au processus conduisant à la réalisation d’objectifs fixés.¹ Le modèle n’est pas, par conséquent, adapté au diagnostic du dysfonctionnement des procédés. Cette limitation est due au fait que la considération de l’influence des composants sur l’activité du système est associée à un rapport entre les valeurs *fixées* à un instant t et les valeurs *fixées* correspondant à un état initial $x(0)$.

Par ailleurs, ces influences peuvent être prises en compte à partir de l’impact d’un état $x(t)$ sur la *qualité* des résultats souhaités. Dans cette perspective, on prend en compte le fonctionnement réel du système, où l’interaction des composants est exposée à des perturbations.

¹On peut associer ce processus au principe sur lequel sont fondées les “représentations fonctionnelles” (Kumar 1994), (Chandrasekaran 1994), (Sticklen et McDowell 1995), (Iwasaki 1995).

Chapitre 4

Définition des connaissances qualitatives

4.1 Définition des objectifs

Comme on l'a vu précédemment, le comportement d'un système industriel est conditionné par les facteurs concourant à la réalisation des objectifs fixés. Cette relation est une fonction de l'interaction des composants, de manière à ce que le comportement de chacun des composants soit un facteur qui détermine le comportement désiré des autres.

Ainsi, la représentation des faits, en tant qu'objectifs, est rapportée essentiellement à des valeurs désirées, définies à partir de la considération de l'interaction des composants. Selon ce que nous avons proposé, la représentation de la structure des relations entre ces valeurs est basée:

- sur la considération d'un contexte physique défini par les valeurs fixées (représentée à partir du concept "d'influence"), favorable à la réalisation des objectifs fixés;
- sur la considération des phénomènes déterminés par ce contexte (représentée à partir du concept de "contribution");
- sur la considération du processus pour la réalisation des objectifs (représentée à partir du concept de "relation").

Cette représentation est obtenue à partir d'une réflexion réalisée par des spécialistes. Cette réflexion concerne essentiellement l'application des principes de conservation, énoncés par les lois fondamentales, dans un contexte physique donné. Les quantités considérées sont théoriques, ce qui signifie qu'on ne considère que des situations idéales, où les conflits sont inexistantes, et où des résultats sont obtenus à partir de valeurs idéalement présentes.

La question à examiner, maintenant, est rapportée au fonctionnement réel du système, où l'interaction des composants est exposée à des perturbations. Alors, dans le processus de représentation, les principes de conservation doivent s'appliquer à un contexte physique qui se précise dans des circonstances où les perturbations sont présentes.

Cela nous amène à un examen du fonctionnement du système dans une nouvelle perspective. Les "faits", qui d'abord étaient caractérisés par des valeurs désirées, sont maintenant caractérisés par des critères, à partir desquels une qualité du fonctionnement est

définie. Ces critères sont établis, dans un premier temps, dans le cadre d'un cahier des charges général. Les objectifs, rapportés à ce cahier des charges, concernent:

- la satisfaction d'un ensemble d'exigences générales, d'ordre technique, économique et social;
- un ensemble de conditions générales, dont dépend le processus tendant à la satisfaction des exigences.

4.1.1 Résultats souhaités

Le fonctionnement d'un système industriel doit satisfaire un ensemble d'exigences rapportées à des aspects généraux d'ordre technique, économique et social. A partir de ces exigences, une qualité des résultats est définie. Sur cette qualité va se baser la conception, la conduite et la maintenance du système. Parmi les exigences d'ordre général et certains résultats souhaités, on peut citer:

Sécurité: la conduite sûre d'un procédé constitue une exigence fondamentale pour le bien-être du personnel et pour la continuité de l'apport économique. Les pressions de fonctionnement, les températures, les concentrations, ainsi que d'autres variables, doivent être maintenues à l'intérieur d'une plage opératoire fixée. Par exemple, la pression à l'intérieur d'un réacteur peut être limitée par une valeur maximale, au-dessus de laquelle la sécurité de l'installation ne peut pas être assurée. Également, le développement de mélanges explosifs doit être empêché.

Spécifications de production: une installation doit produire des produits finaux en certaines quantités souhaitées dans une qualité souhaitée. Par exemple, une production de 100 tonnes/jour d'éthylène, avec 99,5 % de pureté, est fixée.

Réglementations de l'environnement: la législation nationale et régionale spécifie des limites que ne peuvent pas dépasser les températures, les concentrations chimiques et les flux des décharges des installations dans l'environnement. Ces réglementations sont définies, par exemple, pour la quantité de SO_2 délivrée dans l'atmosphère ainsi que pour la qualité de l'eau déchargée dans les lacs et rivières.

Restrictions opératoires: le fonctionnement de divers équipements d'une installation est limité par des valeurs que peuvent atteindre certaines variables. Par exemple, certaines valeurs de la pression à l'entrée des pompes doivent être maintenues, les réservoirs ne peuvent pas déborder ou être vidés, les colonnes de distillation ne peuvent pas être noyées, la température dans un réacteur catalytique ne peut pas excéder une limite supérieure afin d'éviter la destruction du catalyseur.

Economiques: la production doit être en conformité avec les conditions du marché, c'est-à-dire, avec l'offre des matières premières et avec la demande des produits finis. Le fonctionnement de l'installation doit être aussi économique que possible dans l'utilisation des matières premières, de l'énergie, du capital et du travail. On doit satisfaire des niveaux optimaux de coût opératoire minimal, profit maximal, etc.

4.1.2 Conditions nécessaires

Le fonctionnement des systèmes dépend de certaines conditions climatiques, autant que d'autres paramètres. Eventuellement, des facteurs tels que les valeurs de la pression atmosphérique, de l'humidité relative de l'air ou de la température de l'environnement externe à une installation ne peuvent pas excéder certaines limites, en dehors desquelles l'obtention des résultats souhaités n'est pas assurée.

D'un autre côté, l'obtention des résultats souhaités dépend des conditions liées aux installations, à son activité, et à son personnel. Ces conditions sont rapportées aux caractéristiques associées à la nature des composants du système, à la valeur de certaines variables qui caractérisent l'état des produits en transformation, et à l'activité du personnel. Par exemple, la valeur de propriétés géométriques ou mécaniques, de la composition chimique, ainsi que la valeur de certains coefficients associés à la nature des composants, doit être conforme aux spécifications. Les valeurs des variables telles que la pression ou la température des éléments qui sont en transformation doivent également se trouver à l'intérieur de certains intervalles spécifiés.

Ce sont des exemples d'un nombre important de conditions qui, prises en compte dans la conception, maintenance et conduite des procédés, sont nécessaires pour l'obtention des résultats souhaités. Ces conditions peuvent être définies à partir:

- des propriétés liées à la structure matérielle et à la nature des composants des installations;
- des propriétés liées à la nature des éléments en transformation.
- des propriétés, à partir desquelles est caractérisé l'état physique des composants, des éléments en transformation, et de l'environnement;
- des effets sur ces propriétés, déterminés par le traitement de l'information.

Les conditions définies par les propriétés liées à la structure matérielle et à la nature des composants des installations, comme à la nature des éléments en transformation, seront désignées par *conditions matérielles*.

Les conditions définies par l'état physique des composants, des éléments en transformation et de l'environnement, seront désignées par *conditions de fonctionnement*.

Les conditions déterminées par les interventions sur le procédé, à partir du traitement de l'information, seront désignées par *conditions opératoires*.

Les conditions matérielles, de fonctionnement ou opératoires, seront désignées, d'une manière générale, par *conditions nécessaires*.

On peut approcher l'activité des composants du système à partir de cette classification. Alors, un composant peut être caractérisé à partir de ses aspects matériels, et à partir des aspects liés aux résultats de son interaction avec d'autres composants. De la même façon, un ensemble de composants peut être caractérisé autant à partir des aspects matériels des éléments qui le composent qu'à partir des aspects liés aux résultats de l'interaction des éléments.

D'une manière générale, on peut représenter la structure au sein de laquelle interagissent les éléments d'un système industriel à partir d'une structure élémentaire, composée par les relations entre ces aspects (Figure 4.1).

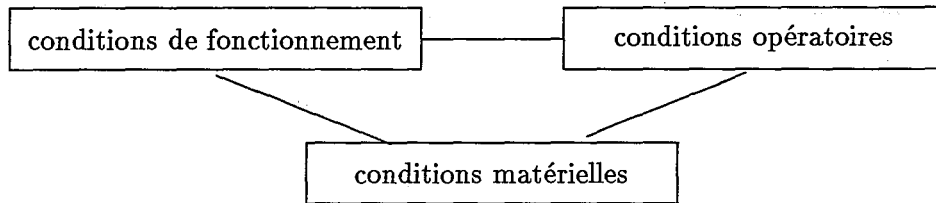


FIG. 4.1 - Conditions nécessaires.

4.2 Satisfaction des exigences

Comme on l'a vu, la définition des objectifs du système est faite dans le cadre d'un cahier de charges général. Dans ce cahier des charges, des exigences sont précisées, comprenant la spécification d'un ensemble de clauses générales dont dépend la validité des objectifs. Les clauses de cet ensemble comprennent, d'un côté, la définition des circonstances dans lesquelles les phénomènes physiques ont lieu en présence des perturbations. D'un autre côté, les clauses du cahier des charges comprennent l'accomplissement du processus de production en conformité avec une qualité concernant les résultats souhaités.

Alors, en utilisant le concept "d'influence" précédemment proposé, la considération des conditions nécessaires est faite par rapport aux valeurs fixées, favorables à l'obtention d'une qualité des résultats. En même temps, à partir du concept de "contribution", la considération des conditions nécessaires est faite en fonction d'une qualité des résultats, définie par l'état des composants résultant de leur interaction. D'une manière générale, les conditions nécessaires sont rapportées à ces deux aspects pris en compte simultanément.

Dans cette perspective, la représentation d'une condition nécessaire concerne la considération des résultats de l'activité des composants simultanément comme une "influence" et comme une "contribution". De cette manière, les conditions nécessaires sont représentées à partir des facteurs qui dépendent de l'état des composants du système qui, au cours du temps, sont favorables à la satisfaction des exigences. En vue du diagnostic technique, le processus tendant à la satisfaction des exigences est représenté à partir de la connaissance physique que l'on a des phénomènes qui se précisent dans des circonstances où les perturbations sont présentes.

Ainsi, à partir du concept de "relations", on peut représenter le processus au sein duquel la satisfaction des exigences est recherchée. Les "relations" sont établies par le rapport entre les grandeurs considérées dans la représentation des connaissances, auxquelles une qualité est attribuée.

Du point de vue des "influences" les faits sont définis par les valeurs, au cours du temps, qui correspondent à l'état des composants favorable à la réalisation des objectifs. Du point de vue des "contributions", ces valeurs sont celles qui sont en conformité avec une qualité préalablement définie pour les effets de l'interaction des composants (Figure 4.2).

La définition de la qualité du fonctionnement du système est faite en considérant l'effet des perturbations. Cette qualité est fixée en attribuant certaines limites à ces effets. Ces limites sont établies en fonction de plusieurs critères comme, par exemple, les restrictions de fonctionnement des équipements et les limites opérationnelles des systèmes de com-



FIG. 4.2 - Processus tendant à la satisfaction des exigences.

mande. Alors, à cause de l'effet des perturbations, l'altération des conditions nécessaires peut impliquer une perte de la qualité souhaitée.

Dans cette perspective, l'analyse technique d'intérêt est rapportée, essentiellement, aux modifications de l'état du système et de ses constituants ainsi qu'à leur dépendance. Ainsi, les connaissances liées à la qualité du fonctionnement sont représentées à partir :

- de la définition des conditions nécessaires du point de vue d'une qualité, associée à des états favorables;
- de l'altération des conditions du point de vue de la perte de la qualité, associée à des états non favorables;
- de la maintenance des conditions déterminée par des interventions sur le fonctionnement à partir du traitement de l'information.

4.2.1 Les conditions en tant qu'état favorable

La représentation des conditions nécessaires, du point de vue d'une qualité définie par l'état des composants, est basée sur le concept "d'influence". Dans ce cas, la problématique concerne l'analyse des activités associées aux causes. Par ailleurs, ces causes sont rapportées aux activités à partir desquelles les résultats souhaités sont obtenus. Donc, dans un deuxième temps, la représentation des conditions, en tant qu'état favorable, doit être faite en fonction d'une qualité fixée pour les effets.

Cela nous amène à revoir le concept d'influence, tel comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent. La représentation qualitative de l'influence des composants sur l'activité du système n'est plus associée à un rapport entre les valeurs fixées à un instant t et les valeurs fixées correspondant à un état initial $x(0)$. Une influence est représentée en fonction de l'impact d'un état $x(t)$ sur la qualité des résultats souhaités. Ces critères de qualité sont définis en fonction des circonstances dans lesquelles la qualité des effets de l'interaction des composants est satisfaite.

D'un autre côté, comme on l'a vu, la qualité fixée pour les effets peut concerner autant la satisfaction d'une exigence générale qu'une condition qui n'est pas explicitement définie dans le cahier des charges. Dans le premier cas, l'analyse des phénomènes, à partir desquels les causes sont définies, est immédiatement précisée par l'exigence en question. Dans le deuxième cas, le problème est plus complexe, car on doit prendre en compte les phénomènes physiques rapportés à la propagation de la perturbation dans le système.

Alors, la définition d'une condition nécessaire dépend de la considération de la dynamique du système, en présence de perturbations, dans les contextes représentés par les relations de cause et d'effet. On doit considérer, dans un premier temps, la sensibilité des effets par rapport aux causes. Cela nous permet de déterminer, d'abord, quels sont les résultats nécessaires pour la satisfaction des exigences générales.

Une fois que ces résultats sont fixés, on peut procéder à l'examen de quelles sont les causes qui interviennent dans l'obtention de ces résultats.

Cette analyse dépend de la considération de plusieurs aspects liés au fonctionnement, dont on peut citer ceux qui sont rapportés à la stabilité du système face à certaines perturbations. D'autres aspects sont liés directement à l'intérêt porté à certaines variables du procédé, c'est-à-dire qu'il s'agit d'examiner l'impact de la perturbation sur le comportement de la variable d'intérêt.

Exemple 4.1

L'analyse du comportement dynamique des procédés chimiques typiques nous permet d'examiner comment le système réagit aux perturbations. En ce qui concerne les aspects rapportés à la stabilité du système, on présente le cas classique du comportement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité (CSTR). D'abord, on introduit quelques notions liées à la stabilité du fonctionnement des systèmes (Stephanopoulos 1984).

Systèmes auto-régulés

Considérons le comportement d'une variable x présenté dans la Figure 4.3, et supposons que cette variable caractérise un résultat souhaité. A l'instant $t = t_0$, le système est perturbé. A partir de cet instant la valeur de x change. Au fur et à mesure que le temps avance, elle retourne naturellement à la valeur qu'elle avait avant la perturbation, et reste à nouveau stable dans cette valeur.

Considérons, alors, une autre variable y présentée dans la même Figure 4.3, qui caractérise aussi un résultat souhaité du système. A partir de l'instant $t = t_0$ la variable y change, en caractérisant l'effet d'une perturbation à laquelle le système est exposé. Cependant, au fur et à mesure que le temps avance la valeur de y ne retourne pas à la valeur initiale, mais se stabilise à une nouvelle valeur.

Dans ces deux cas, on dit que le procédé est *auto-régulé* par rapport à la perturbation en question, puisqu'il réagit à cette perturbation en trouvant naturellement un état où la valeur de la variable qui caractérise le résultat souhaité tend vers un état d'équilibre. Dans le premier cas ci-dessus on dit que le procédé fonctionne dans un état *d'équilibre stable*, et dans le deuxième cas, dans un état *d'équilibre instable* par rapport à la perturbation. Un système auto-régulé signifie qu'il atteint seul un certain état d'équilibre.

Systèmes qui ne sont pas auto-régulés

Considérons alors, dans la Figure 4.4, le comportement d'une variable z en caractérisant aussi un résultat souhaité du système. à l'instant $t = t_0$, quand le système est exposé à une perturbation, la valeur de z change. Alors, contrastant avec les comportements des systèmes auto-régulés, le système ne tendra pas vers un nouvel état où la valeur de la variable z reste stable. Les systèmes qui présentent des comportements représentés par les courbes A, B ou C dans la Figure 4.4, *ne sont pas auto-régulés*, car ils réagissent aux perturbations sans trouver naturellement un nouvel état d'équilibre.

Le fonctionnement du réacteur

Considérons que, dans un réacteur idéal continu parfaitement agité, a lieu une réaction exothermique irréversible $A \rightarrow B$. La chaleur libérée par la réaction est prélevée par un

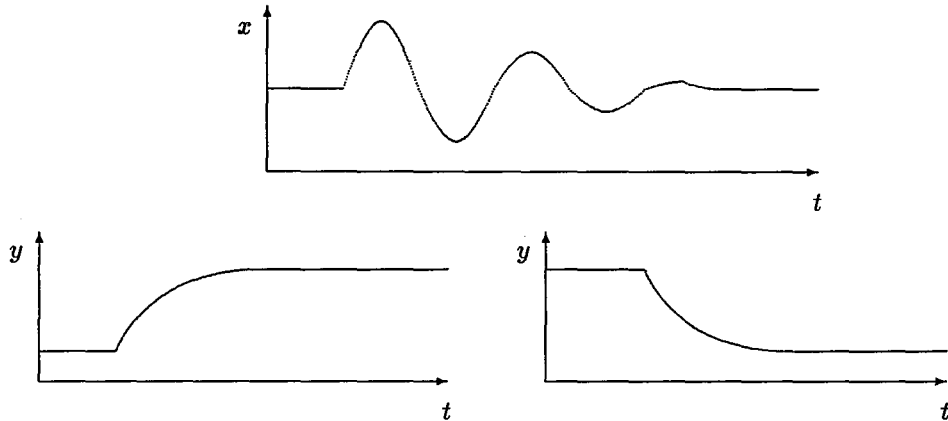


FIG. 4.3 - Systèmes auto-régulés fonctionnant dans un état d'équilibre stable ou instable.

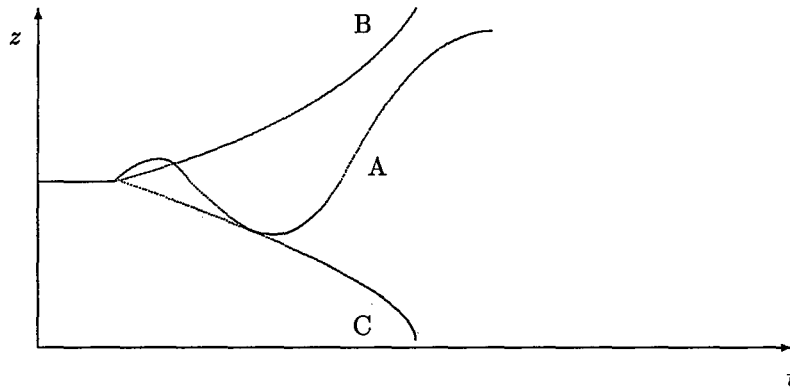


FIG. 4.4 - Systèmes qui ne sont pas auto-régulés.

fluide caloporteur qui circule dans la double enveloppe. Le débit volumique Q_{vj} et la température à l'entrée T_{ej} du fluide caloporteur sont maintenus constants.

A partir de l'analyse des systèmes CSTR (Figure 4.5), pour certaines réactions exothermiques dont la vitesse augmente avec la température mais qui présentent une limitation à température élevée et conversion élevée, la courbe qui décrit la chaleur libérée par la réaction exothermique est une fonction sigmoïdale de la température T du mélange à l'intérieur du réacteur. D'un autre côté, la chaleur prélevée par le fluide caloporteur est une fonction linéaire de cette même température (droite B dans la Figure 4.5).

Le bilan d'énergie du système est fourni par l'expression:

$$\text{chaleur accumulée} = \left[\begin{array}{l} \text{chaleur} \\ \text{entrante} \end{array} - \begin{array}{l} \text{chaleur} \\ \text{sortante} \\ \text{du mélange} \end{array} + \begin{array}{l} \text{chaleur} \\ \text{générée} \end{array} \right] - \text{chaleur prélevée} \quad (4.1)$$

Si le système est en état d'équilibre énergétique, le terme qui correspond à l'accumu-

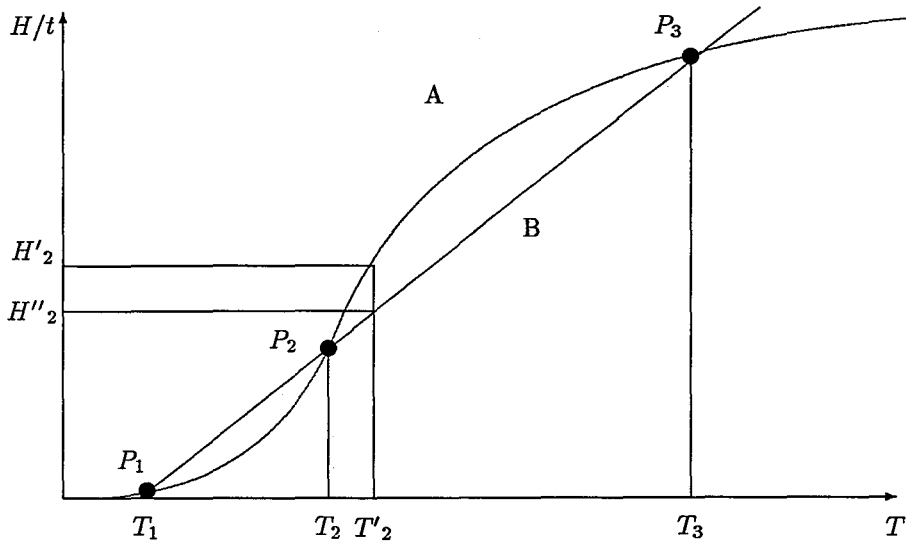


FIG. 4.5 - Points d'équilibre du fonctionnement d'un réacteur CSTR (idéal).

lation d'énergie à l'intérieur du réacteur doit être nul, d'où :

$$\begin{array}{rcccl} \text{chaleur} & & \text{chaleur} & & \\ \text{entrante} & - & \text{sortante} & + & \text{chaleur} & = & \text{chaleur} \\ \text{du mélange} & & \text{du mélange} & & \text{générée} & = & \text{prélevée} \end{array} \quad (4.2)$$

Dans la Figure 4.5, la courbe A décrit le résultat de l'expression à gauche de l'équation (4.2) ci-dessus, en étant une fonction sigmoïdale de la température T du mélange à l'intérieur du réacteur. La droite B décrit la chaleur prélevée par la double enveloppe; en étant une fonction linéaire de la température T . Sur cette courbe, on peut déterminer trois points où le système fonctionne en état d'équilibre. Ces points sont déterminés par l'intersection de la courbe A et la droite B (points P_1 , P_2 et P_3 dans la Figure 4.5). Les états correspondants aux points P_1 et P_3 sont des états d'équilibre stable, tandis que l'état correspondant au point P_2 est instable.

Si une perturbation pas trop importante est effectuée autour de P_1 ou P_3 , le réacteur revient en P_1 ou P_3 (respectivement). Si une perturbation importante est effectuée en P_2 , le réacteur va en P_1 ou en P_3 selon le type de perturbation.

Le fonctionnement du réacteur en un point d'équilibre instable

Examinons le fonctionnement du réacteur en régime stationnaire, dans l'état d'équilibre instable qui correspond au point P_2 (Figure 4.5). Supposons qu'il est possible d'amener le réacteur à fonctionner avec une température du mélange $T = T_2$ et avec une concentration de réactif à l'intérieur du réacteur $C_A = C_{A2}$. Cette concentration caractérise un résultat souhaité du système.

Considérons alors que, à cause d'une perturbation, la température à l'entrée du réacteur augmente. Le système réagit à ce changement en quittant de son état d'équilibre

(instable), correspondant au point P_2 , et évolue naturellement en atteignant, éventuellement, l'état d'équilibre correspondant au point P_3 (température du mélange $T = T_3$), correspondant à une nouvelle valeur de la concentration de réactif à l'intérieur du réacteur.

Pour autant que le système ne subit l'influence d'aucune perturbation, le fonctionnement du réacteur reste dans l'état d'équilibre instable. Le résultat souhaité, c'est-à-dire, la concentration de réactif à l'intérieur du réacteur, est maintenue constante au cours du temps. Cependant, dès que, par exemple, une légère augmentation de la température T_e à l'entrée a lieu, et que ce changement reste, le système sort de son état d'équilibre, en occasionnant le changement progressif de la valeur de la concentration du réactif à l'intérieur du réacteur. Cette concentration diminue jusqu'à l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre.

En fait, à l'augmentation de T_e est associée l'augmentation de la valeur de l'expression à gauche de l'équation (4.2). Ce changement provoque une augmentation de l'enthalpie totale du système, caractérisée par l'augmentation de la température T du mélange.

Dans ces conditions, la valeur de l'expression à gauche de l'équation (4.2) est supérieur à la chaleur prélevée par la double enveloppe (dans la Figure 4.5, voir les points sur la courbe A et sur la droite B, déterminés par T'_2 , Q'_2 et Q''_2). La température du mélange tend à augmenter et, par conséquent, la vitesse de la réaction augmente. Toutefois, plus grande est la vitesse de la réaction, plus grande est la conversion de réactif en produit. Il arrive, donc, un moment, où la concentration de réactif et la température à l'intérieur du réacteur sont telles que le système retrouve l'équilibre.

Le fonctionnement de ce type de réacteur dans un état d'équilibre instable est souvent souhaité. Parmi les raisons, on peut citer:

- (1) le fonctionnement dans l'état d'équilibre stable correspondant à une basse température produit une faible conversion de réactif en produit, et
- (2) en présence de perturbations, le fonctionnement dans l'état d'équilibre stable correspondant à une haute température peut occasionner des conditions de sécurité non recommandables.

En ce qui concerne l'effet du changement de la température T du mélange à l'intérieur du réacteur, deux aspects du fonctionnement du procédé sont impliqués:

- l'abandon du procédé de son état d'équilibre (instable), et puis
- l'évolution "spontanée" du système jusqu'à ce qu'il atteigne, éventuellement, un nouvel état d'équilibre.

Dans chacune de ces deux situations un ensemble de phénomènes est mis en évidence:

- (1) les phénomènes qui influencent l'état d'équilibre du système, et puis
- (2) les phénomènes dont dépend l'évolution de l'état du système vers un nouvel état d'équilibre.

Ainsi, dès qu'une concentration de produit est fixée, la qualité des résultats est déterminée par une seule valeur de la température du mélange à l'intérieur du réacteur, qu'il

faut maintenir constante au cours du temps. L'état du système, favorable à l'obtention des résultats souhaités, est défini par cette valeur de la température.

Dans l'équation (4.1) l'enthalpie totale du système dépend de la température du mélange à l'intérieur du réacteur. Alors, une condition, dont la stabilité du système dépend, est donnée par le changement de l'enthalpie totale du système. Dans le cas en question, l'enthalpie ne doit pas varier.

Par ailleurs, cette condition est déterminée par la valeur de la température T_e à l'entrée du réacteur. Donc, les circonstances, dans lesquelles la qualité des effets de l'interaction des composants de l'installation est satisfaite, sont définies en fonction:

- du changement au cours du temps de l'enthalpie totale du système, définie comme une "contribution" déterminée, par exemple, par le non changement de l'enthalpie entrante, et
- du non changement au cours du temps de l'enthalpie totale du système, définie comme une "influence" à partir de laquelle sont déterminés les phénomènes amenant à l'obtention de la qualité fixée pour les produits du procédé.

Exemple 4.2

Dans cet exemple, on reprend l'analyse du comportement du réservoir (Exemple 3.1), fonctionnant en régime stationnaire.

Considérons que dans le cahier des charges des installations est spécifiée la production d'un débit volumique à la sortie du réservoir, et un écart de 5 % au-dessus et de 25 % au-dessous de la valeur nominale en régime stationnaire est toléré. Le fonctionnement du système est limité par la hauteur du réservoir, laquelle ne doit pas être dépassée par le fluide stocké.

Afin de mettre en évidence le phénomène rapporté à l'inertie du fluide dans la conduite de sortie, les valeurs des variables et des paramètres des équations (3.13) et (3.14), sont remplacées. Les nouvelles valeurs nominales, en régime stationnaire, correspondent à:

$$\begin{aligned}
 v &= 1,513 \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\
 h &= 1,516 \text{ (m)} \\
 Q_{ve} &= 0,993 \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)} \\
 A_r &= 10,5 \text{ (m}^2\text{)} \\
 A_t &= 0,657 \text{ (m}^2\text{)} \\
 L &= 914,0 \text{ (m)} \\
 D &= 0,914 \text{ (m)} \\
 f &= 0,003 \text{ (adimensionnel)} \\
 K_P &= 11,99 \text{ (adimensionnel)}
 \end{aligned}$$

La hauteur maximale de fluide stocké h_{max} , tolérée dans les spécifications, est donnée par la hauteur y du réservoir, fixée à 2,5 m.

Les valeurs tolérées de la vitesse du fluide dans le courant de sortie sont comprises entre 1,13 et 1,58 m.s⁻¹.

Scénario 1

Considérons, alors, que le système fonctionne en régime stationnaire, dans les conditions nominales ($v = 1,513 \text{ m.s}^{-1}$ et $h = 1,516 \text{ m}$). A partir d'un instant $t = 0$, le

Le système est soumis à une perturbation concernant une augmentation constante de la perte de charge dans le courant de sortie (Figure 4.6). Ce changement a lieu pendant une période de 10 min, de manière qu'à la fin de cette période le coefficient K_P de la perte de charge atteint la valeur de 20,0 (adimensionnel), et reste constant au cours du temps qui reste. Cela peut être du, par exemple, à la fermeture progressive d'une vanne installée dans la conduite.

Le système réagit à cette perturbation. La masse associée au fluide stocké par le réservoir augmente et, par conséquent, l'énergie potentielle augmente. Par ailleurs, tant que la hauteur du réservoir le permet, les forces agissant sur le fluide contenu dans le courant de sortie s'annulent. Ainsi, le système se maintient prêt de l'état d'équilibre. Alors, tant que la capacité de stockage du réservoir est suffisante, le changement de la perte de charge est naturellement compensé par le changement de la force due à l'énergie potentielle.

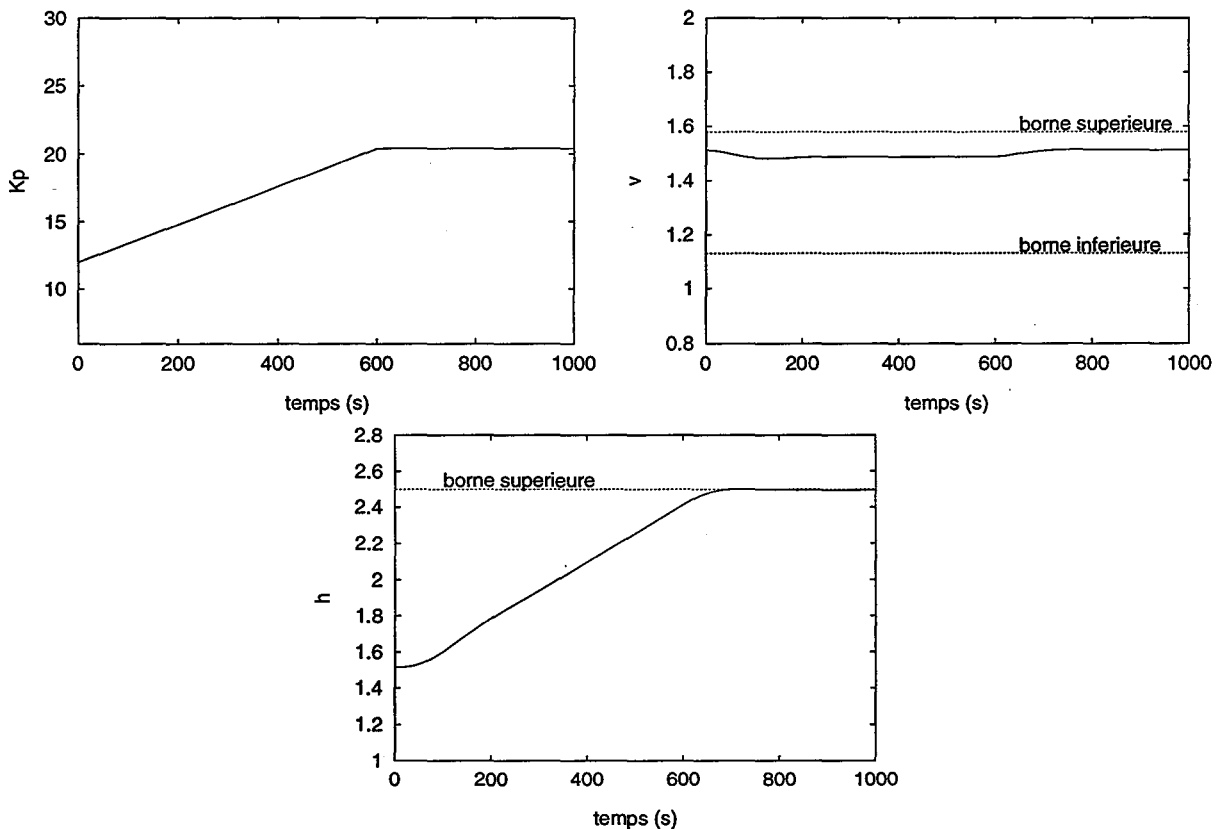


FIG. 4.6 - Exemple 4.2, scénario 1. Comportement de v et de h considérant l'augmentation lente de K_P ($\Delta K_P = 8,35$; $\Delta t = 10min$).

A partir de la Figure 4.6, on voit que les valeurs de la vitesse au cours du temps restent conformes aux critères de qualité fixés (v est toujours supérieure à la borne inférieure et h est toujours inférieure à la hauteur du réservoir).

Ainsi, pour que les exigences soient satisfaites, les points suivants sont nécessaires:

- (1) l'accroissement de la force due à l'énergie potentielle du fluide contenu dans le

réservoir, définie comme une "contribution" et une "influence" à partir desquelles l'augmentation de la perte de charge est compensée;

- (2) en tant qu'influence, une capacité de stockage du réservoir telle que les effets des perturbations puissent être compensés.

Scénario 2

Considérons, dans un deuxième scénario (Figure 4.7) l'effet de la diminution constante de la perte de charge dans le courant de sortie, rapporté à un changement pendant un même intervalle de 10 min. A la fin de cet intervalle, le coefficient K_P de la perte de charge atteint la valeur de 8,0 (adimensionnel). Du fait qu'aucune restriction n'est posée par rapport à une hauteur minimale de fluide stocké, pour que les exigences soient satisfaites, une diminution de la force due à l'énergie potentielle du fluide dans le réservoir est nécessaire, de manière que la diminution de la perte de charge soit compensée.

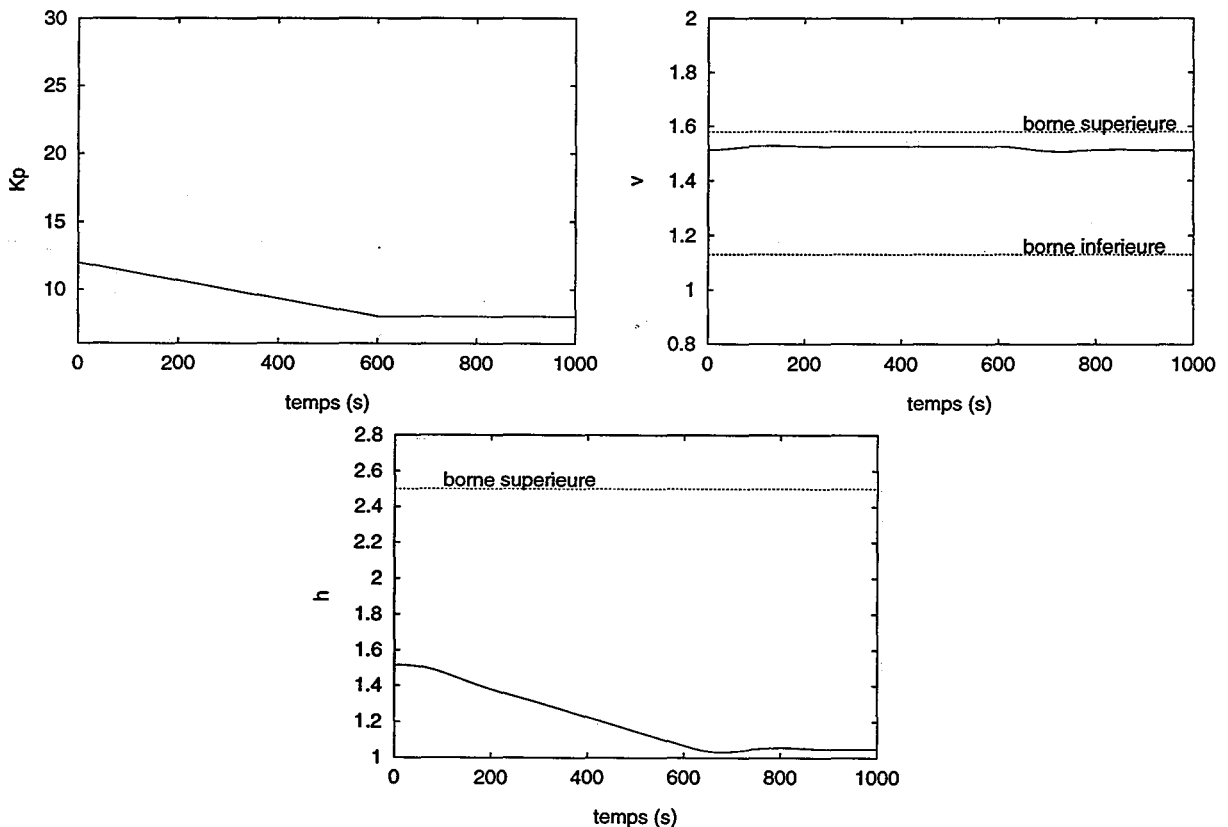


FIG. 4.7 - Exemple 4.2, scénario 2. Comportement de v et de h considérant la diminution lente de K_P ($\Delta K_P = -4, 0; \Delta t = 10min$).

Scénario 3

Finalement, examinons le fonctionnement du réservoir en présence d'une perturbation concernant l'augmentation progressive du débit de fluide à l'entrée (Figure 4.8). Ce changement est fait pendant une période de $t = 10$ min, de manière qu'à la fin de cette période

le débit Q_{ve} atteint la valeur de $1,037 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, et reste constant au cours du temps qui reste.

Dans la période qui suit le début de la perturbation, la masse accumulée dans le réservoir augmente et, par conséquent, la force due à l'énergie potentielle qui agit sur le fluide contenu dans le réservoir augmente. La résultante des forces agissant sur le fluide contenu dans le courant de sortie devient non nulle (positive). La vitesse du fluide contenu dans le courant de sortie augmente, à cause de l'augmentation de la quantité de mouvement. A la fin de la période de changement du débit à l'entrée du réservoir, la valeur de la vitesse du fluide contenu dans le courant de sortie et la hauteur de fluide stocké dans le réservoir ont des valeurs supérieures aux valeurs à l'état initial ($v_{finale} = 1,58\text{m.s}^{-1}$ et $h_{finale} = 1,65 \text{ m}$). Ces valeurs sont en conformité avec les critères de qualité fixés ($v_{max} = 1,58\text{m.s}^{-1}$ et $h_{max} = 2,5 \text{ m}$).

Alors, dans ce scénario, une seule condition pour la satisfaction des exigences est, en principe, nécessaire: des valeurs, au cours du temps, de la masse entrante dans le réservoir, telles que les valeurs de v et de h soient conformes aux valeurs acceptées.

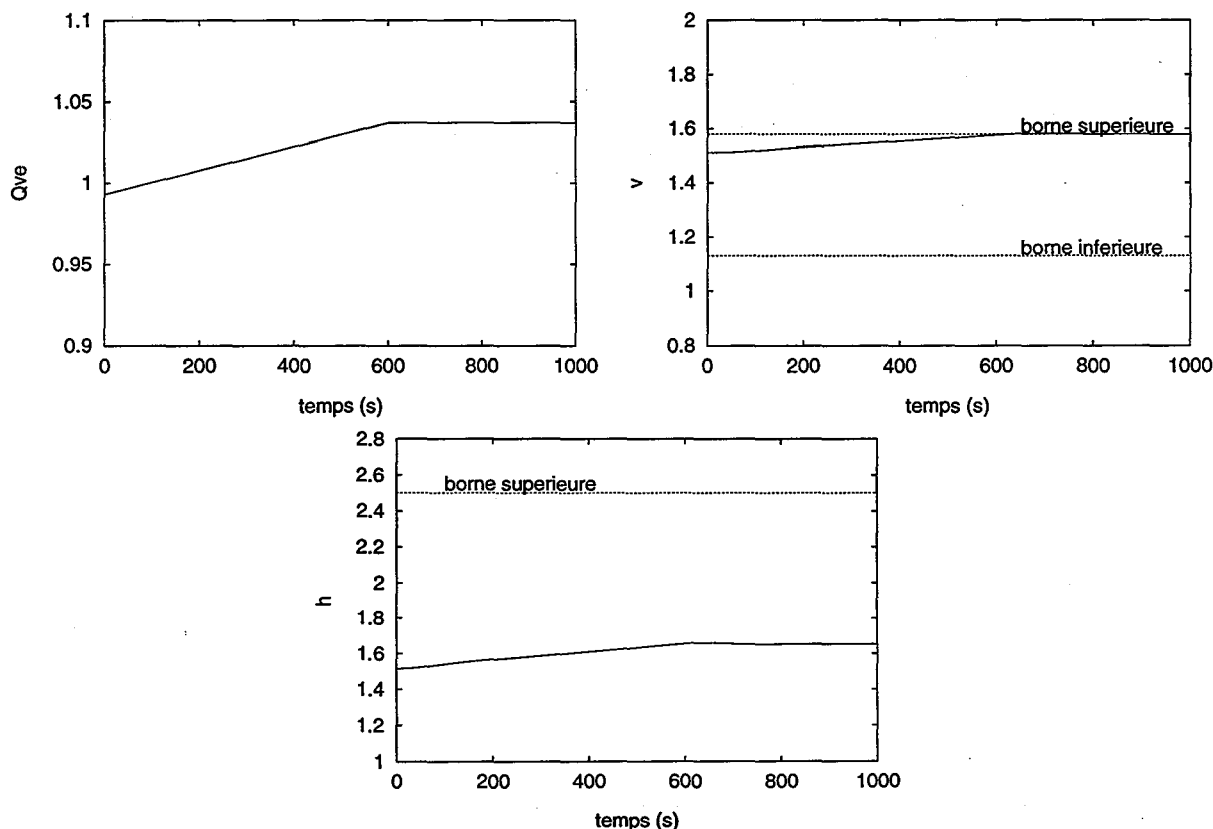


FIG. 4.8 - Exemple 4.2, scénario 3. Comportement de v et de h considérant l'augmentation lente de Q_{ve} ($\Delta Q_{ve} = 0,044$; $\Delta t = 10\text{min}$).

4.2.2 Les conditions en tant qu'état non favorable

Dans les installations réelles souvent la qualité des résultats n'est pas atteinte. Parmi les origines des perturbations, on peut citer:

- Le changement naturel des conditions rapportées à l'environnement externe. Les installations peuvent n'être pas adaptées au changement des conditions climatiques, telles que la pression atmosphérique et la température de l'air environnant, en modifiant les conditions prévues de fonctionnement.
- Le changement naturel de la structure physique des composants de l'installation et des éléments en transformation. Toutes les installations subissent une dégradation naturelle, dont l'intensité dépend des conditions générales de fonctionnement. L'usure des composants, ainsi que la formation de certains produits indésirables est inévitable. Par exemple, dans un réacteur catalytique on trouve du coke comme un produit de la réaction. Ce produit, en étant déposé sur la surface des éléments catalyseurs, modifie leurs propriétés physiques et, par conséquent, peut modifier les conditions qui permettent l'obtention des résultats prévues par leur fonction.
- Le changement naturel des conditions de fonctionnement à l'intérieur du système. Le changement naturel des conditions externes ou internes peut modifier les conditions de fonctionnement à l'intérieur des installations. Par exemple, supposons que le coke formé à l'intérieur d'un réacteur catalytique est prélevé du produit final du réacteur par un filtre en ligne. Ces impuretés, en se déposant sur l'élément filtrant, provoquent son obstruction progressive, en augmentant la perte de charge dans le courant de produit. Les conditions de fonctionnement prévues du réacteur peuvent être compromises lorsque cette perte de charge est excessive.
- Le changement des conditions dû à des interventions inadéquates sur les installations. Des actions correctives peuvent être activées sans la connaissance effective de l'origine de la perturbation. Si ces actions ne s'appliquent pas aux phénomènes concernés avec les effets de la perturbation, des conditions indésirables peuvent être créées. D'un autre côté, des perturbations produisant des effets indésirables peuvent être créées à partir d'une intervention. Par exemple, la désobstruction ou le remplacement tardif d'un élément filtrant peut provoquer une perturbation inadéquate.

Il est important de noter que ces perturbations posent un intérêt particulier dans les circonstances où les exigences ne sont pas satisfaites. Dans cette perspective, la connaissance des conditions nécessaires est acquise aussi à partir des circonstances dans lesquelles les résultats souhaités ne sont pas obtenus. L'acquisition de cette connaissance est régulée autant par la recherche des facteurs dont dépend la qualité des résultats que par la représentation du processus à partir duquel les effets sur cette qualité peuvent être expliqués. Ainsi, la connaissance des facteurs à partir desquels les états favorables pour la satisfaction des exigences sont définis peut être obtenue par exclusion, c'est-à-dire, à partir de la connaissance des circonstances dans lesquelles la perte de qualité est attribuée à un état non favorable.

La connaissance des états non favorables, caractérisant l'altération des conditions nécessaires, peut être anticipée à partir:

- de l'effet sur les résultats souhaités dû à la variation de la valeur des variables d'état ou des paramètres du système;
- de l'effet sur les résultats souhaités dû à la valeur des variables d'état ou des paramètres du système, indépendamment de l'effet dynamique dû à la variation des grandeurs à partir desquelles le procédé est modélisé;
- des limites de fonctionnement données par les caractéristiques des installations;
- de l'intégrité des constituants du système (le matériau des installations et les éléments en transformation). Cette intégrité est souvent définie à partir de la connaissance empirique des défauts.

Exemple 4.3

Dans l'exemple 4.2, on a examiné les conditions nécessaires pour l'obtention des résultats souhaités du réservoir en présence de certaines perturbations. Afin d'anticiper les effets sur la qualité des résultats, dans l'exemple en cours on examine cinq scénarios concernant l'altération de ces conditions. L'objectif est de mettre en évidence des nouvelles conditions.

Scénario 1

Dans l'exemple 4.2 on a examiné le fonctionnement du réservoir avec une augmentation constante de la perte de charge dans le courant de sortie ($\Delta K_P = 8,5$, $\Delta t = 10$ min). Considérons alors qu'au lieu de cette perturbation K_P augmente soudainement ($\Delta K_P = 8,5$, $\Delta t \simeq 0$) à partir de l'instant t_0 (Figure 4.9). A cause de cette perturbation, la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie décroît (la vitesse du fluide décroît). Cette variation provoque une diminution du débit sortant du réservoir et, par conséquent, l'augmentation de la masse de fluide dans le réservoir. La valeur de la vitesse du fluide dans le courant de sortie se maintient toujours au-dessus de la borne inférieure. Cependant, à cause de l'inertie du fluide dans le courant de sortie, la variation de la masse sortante est telle que le réservoir déborde. Le système retrouve l'état d'équilibre avec une hauteur de fluide h dans le réservoir au dessous de la borne supérieure et une valeur nominale de la vitesse du fluide ($v = 1,513$ m.s⁻¹).

L'altération des conditions nécessaires invoquées dans l'Exemple 4.2 ($\Delta K_P = 8,5$; $\Delta t = 6$ min) comprend:

- un *taux d'accroissement* de la force due à la perte d'énergie interne du fluide contenu dans le courant de sortie *excessif*;
- une masse de fluide stockée dans le réservoir *inadéquante* (le débordement du réservoir).

Dans le scénario présent, l'altération de ces conditions met en évidence des faits nouveaux:

- un *taux de décroissement* de la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie *excessif*;
- un *taux de décroissement* de la masse sortante du réservoir *excessif*;
- un *taux d'accroissement* de la masse stockée dans le réservoir *insuffisant* (puisque le taux d'augmentation de la hauteur de fluide dans le réservoir n'est pas suffisant pour que la force due à l'énergie potentielle puisse compenser l'augmentation de la force due à la perte d'énergie interne);
- un *taux d'accroissement* de la force due à l'énergie potentielle du fluide contenu dans le réservoir *insuffisant*.

Alors, quatre nouvelles conditions sont nécessaires:

- un *taux de décroissement* normal (non excessif) de la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie;
- un *taux de décroissement* normal (non excessif) de la masse sortante du réservoir;
- un *taux d'accroissement* normal (suffisant) de la masse stockée dans le réservoir;
- un *taux d'accroissement* normal (suffisant) de la force due à l'énergie potentielle du fluide contenu dans le réservoir.

Scénario 2

Dans un deuxième scénario, considérons le fonctionnement du réservoir en présence d'une perturbation concernant le changement soudain de la perte de charge dans le courant de sortie, cette fois en atteignant une valeur supérieure à celle du premier scénario ($\Delta K_P = 28,0$; $\Delta t \simeq 0$) (Figure 4.10). Le réservoir déborde. Cependant, le système retrouve l'état d'équilibre avec une valeur de la vitesse au-dessous de la borne inférieure ($v < 1,13 \text{ m.s}^{-1}$). Du fait que la hauteur de fluide stocké h est limitée par la hauteur du réservoir y , la force due à l'énergie potentielle n'est pas suffisante pour compenser l'augmentation de la force due à la perte d'énergie interne du fluide dans le courant de sortie.

L'altération des conditions nécessaires invoquées dans l'exemple 4.2 ($\Delta K_P = 8,5$; $\Delta t = 6 \text{ min}$) comprend:

- une force, due à la perte d'énergie interne du fluide contenu dans le courant de sortie, *excessive*
- l'*accroissement* de la force, due à l'énergie potentielle du fluide contenu dans le réservoir, *insuffisant* (puisque la hauteur de fluide nécessaire pour compenser l'excès de perte de charge est supérieure à la hauteur du réservoir);
- l'*accroissement* de la masse de fluide stockée dans le réservoir *excessif* (le débordement du réservoir).

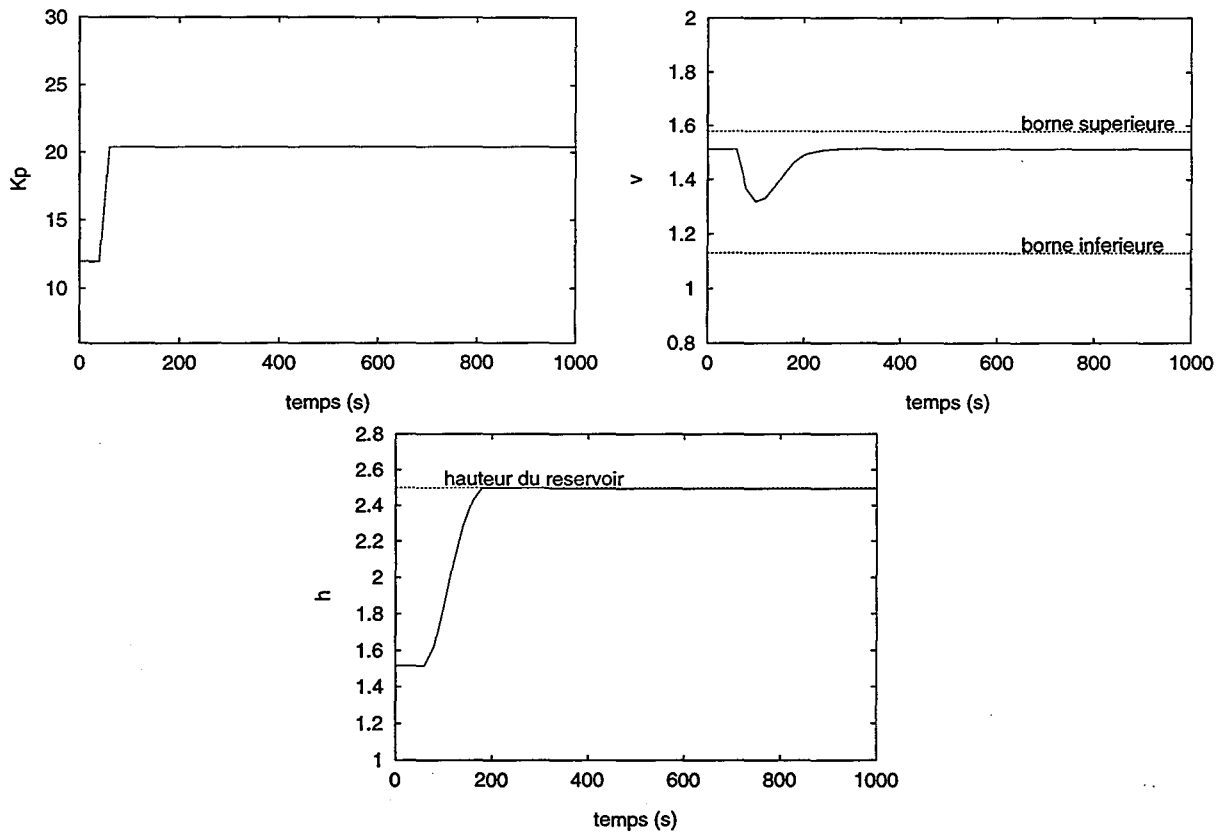


FIG. 4.9 - Exemple 4.3, scénario 1. Comportement de v et de h considérant l'augmentation rapide de K_P ($\Delta K_P = 8,5$; $\Delta t \simeq 0$).

Dans le scénario présent, l'altération de ces conditions met en évidence un fait nouveau: une valeur insuffisante de la quantité de mouvement du système.

Une nouvelle condition nécessaire est mise en évidence: une valeur normale (suffisante) de la quantité de mouvement du système.

Scénario 3

Dans un troisième scénario, considérons le fonctionnement du réservoir en présence d'une perturbation concernant une augmentation constante du débit de fluide à l'entrée du réservoir (Figure 4.11). Après une période de 54 min, $Q_{ve} = 1,23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ($\Delta Q_{ve} = 0,237$; $\Delta t = 52$ min). La hauteur de fluide stocké dans le réservoir reste dans les limites acceptables ($h_{final} \leq 2,5$ m). Cependant, on voit qu'en présence de cette perturbation, la valeur de la vitesse du fluide dans le courant de sortie dépasse la valeur maximale acceptée ($v_{final} = 1,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; borne supérieure = $1,58 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

D'après ce scénario, les effets sur la qualité des résultats peuvent être expliqués à partir de l'altération de quatre conditions nécessaires:

- une valeur de la masse entrante dans le réservoir excessive;
- une valeur de la masse de fluide stocké dans le réservoir excessive;

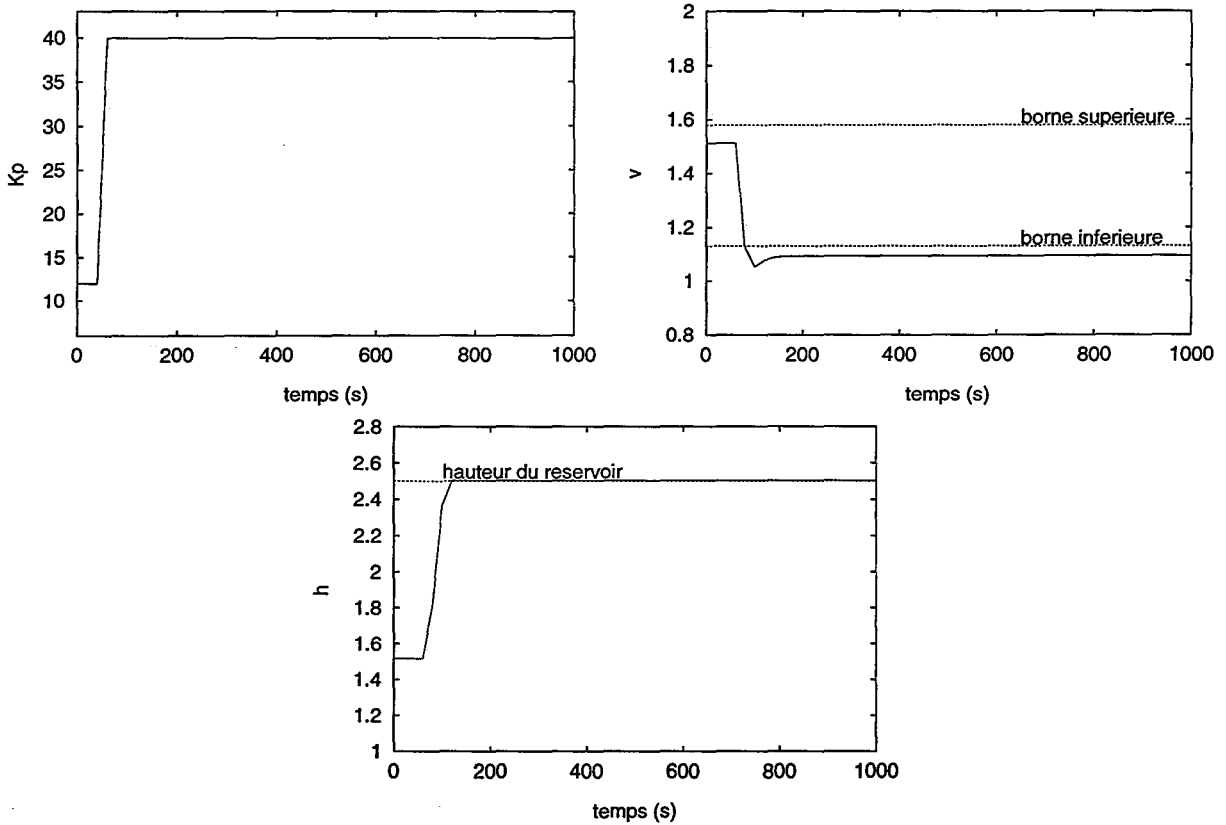


FIG. 4.10 - Exemple 4.3, scénario 2. Comportement de v et de h considérant l'augmentation rapide de K_P ($\Delta K_P = 20, 0; \Delta t \simeq 0$).

- une valeur de la force due à l'énergie potentielle du fluide stocké dans le réservoir *excessive*;
- une valeur de la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie *excessive*;

Scénario 4

Considérons, maintenant, qu'à partir de l'instant t_0 le système est soumis à un changement soudain du débit de fluide à l'entrée du réservoir (Figure 4.12). Dans ce court intervalle de temps la valeur du débit atteint la même valeur qu'au scénario ci-dessus ($\Delta Q_{ve} = 0,237; \Delta t \simeq 0$). On voit qu'en présence de cette perturbation la valeur de la vitesse du fluide dans le courant de sortie dépasse la valeur maximale acceptée ($v_{max} = 1,91\text{m.s}^{-1}$; borne supérieure = $1,58\text{m.s}^{-1}$) et que le réservoir déborde.

Alors, en plus de l'altération des conditions nécessaires du scénario 3 précédant on a :

- un *taux d'accroissement* de la masse entrante dans le réservoir *excessif*;
- un *taux d'accroissement* de la masse stockée dans le réservoir *excessif*;
- un *taux d'accroissement* de la force due à l'énergie potentielle du fluide stocké dans le réservoir *excessif*;

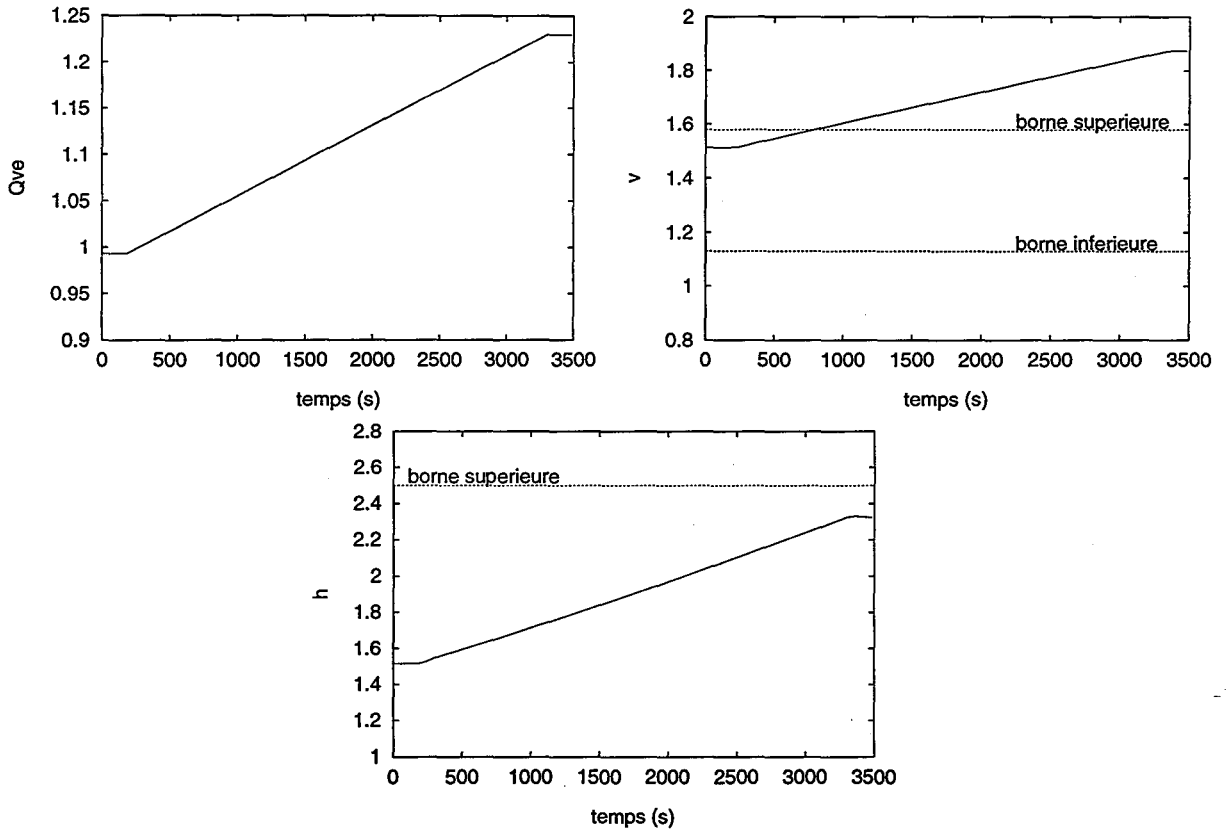


FIG. 4.11 - Exemple 4.3, scénario 3. Comportement de v et de h considérant l'augmentation lente de Q_{ve} ($\Delta Q_{ve} = 0,237$; $\Delta t = 52$ min).

- un *taux d'accroissement* de la quantité de mouvement du fluide contenu dans le courant de sortie *insuffisant*;
- un *taux d'accroissement* de la masse sortante du réservoir *insuffisant*;
- une masse de fluide stocké dans le réservoir *inadéquate* (débordement du réservoir);

Scénario 5

Considérons, dans ce scénario, une circonstance dans laquelle la perte de qualité est attribuée à l'altération de l'intégrité du matériau du réservoir. Un défaut possible peut être rapporté à une fuite de fluide par les parois du réservoir (un débit additionnel de fluide sortant du système par un endroit autre que la conduite de sortie).

A partir de la connaissance de ce défaut, au moins un nouveau terme doit être ajouté au modèle quantitatif du système (Exemple 3.1, équation (3.13)):

$$A_r \frac{dh}{dt} = Q_{ve} - A_t v - Q_v(\text{fuite}) \quad (4.3)$$

$$L \frac{dv}{dt} = gh - \frac{v^2}{2} - K_P \frac{v^2}{2} \quad (4.4)$$

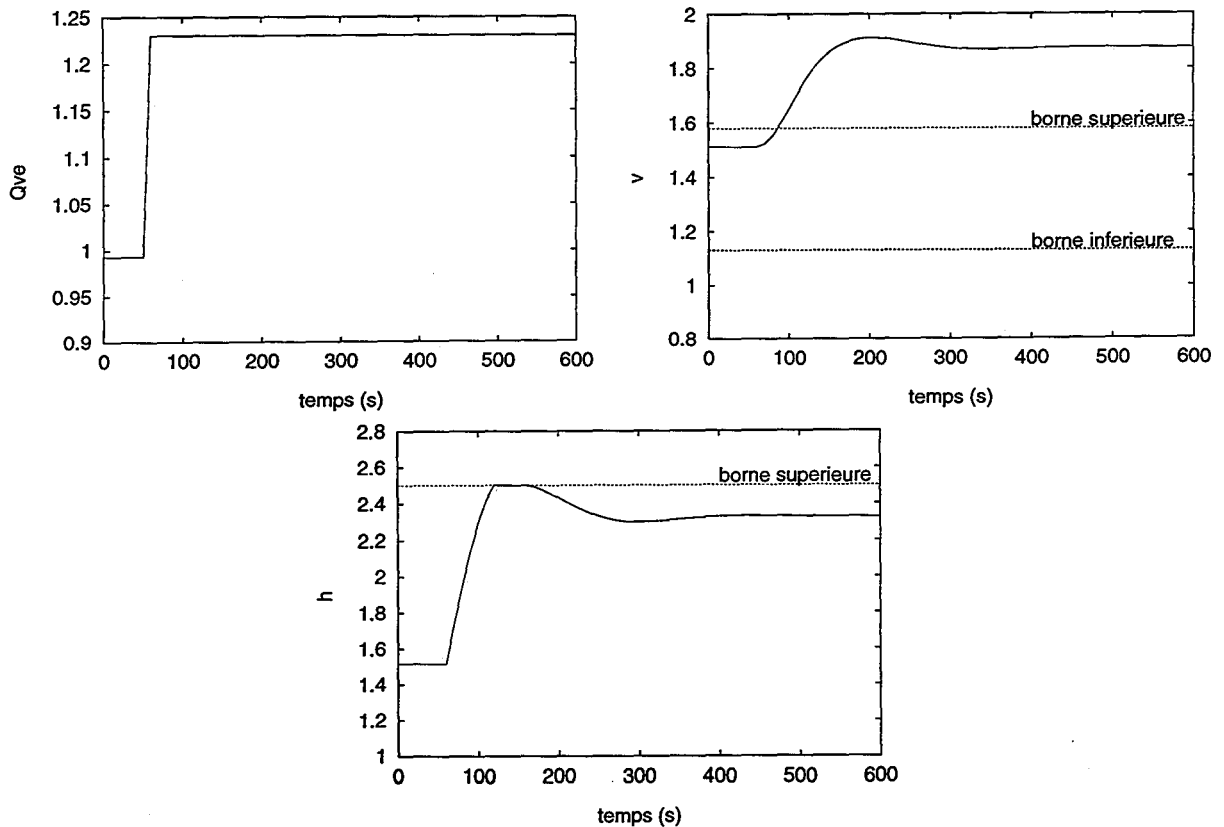


FIG. 4.12 - Exemple 4.3, scénario 4. Comportement de v et de h considérant l'augmentation rapide de Q_{ve} ($\Delta Q_{ve} = 0,237$; $\Delta t \simeq 0$).

où $Q_{v(\text{fuite})}$ = débit volumique de la fuite de fluide du système (m^3s^{-1})

Dans les équations ci-dessus, on a simplifié le problème en considérant $Q_{v(\text{fuite})}$ constant.

Dans le fonctionnement normal du système on ne considère pas la fuite. Donc, $Q_{v(\text{fuite})}$ est absent. Toutefois, sa considération est nécessaire dès qu'on veut représenter le processus à partir duquel les effets sur la qualité des résultats puissent être expliqués. Ainsi, à partir du moment que le terme correspondant à la masse sortante due à la fuite de fluide est non nul, l'altération de la masse de fluide stocké dans le réservoir est mise en évidence. Par conséquent, une valeur insuffisante de la vitesse du fluide dans la conduite de sortie est expliquée par la force insuffisante due à l'énergie potentielle.

L'intégrité du matériau du réservoir, définie à partir de la connaissance empirique de ce défaut, constitue une condition nécessaire.

4.2.3 Interventions sur le fonctionnement à partir du traitement de l'information

L'obtention des résultats souhaités est prise en compte dans les fonctions prescrites pour les systèmes de commande et de sécurité des installations physiques, autant que

dans l'ensemble des fonctions attachées à l'organisation, aux connaissances et à l'expertise détenues par le système comme un tout. Le but de ces fonctions est d'adapter les installations de façon à assurer la satisfaction du cahier des charges.

On peut caractériser ces fonctions dans le cadre de trois objectifs généraux et de leur combinaisons:

- optimiser la performance du procédé;
- supprimer l'effet des perturbations;
- assurer la stabilité du procédé.

La structure de base d'un système asservi le plus général est illustrée dans la Figure 4.13. On relie entre eux les éléments représentant les différents organes d'un système de commande élémentaire (en boucle fermée) de façon à caractériser leurs rapports fonctionnels au sein de l'ensemble. Les flèches (Figure 4.13) de la boucle fermée qui relient les éléments les uns aux autres, représentent la circulation de l'énergie nécessaire à la commande, ou l'information.

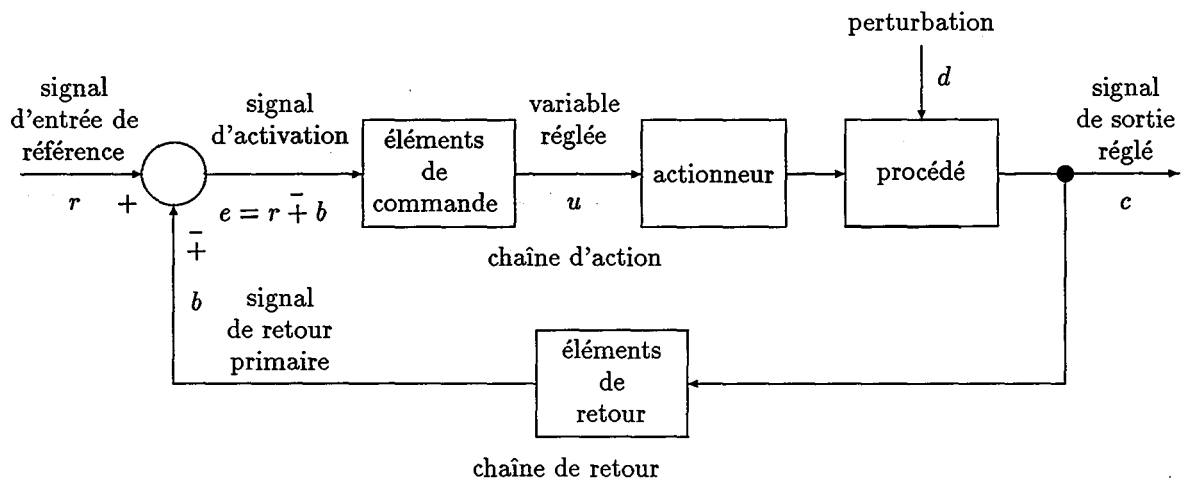
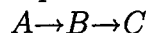


FIG. 4.13 - Schéma fonctionnel d'un système asservi général.

Optimiser la performance

Prenons l'exemple où un système de commande est utilisé afin d'optimiser les aspects économiques du fonctionnement d'un réacteur discontinu. Considérons que dans ce procédé, on a deux réactions endothermiques consécutives:



Le produit B est celui souhaité, C étant un produit sans valeur économique. L'énergie nécessaire pour la réaction d'intérêt est fournie par de la vapeur qui circule dans la double enveloppe. L'objectif lors de la conduite du réacteur est de maximiser le profit ϕ dans un temps t_r , c'est-à-dire:

$$\text{maximiser } \phi = \int_0^{t_r} ([\text{revenu des ventes de B}] - [\text{coût d'achat de A} + \text{coût de la vapeur}]) dt$$

où t_r est la durée de la réaction.

Supposons que, afin de maximiser le profit ϕ , une seule variable peut être modifiée librement, c'est-à-dire, le débit de vapeur Q . Dans ce cas, la variation au cours du temps du débit de vapeur a un effet sur la température à l'intérieur du réacteur et la variation de cette température a un effet sur les vitesses des deux réactions. La question est donc de savoir comment le débit de vapeur $Q(t)$ doit être changé de manière que le profit ϕ soit maximisé.

Considérons les deux stratégies suivantes, concernant le débit de vapeur $Q(t)$:

1. En maintenant $Q(t)$ à une valeur maximale possible pendant toute la durée t_r de la réaction, on obtiendra la plus grande valeur possible de la température à l'intérieur du réacteur. Initialement, pendant que la concentration du produit A est importante, on aura une grande production de B mais, en même temps, on payera cher pour la quantité de vapeur dépensée. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, l'augmentation de la concentration du produit B sera accompagnée d'une production plus importante de C, ce qu'on ne désire pas. A la fin de la durée de réaction, on aura des températures moins importantes, à cause de la baisse de concentration de A et de B. Dans cette situation, une quantité de moins en moins importante de vapeur sera nécessaire.
2. En maintenant le débit de vapeur $Q(t)$ à une valeur minimale, c'est-à-dire, $Q(t) = 0$ pendant toute la durée prévue pour la réaction t_r , on n'aura aucune dépense de vapeur. Par contre, aucune production de B sera obtenue.

A partir de ces deux scénarios, on peut vérifier que durant la réaction, le débit de vapeur doit varier entre une valeur maximale et une valeur minimale. Dans la Figure 4.14, on voit le genre de profil nécessaire, concernant l'évolution de la variable Q au cours du temps, de façon à ce que le profit ϕ soit maximisé.

Un système de commande est nécessaire pour régler l'ouverture de la vanne dans le courant d'alimentation de vapeur, connaissant a priori la meilleure valeur pour le débit de vapeur.

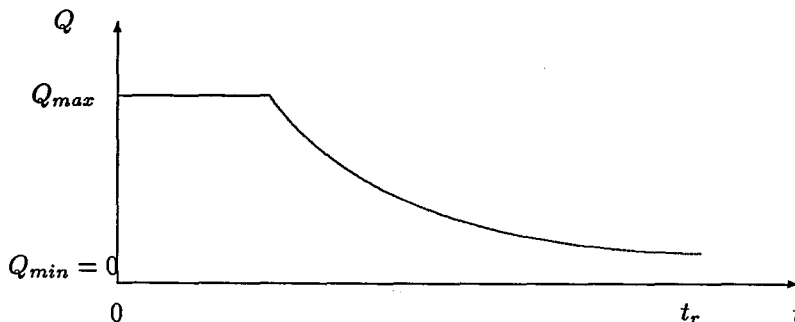


FIG. 4.14 - Profil optimal pour le débit de vapeur d'un réacteur discontinu.

Par rapport au schéma fonctionnel d'un système asservi général (Figure 4.13), l'effet des perturbations n'est pas pris en compte. La structure du système est réduite à l'élément de commande (Figure 4.15), où $Q(t)$ est la variable réglée. Ainsi, le profil de la trajectoire de Q au cours du temps constitue une condition nécessaire pour l'obtention du résultat souhaité (la maximisation du profit).

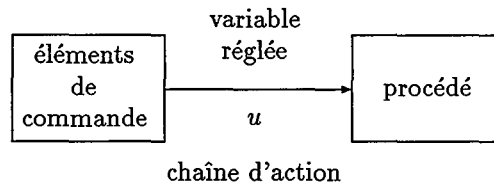


FIG. 4.15 - Schéma fonctionnel d'un système asservi réduit à la chaîne d'action.

Supprimer l'effet des perturbations

Considérons qu'à l'intérieur des installations d'un réacteur catalytique, à un instant donnée, la pression atteint une valeur où l'obtention des résultats souhaités peut être mise en risque. Supposons que l'atteinte de la valeur de la pression à ce niveau est causée par l'obstruction (naturelle) de l'élément filtrant du courant de produit. Dans cette situation, l'élimination des impuretés qui ont été déposées sur l'élément filtrant est prévue dans les spécifications d'entretien des installations. L'objectif de cette intervention concerne la remise de la perte de charge dans le courant de produit à sa valeur idéal, c'est-à-dire, à la condition où l'élément filtrant est exempté impuretés. La remise de la perte de charge à sa valeur idéal provoquera le rétablissement de la pression disponible du système.

Par rapport au schéma fonctionnel du système asservi général (Figure 4.13), on peut établir que:

- la perturbation d se rapporte à l'obstruction du filtre;
- le signal de sortie réglé c et le signal de retour primaire b se rapportent à la mesure de la pression à l'intérieur des installations;
- le signal d'entrée de référence r se rapporte à la valeur maximale acceptable de la pression;
- le signal d'activation e se rapporte à la consigne donnée au personnel pour procéder à la tâche d'entretien dès que $b > r$;
- la variable réglée (dans ce cas u) se rapporte aussi à l'obstruction du filtre.

L'élément de commande et l'élément de retour sont constitués par le personnel des installations, lequel est responsable du traitement de l'information et des décisions.

Le maintien de l'obstruction du filtre dans les limites acceptables constitue une condition nécessaire, obtenue grâce à l'activité du personnel des installations.

Assurer la stabilité du procédé

D'après l'examen du fonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité (Exemple 4.1), fonctionnant au point d'équilibre instable P_2 (Figure 4.5), on a conclu qu'une condition nécessaire est rapportée au non changement de l'enthalpie totale du système (l'enthalpie du mélange à l'intérieur du réacteur). Par ailleurs, cette condition peut être assurée à partir de l'intervention d'un système de commande sur l'enthalpie prélevée du système. Cette intervention consiste à ajuster le débit volumique de fluide caloporteur Q_{vj} de manière à maintenir l'enthalpie du mélange à l'intérieur du réacteur dans les limites acceptables en présence des perturbations.

Par rapport au schéma fonctionnel du système asservi général (Figure 4.13), on peut établir que:

- la perturbation d se rapporte à l'enthalpie entrante, sortante ou générée;
- le signal de sortie réglé c et le signal de retour primaire b se rapportent à la mesure de la température T du mélange à l'intérieur du réacteur;
- le signal d'entrée de référence r se rapporte à la valeur spécifiée ($\bar{T} = T_2$) de la température du mélange à l'intérieur du réacteur;
- le signal d'activation $e = r - b$ se rapporte à la différence entre la valeur spécifiée \bar{T} de la température et la valeur de la mesure T ;
- la variable réglée u est, normalement, le débit volumique de fluide caloporteur Q_{vj} dans la double enveloppe.

Des valeurs de Q_{vj} au cours du temps, favorables au maintien de l'enthalpie du mélange dans les limites acceptables, constituent une condition nécessaire. Cette condition est obtenue grâce à l'activité des constituants du système de commande.

4.3 L'organisation des connaissances

4.3.1 La hiérarchie des objectifs

La connaissance sur laquelle est fondé le modèle quantitatif d'un système physique est définie à partir de l'application du principe de conservation à une quantité fondamentale S (équation (3.2)). Le système physique est défini à partir d'une quantité de matière associée à un volume de contrôle conventionné. La quantité S peut concerner une des quantités fondamentales suivantes:

- la masse totale;
- la masse d'un composant individuel;
- l'énergie totale;
- la quantité de mouvement.

Dans le modèle de connaissance quantitatif, l'interaction entre le système et l'environnement est représentée aussi à partir de ces grandeurs.

Par ailleurs, le fonctionnement d'un système industriel est représenté à partir de la définition d'un ensemble d'éléments matériels ou conceptuels interagissant à l'intérieur d'une structure précise. Un élément e de cet ensemble peut être défini à partir de trois classes d'éléments:

- e_s , défini par une quantité de matière connexe à un volume de contrôle conventionné (un système physique);

- e_m , défini par un constituant du matériau des installations.
- e_i , concernant un processus de traitement de l'information.

La représentation des conditions nécessaires est basée sur la connaissance physique que l'on a des phénomènes, c'est-à-dire sur l'application du principe de conservation à une quantité fondamentale S rapportée à la matière associée à un volume de contrôle conventionné. Ainsi premièrement on considère, dans cette représentation, les effets de l'interaction entre les éléments définis à partir des trois classes ci-dessus (e_s , e_m , e_i) sur les éléments définis comme des systèmes physiques (e_s) (Figure 4.16).

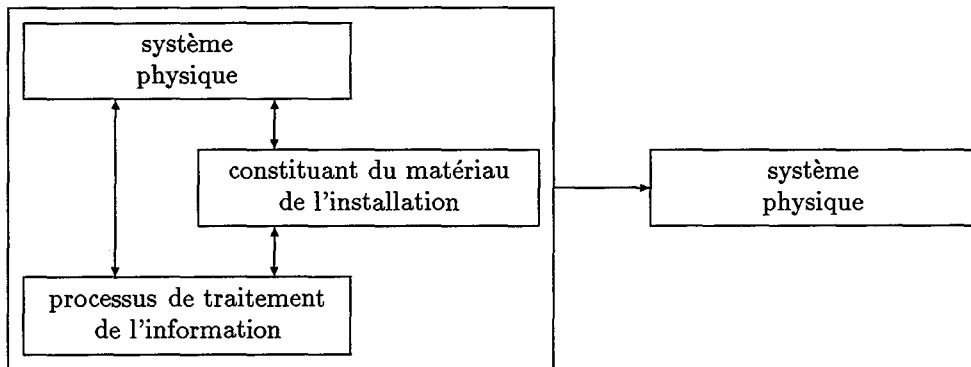


FIG. 4.16 - Interaction entre les éléments d'un système industriel.

Les quantités fondamentales peuvent être alors considérées comme des grandeurs caractérisant l'effet de l'interaction des éléments d'un système industriel sur une catégorie spécifique d'éléments: ceux dont la représentation est basée sur la notion de système physique.

Deuxièmement, la représentation des conditions nécessaires est basée sur la connaissance des facteurs intervenant sur les quantités fondamentales. Deux classes de facteurs interviennent:

- les propriétés liées à la nature ou à la structure matérielle des éléments du système industriel;
- l'information.

Dans cette perspective, la structure au sein de laquelle interagissent les éléments du système industriel peut être définie à partir d'une hiérarchie entre les conditions nécessaires:

- les *conditions propres*, définies par des quantités fondamentales S_i (masse totale, masse d'un composant individuel, énergie totale ou quantité de mouvement) et par des grandeurs G_{ij} , à partir desquelles les phénomènes physiques sont pris en compte lors de l'application du principe de conservation sur une quantité fondamentale;
- les *conditions internes*, définies par des facteurs $g(t)$, caractérisant des propriétés liées à la nature ou à la structure matérielle des constituants des installations, ou

caractérisant l'état physique (dont la valeur est fixée) des composants, des éléments en transformation et de l'environnement;

– les *conditions externes*, définies par de l'information.

Cette hiérarchie exprime la dépendance entre les aspects pris en compte lors de la conception des installations, déterminant la qualité souhaitée des résultats de l'interaction des composants. Par rapport à la classification préalable que nous avons donné à ces aspects (Figure 4.17):

(1) la hiérarchie entre les *conditions propres*, les *conditions internes* et les *conditions externes* exprime la dépendance des *conditions de fonctionnement* par rapport aux *conditions matérielles*, aux *conditions opératoires* et par rapport à certaines conditions de fonctionnement (définies à partir de valeurs fixées).

(2) la hiérarchie entre les *conditions externes* et les *conditions internes* exprime la dépendance des *conditions opératoires* par rapport à certaines conditions de fonctionnement et par rapport aux *conditions matérielles* (les conditions définies à partir des propriétés associées à la nature ou à la structure matérielle du matériau dont un système de traitement de l'information est constitué).

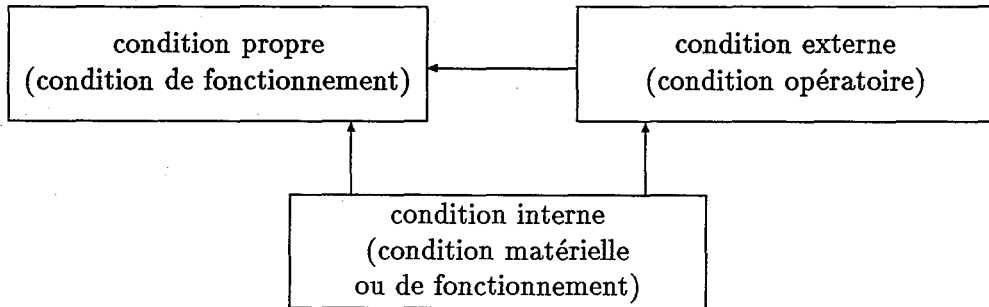


FIG. 4.17 - La hiérarchie des objectifs.

Exemple 4.4

Considérons les conditions de fonctionnement du réservoir rapportées au Scénario 5 de l'Exemple 4.3 (Figure 3.15). Ces conditions sont celles qui sont mises en évidence à partir de l'hypothèse concernant l'éventuelle altération de l'intégrité de la construction du réservoir (la présence de fuite de fluide). On peut les définir à partir de l'effet de l'interaction des éléments du système industriel sur les systèmes physiques S_1 (fluide stocké dans le réservoir), S_2 (fluide stocké dans le réservoir et fluide qui se déplace dans le courant de sortie) et S_3 (fluide qui se déplace dans le courant de sortie).

En ce qui concerne les effets sur le système S_1 (le fluide contenu dans le réservoir), favorables à la satisfaction des exigences, on peut citer:

- (1) des valeurs normales (favorables) de la masse (totale) sortante à cause de fuites éventuelles de fluide;
- (2) des valeurs normales (favorables) de la masse totale.

L'effet sur le système S_2 est rapporté à des valeurs normales (favorables) de la force due à l'énergie potentielle, et les effets sur le système S_3 (le fluide qui se déplace dans le courant de sortie) concernent des valeurs normales (favorables) de la quantité de mouvement.

Les conditions ci-dessus constituent des *conditions propres* dans la représentation de la structure au sein de laquelle interagissent les éléments du système industriel.

Par ailleurs, la première condition ci-dessus dépend d'une condition matérielle définie par les propriétés rapportées à l'intégrité de la construction du réservoir (par exemple, les situations où il n'y a pas des fuites). Donc, cette condition matérielle constitue une *condition interne*.

4.3.2 La hiérarchie des systèmes

Les relations d'ordre hiérarchique entre les conditions nécessaires nous permettent de caractériser la structure au sein de laquelle interagissent les éléments d'un système industriel.

Ainsi, la représentation de la structure au sein de laquelle les éléments d'un système industriel interagissent passe par la définition des systèmes physiques et des systèmes de traitement de l'information. A partir des conditions nécessaires associées à ces systèmes on peut établir:

- les relations de dépendance entre les systèmes physiques;
- les relations de dépendance entre les systèmes physiques et les systèmes de traitement de l'information.

Les relations entre les systèmes sont établies à partir de la considération des conditions nécessaires, associées à chaque système, comme "contributions" et comme "influences".

Dans cette perspective, cette représentation peut être enrichie à partir de la définition d'ensembles de systèmes physiques et/ou de systèmes de traitement de l'information. On peut définir aussi un système de traitement de l'information à partir d'un ensemble de systèmes physiques, dans le cas où on cherche la représentation des phénomènes physiques présents dans le processus dont l'objectif est la production d'information. La définition de ces ensembles nous permet d'ajouter, dans la représentation, de l'information sur le processus dans lequel les conditions nécessaires, en tant que "contributions", sont obtenues.

Dans la représentation des connaissances on prend ainsi en compte certains aspects recherchés dans les Représentations Fonctionnelles (Chandrasekaran 1994):

- La représentation des systèmes tant du point de vue de l'activité des composants que du point de vue de l'activité d'un ensemble de composants;
- Une représentation mettant en évidence les objectifs fixés pour les installations;
- Une représentation favorisant la souplesse par rapport au degré de description des aspects concernant le fonctionnement.

Alors, la connaissance qualitative du fonctionnement d'un système industriel peut être considérée à partir (Figure 4.18):

- (1) des relations entre des *conditions propres* et des *conditions internes* associées à un élément du système industriel défini comme un *système physique*;
- (2) des relations entre des *conditions externes* et des *conditions internes* associées à un élément du système industriel défini comme un *système de traitement de l'information*;
- (3) des relations entre des *conditions propres* associées à des *ensembles de systèmes physiques*;
- (4) des relations entre des *conditions externes* associées à des *ensembles de systèmes de traitement de l'information*;
- (5) des relations entre des *conditions propres* associées à un *système ou à un ensemble de systèmes physiques* et des *conditions externes* associées à un *système ou à un ensemble de systèmes de traitement de l'information*;

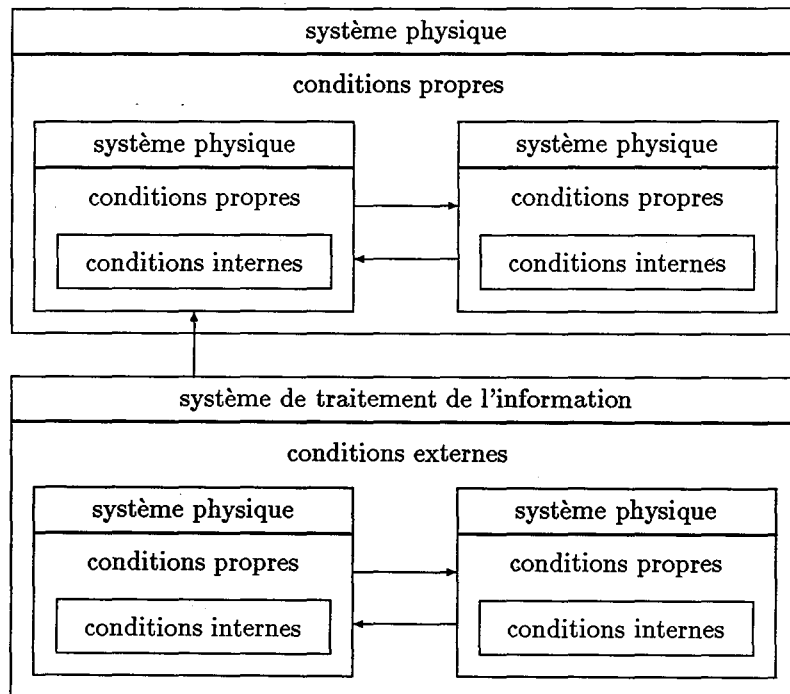


FIG. 4.18 - Hiérarchie des systèmes.

Exemple 4.5

Dans l'Exemple 4.4 précédent, les conditions nécessaires pour l'obtention des résultats souhaités sont définies à partir de la définition des systèmes physiques S_1 , S_2 et S_3 (représentés dans la Figure 3.15). On peut ainsi définir la représentation d'un nouveau système S , formé par les trois systèmes S_1 , S_2 et S_3 .

Par ailleurs, un des résultats souhaités, c'est-à-dire, les valeurs acceptées de v , est rapporté à l'état du système S_3 défini à partir de la quantité de mouvement. Ainsi, on peut associer au système S la "condition propre" définie par "des valeurs normales (acceptables) de la quantité de mouvement du système S_3 ".

4.3.3 Les relations entre les conditions

Le processus tendant à la réalisation des objectifs peut être représenté à partir des "influences", "contributions" et "relations" définies lors du modèle quantitatif. Dans cette perspective, on prend en compte:

- l'impact d'un facteur $g(t)$ (dont la valeur est fixée) sur une grandeur $G = f(g(t))$ (que l'on peut désigner par $I(G | g(t))$), de manière que G soit favorable à la réalisation des objectifs - où G définit une condition propre en tant que "contribution" et $g(t)$ définit une condition interne ou externe en tant qu'"influence";
- en tant qu'un effet de $g(t)$, l'impact d'une grandeur G sur une quantité fondamentale S (que l'on peut désigner par $I(S | G, g(t))$), de manière que S soit favorable à la réalisation des objectifs - où G et S définissent des conditions propres en tant qu'"influence" et "contribution" (respectivement);
- en tant qu'un effet d'une grandeur G_i , l'impact d'une grandeur S sur une grandeur G_j (désigné par $I(G_j | S, G_i)$) - où S et G_j définissent des conditions propres en tant que, respectivement, "influence" et "contribution";
- $I(S_j | G, S_i)$ - où G et S_j définissent des conditions propres en tant que, respectivement, "influence" et "contribution".

Il est possible de définir aussi $I(g(t) | S, G)$.

Par ailleurs, les conditions nécessaires sont mises en évidence lors des circonstances où la qualité des résultats souhaités n'est pas obtenue. Ces circonstances sont précisées à partir de la considération des défauts. Ainsi, dès qu'on attribue les défauts aux "influences" (définies par les "facteurs $g(t)$ ") on peut, à partir de la description du comportement du système donnée par le modèle quantitatif, établir des relations entre les altérations des conditions.

4.4 Conclusions

Les concepts présentés ont été introduits afin de permettre la représentation du processus d'obtention d'une qualité du fonctionnement, c'est-à-dire que les grandeurs concernées sont associées aux activités du procédé menant à l'obtention de résultats définis par des critères de qualité. La méthodologie proposée prend en compte l'organisation de ces activités¹, favorisant la définition d'un ordre de causalité entre les éléments qu'on a désignés, d'une manière générale, par "conditions nécessaires" et "altérations de conditions nécessaires".

¹Stephanopoulos et Johnston (1987), (1990) présente la définition d'un langage pour la définition des connaissances du fonctionnement des procédés.

Cette structure doit être adaptée au diagnostic. Dans cette perspective, les hypothèses sont définies par les “altérations des conditions nécessaires”. Les relations entre les hypothèses traduisent des scénarios de dysfonctionnement. Ceux-ci doivent favoriser la construction d’un modèle de connaissance où tant des informations prédictives que des informations extraites d’un diagnostic puissent être utilisées sans conflit.

Chapitre 5

Formulation pour la représentation de la connaissance et pour le diagnostic

5.1 Introduction

La connaissance des facteurs qui influencent la qualité des résultats, afin que les exigences du cahier des charges soient satisfaites, dépend de la représentation du processus à partir duquel les effets sur cette qualité peuvent être expliqués. L'expérience des spécialistes, acquise grâce à une longue pratique jointe à l'observation, est normalement rapportée à cette connaissance.

On peut considérer l'*observation* comme un processus aboutissant à une classification des faits. Les faits sont classés en fonction d'objectifs fixés, et sont décrits à partir de critères de qualité établis pour les mesures qui caractérisent des grandeurs ou des propriétés associées au procédé. Ainsi l'expérience d'un spécialiste dépend, dans un premier temps, d'une représentation des faits qui peuvent être observés, au sein de laquelle une qualité leur est attribuée.

Dans un deuxième temps, l'expérience est acquise à partir de l'élaboration par les spécialistes d'explications des relations entre les faits observés (c'est-à-dire la *pratique*). Afin d'élaborer ces explications, le spécialiste se base sur des hypothèses qui lui permettent d'établir des connexions logiques entre ces faits. Alors d'autres faits, associés à un processus intellectuel, sont définis.

Ainsi, la connaissance peut être modélisée à partir:

- de la représentation des faits qui peuvent être observés, en fonction d'une qualité fixée;
- de la représentation des faits conçus théoriquement, utilisés comme des hypothèses pour l'établissement de relations entre les faits observables;
- de la représentation des relations entre les hypothèses;
- de la représentation des relations entre les hypothèses et les faits observables.

Etant donné un ensemble de faits observés, le raisonnement de diagnostic basé sur le modèle consiste à utiliser les relations de manière à sélectionner les hypothèses à partir desquelles les faits observés peuvent être expliqués. Un diagnostic est établi à partir du moment où une de ces hypothèses est suffisante pour expliquer l'ensemble de ces faits. On attribue à cette hypothèse l'origine du processus menant à ces résultats.

Dans le formalisme proposé, les faits observables, les hypothèses et les relations sont représentés à partir des concepts de *condition nécessaire* et des relations entre celles-ci :

- les *faits observables* sont pris en compte à partir de l'information sur une condition nécessaire considérée en tant que "contribution";
- les *hypothèses* sont prises en compte à partir des conditions nécessaires considérées soit en tant qu'"influences", soit en tant que "contributions";
- les *relations entre les hypothèses* sont prises en compte à partir des relations entre les conditions nécessaires;
- les *relations entre les faits observables et les hypothèses* sont prises en compte à partir du rapport entre une information sur le procédé ou sur l'installation et une condition nécessaire. Ce rapport est modélisé quand la condition nécessaire peut être caractérisée par une mesure directe ou indirecte et, à partir de cette mesure, il est possible de définir l'information sur le procédé ou sur l'installation.

Le raisonnement pour l'établissement d'un diagnostic est mis en oeuvre par un mécanisme d'inférence. Le processus d'établissement du diagnostic peut être décrit à partir de trois éléments principaux (Figure 5.1):

- une base de connaissances, où les connaissances sont représentées;
- une base de faits, définie par les faits observés;
- le mécanisme d'inférence.

La base de faits se forme en fonction des faits observables représentés dans la base de connaissance. Ainsi, les faits observés proviennent de l'interprétation des signaux du procédé ou de l'information sur les installations. L'objectif du mécanisme d'inférence est d'obtenir une explication pour les faits observés (ceux de la base de faits) à partir de la sélection d'hypothèses concernant l'*altération* de conditions nécessaires.

Par ailleurs l'établissement d'un diagnostic est, d'un côté, limité par les faits observés. D'un autre côté, il est limité par les connaissances représentées dans le modèle. Donc, la base de faits peut ne pas contenir, à un instant donné, toute l'information nécessaire pour l'établissement d'un diagnostic. Aussi, l'inclusion de certains faits observables dans la base de faits peut être onéreuse ou même inadéquate lors d'une première étape de sélection des hypothèses, comme, par exemple, la vérification de défauts rapportés à l'altération de conditions matérielles. Le mécanisme d'inférence doit être utilisé successivement jusqu'à ce qu'une explication finale soit obtenue. Alors, un diagnostic peut se terminer dans les situations suivantes:

- (1) une explication est établie à partir de la sélection d'une hypothèse définie par l'altération d'une condition de fonctionnement ou par l'altération d'une condition opératoire,

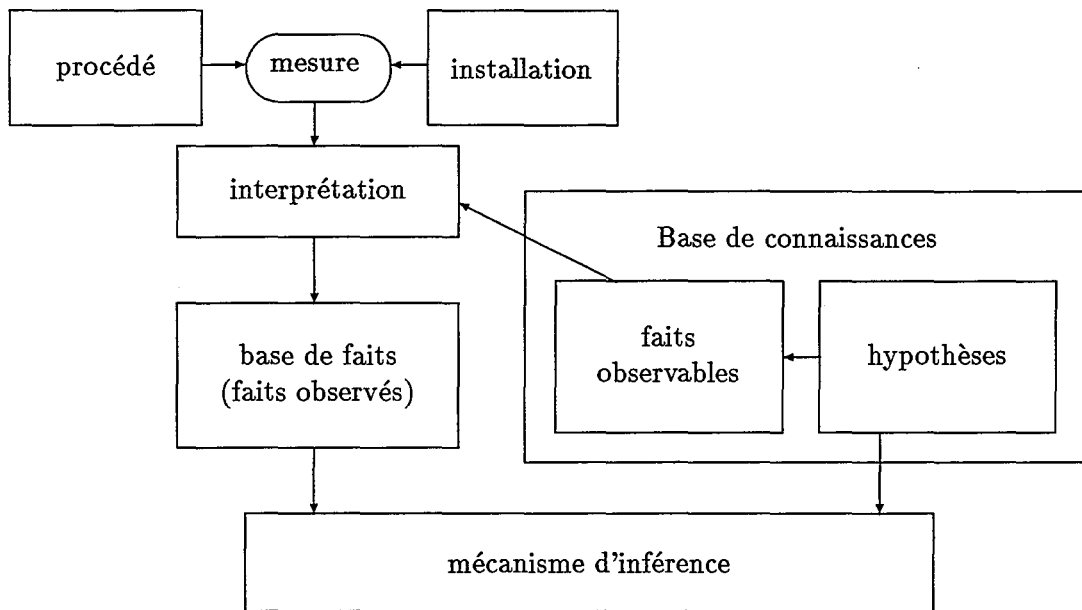


FIG. 5.1 - Éléments pour le diagnostic.

- (2) une explication finale est établie à partir de la sélection d'une hypothèse définie par l'altération d'une condition matérielle;

Dans le premier cas, l'explication est établie par le mécanisme d'inférence prenant en compte seulement les faits observés provenant de l'interprétation des signaux du procédé. Le diagnostic présente seulement une explication théorique du phénomène physique, et n'identifie pas la cause originelle du dysfonctionnement. Dans le deuxième cas, on obtient autant l'explication du phénomène physique que du défaut à son origine.

Ainsi, le diagnostic est réalisé en deux étapes:

- La sélection de l'hypothèse à partir de laquelle les faits observés provenant de l'interprétation des signaux du procédé peuvent être expliqués, que l'on peut désigner par *hypothèse du dysfonctionnement*.
- La sélection de l'hypothèse à partir de laquelle l'*hypothèse du dysfonctionnement* peut être expliquée, que l'on peut désigner par *hypothèse du défaut*.

La sélection de l'hypothèse du défaut dépend de la vérification des défauts possibles rapportés à des altérations de conditions matérielles. Cette vérification, qui correspond à l'inclusion de faits observables dans la base de faits, est déterminée par l'interaction du mécanisme d'inférence avec la base de connaissances.

La méthode proposée pour la représentation de la connaissance et pour le diagnostic comprend:

- la définition et la représentation des éléments qui forment la base de connaissances;
- à partir de la représentation de ces éléments, la définition du mécanisme d'inférence pour le diagnostic.

5.2 Construction de la base de connaissances

Dans la base de connaissances, les aspects rapportés à la composition du système industriel et à son fonctionnement sont représentés. Ils constituent l'objet de la connaissance. Ces aspects sont pris en compte à partir d'une structure au sein de laquelle des éléments représentés à partir de quatre classes générales sont associés:

- la classe *Système*
- la classe *Condition*
- la classe *Altération de condition*
- la classe *Relation*

Les éléments sont définis en fonction d'un ensemble d'attributs. Ces attributs caractérisent:

- l'objet de la connaissance;
- les associations entre les éléments au sein de la structure.

Ainsi, la construction de la base de connaissances comprend quatre étapes (Figure 5.2) résultant du processus amenant à l'acquisition de la connaissance qualitative:

- La définition de la *hiérarchie des systèmes*. Cette structure est obtenue en fonction de la représentation d'éléments à partir de la classe *Système*. On désigne chacun de ces éléments par un "système". Les "systèmes" sont associés entre eux.
- La définition d'un "système", obtenue en fonction de l'association de celui-ci à des éléments représentés à partir de la classe *Condition*. Ces éléments définissent des conditions nécessaires ou des faits observables caractérisant des informations sur des conditions nécessaires.
- La définition d'une condition nécessaire, obtenue en fonction de l'association de celle-ci à des éléments représentés à partir de la classe *Altération de condition*. Ces éléments définissent des altérations de cette condition nécessaire.
- La définition d'un fait observable caractérisant l'information sur des conditions nécessaires, obtenue en fonction de l'association de celui-ci à des éléments représentés à partir de la classe *Altération de condition*. Ces éléments définissent d'autres faits observables caractérisant des informations sur des altérations de conditions nécessaires.
- La définition d'une altération d'une condition nécessaire, obtenue en fonction de l'association de celle-ci à des éléments représentés à partir de la classe *Relation*. Ces éléments définissent les relations entre cette altération de condition et:
 1. d'autres altérations de conditions nécessaires;

2. des faits observables (caractérisant des informations sur des altérations de conditions nécessaires).

- La définition d'un fait observable (caractérisant l'information sur des altérations de conditions nécessaires), obtenue en fonction de l'association de celui-ci à des éléments représentés à partir de la classe Relation. Ces éléments définissent les relations entre ce fait observable et les altérations de conditions nécessaires.

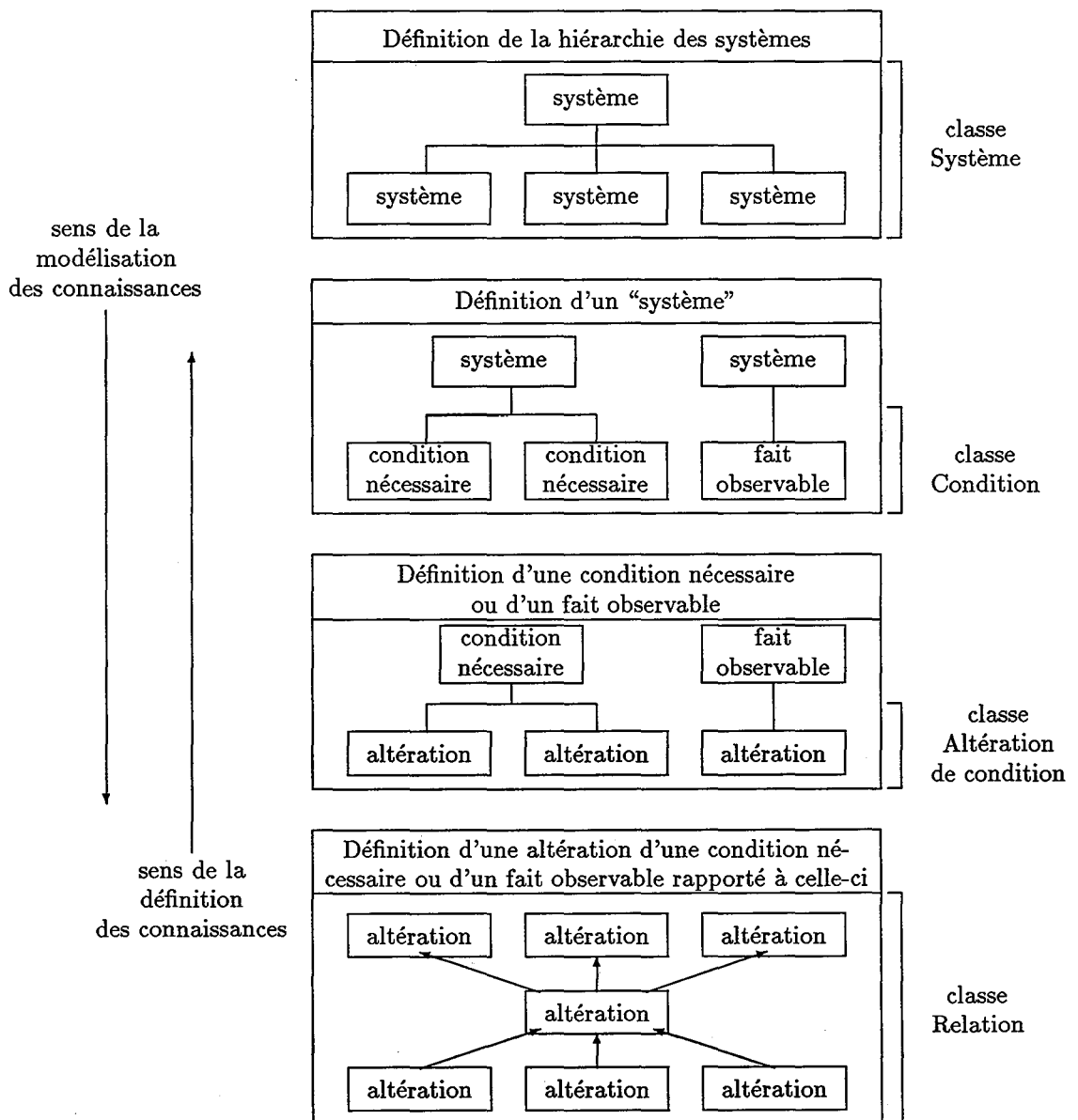


FIG. 5.2 - Étapes pour la construction de la base de connaissances.

5.2.1 Définition de la hiérarchie des systèmes

Un élément est représenté à partir de la classe *Système* de façon à ce que l'on considère:

- les éléments du système industriel formés par les systèmes physiques;
- les éléments du système industriel formés par les systèmes de traitement de l'information du procédé.

A ces systèmes sont associées les conditions de fonctionnement, les conditions opératoires et les conditions matérielles.

Les faits observables doivent eux aussi être représentés dans la base de connaissances, de manière à ce que le mécanisme d'inférence puisse les utiliser dès qu'ils sont inclus dans la base de faits. Du fait que leur représentation est réalisée à partir de l'information sur des conditions nécessaires (en tant que "contribution"), les faits observables peuvent être caractérisés en tant qu'éléments représentés à partir de la classe *Condition* ou à partir de la classe *Altération de condition*.

Alors, à partir de la classe *Système*, on doit prendre en compte aussi la représentation des éléments du système industriel chargés de l'information pour le diagnostic. Lorsque ces éléments sont représentés, on prend en compte l'existence d'agents dont l'activité est de sélectionner les faits observables, représentés dans la base de connaissances, pour les inclure dans la base de faits. Cette sélection est faite à partir de l'interprétation des signaux du procédé ou des mesures à partir desquelles les défauts peuvent être identifiés dans les installations. Ces systèmes sont, donc, chargés de la formation de la base de faits.

Les éléments représentés à partir de la classe *Système* sont définis par un nom désignant le système, et par les attributs suivants:

- *Type*:
 1. *système du procédé*, à partir duquel les éléments désignant des systèmes physiques ou des systèmes de traitement de l'information du procédé sont caractérisés;
 2. *système du diagnostic*, à partir duquel les éléments désignant les agents du système industriel chargés de l'information pour le diagnostic sont caractérisés.

Les systèmes définis comme *système du procédé* peuvent être caractérisés par les attributs:

- *Ascendant*: caractérisant un système du procédé en tant qu'élément d'un autre système du procédé;
- *Descendant*: caractérisant le système en tant qu'un ensemble formé par d'autres systèmes du procédé.

Les systèmes définis comme *système du diagnostic* peuvent être aussi caractérisés par les attributs:

- *Ascendant*: caractérisant un système du diagnostic en tant qu'élément d'un autre système du diagnostic;

- *Descendant*: caractérisant le système en tant qu'un ensemble formé par d'autres systèmes du diagnostic.

Exemple 5.1

Considérons la connaissance définie à partir de l'analyse qualitative du fonctionnement du réservoir (Exemple 4.2 et Exemple 4.3). Dans la base de connaissances, on représente, théoriquement, les systèmes suivants:

- les systèmes du type *systèmes du procédé* définis à partir des systèmes physiques S_1 , S_2 et S_3 (Figure 3.15) comprenant respectivement (Figure 5.3):
 1. Le fluide stocké par le réservoir
 2. Le fluide contenu dans le réservoir et dans le courant de sortie
 3. Le fluide contenu dans le courant de sortie
- un système du type *système du procédé*, formé par les systèmes S_1 , S_2 et S_3 , que l'on peut désigner par "système du réservoir".
- un système du type *système du diagnostic*, défini à partir de la considération d'un agent chargé de l'évaluation des mesures sur le procédé et l'installation concernant le système du réservoir:
 1. le débit volumique de fluide à la conduite de sortie, en fonction des valeurs tolérées dans les spécifications;
 2. la hauteur de fluide stocké par le réservoir en tant qu'une condition limite définie par la hauteur de ceci.
 3. les caractéristiques du matériau et de la construction des installations.

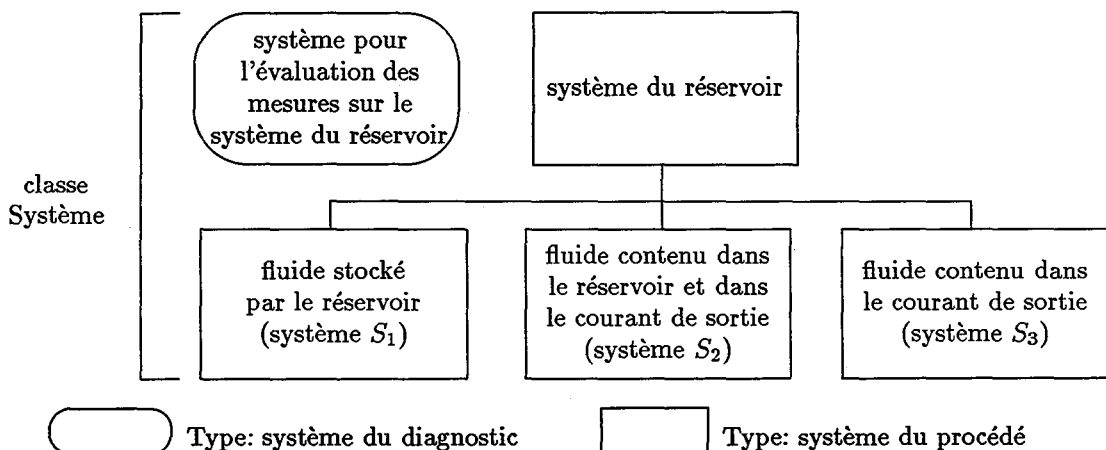


FIG. 5.3 - Représentation des systèmes rapportés au fonctionnement du réservoir (Exemple 4.2).

5.2.2 Les systèmes

La connaissance rapportée à un élément représenté à partir de la définition de la hiérarchie des systèmes est définie par les éléments représentés à partir de la classe Condition. Ainsi, dans la base de connaissances sont représentés (Figure 5.4):

- les conditions nécessaires associées à un système du type *système du procédé*
- les faits observables, caractérisant l'information sur une condition nécessaire, associés à un système du type *système du diagnostic*.

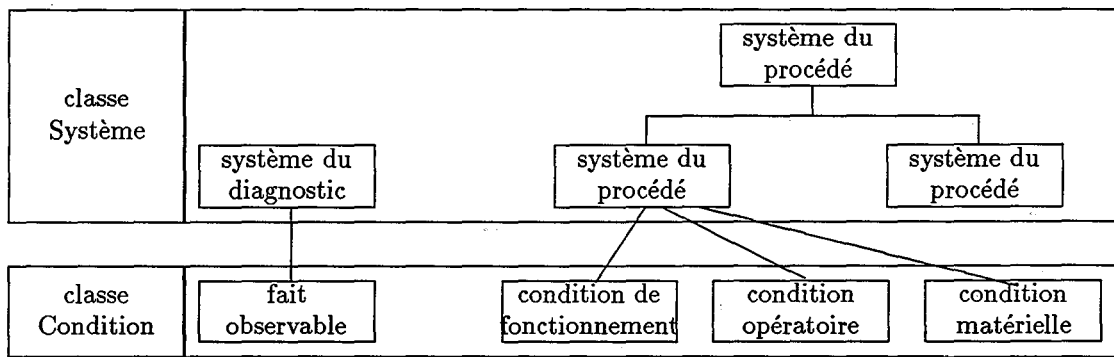


FIG. 5.4 - Définition des systèmes.

Les éléments représentés à partir de la classe Condition sont définis par les attributs suivants:

- Type:
 1. l'élément représenté est une condition matérielle;
 2. l'élément représenté n'est pas une condition matérielle.
- Paramètre:
 1. Variable rapportée à une mesure directe ou indirecte à partir de laquelle l'information sur une condition nécessaire est caractérisée.
 2. Variable à partir de laquelle une condition de fonctionnement, une condition opératoire ou une condition matérielle est modélisée.
- Description du phénomène ou des spécifications du matériau et de la construction des installations. Remplace le paramètre dans les situations où la variable caractérisant le fait observable ou la condition nécessaire n'est pas spécifiée.
- Bornes inférieure et supérieure. Etant donné une borne inférieure b^i et une borne supérieure b^s , le paramètre est qualifié de "normal" si $b^i \leq p(t) \leq b^s$. Dans l'intervalle défini par ces bornes, le paramètre est favorable à l'obtention des résultats souhaités.

- *Objectif*. Ensemble des exigences par rapport auxquelles les effets des perturbations sont pris en compte. La spécification de l'objectif n'est pas nécessaire pour la représentation des conditions matérielles.
- *Système*. Élément représenté à partir de la classe Système, auquel l'élément représenté à partir de la classe Condition est associé.

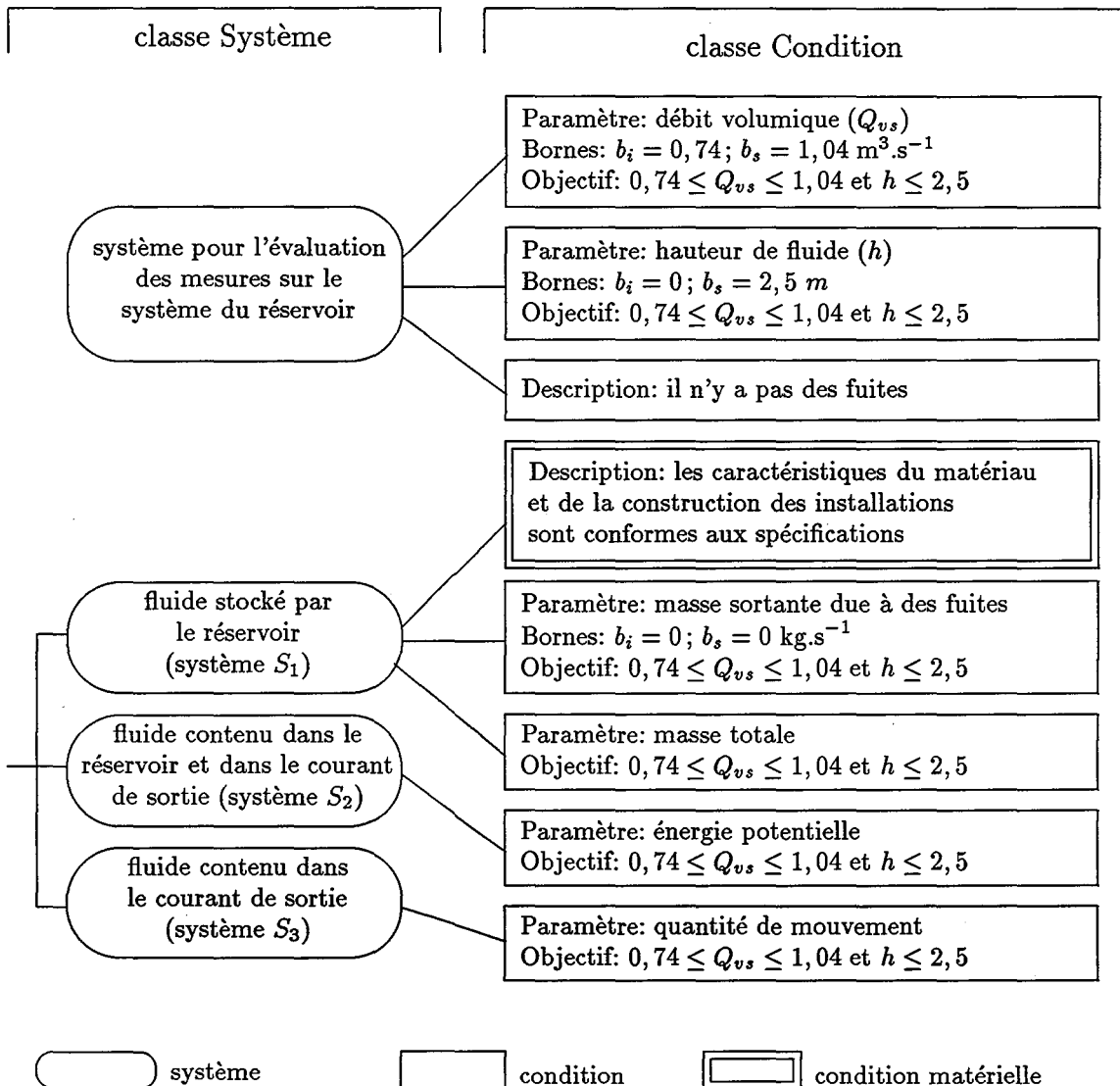


FIG. 5.5 - Représentation de conditions nécessaires et de faits observables rapportés au fonctionnement du réservoir (Exemple 4.3, scénario 5).

Exemple 5.2

Dans la Figure 5.5 la structure pour la représentation de conditions, construite à partir de l'analyse qualitative du fonctionnement du réservoir est illustrée (Exemple 4.3, scénario 5).

Les éléments représentés à partir de la classe Condition, associés aux systèmes du type “système du diagnostic”, sont des faits observables caractérisant des informations sur des conditions nécessaires. Les éléments associés aux systèmes du type “système du procédé” sont des conditions nécessaires.

5.2.3 Les conditions nécessaires

La définition des conditions nécessaires est réalisée souvent à partir de la connaissance des circonstances dans lesquelles les résultats souhaités ne sont pas obtenus.

Ainsi, à partir de la classe Altération de condition sont représentés:

- les altérations d’une condition nécessaire associée à un système du type système du procédé;
- les faits observables caractérisant l’information sur une altération de condition nécessaire associée à un système du type système du diagnostic.

Les éléments représentés à partir de la classe Altération de condition sont définis par les attributs suivants:

- *Qualificatif du paramètre.* Terme indiquant, en résumé, la manière dont le paramètre contribue pour l’obtention des résultats ou sa conformité aux exigences. Dans la représentation des éléments à partir de la classe Condition, le qualificatif du paramètre est, par défaut, désigné par “normal”. La propriété, l’information, la grandeur physique ou son évolution, représentées par le paramètre, sont favorables à l’obtention des résultats souhaités ou satisfont les exigences. Dans la représentation d’un élément à partir de la classe Altération de condition, le qualificatif peut être précisé par les termes “insuffisant”, “excessif”, “inadéquat”, etc.
- *Description:* remplace le qualificatif du paramètre lorsque celui-ci n’est pas spécifié.
- *Bornes inférieure et supérieure.* Soit b_n^s une borne supérieure, b_n^i une borne inférieure et p un paramètre. Lorsque $b_n^i \leq p(t) \leq b_n^s$, le paramètre p est “normal”. Une altération de p est définie si $p(t) < b_n^i$ ou $p(t) > b_n^s$. Dans ces deux situations, le paramètre n’est pas favorable à l’obtention des résultats souhaités. Une altération peut être définie aussi dans les situations où, étant donné une borne b_a^s et une borne b_a^i , $b_n^s < p(t) \leq b_a^s$ ou $b_n^i > p(t) \geq b_a^i$. Dans ces cas l’altération est définie par une plage à partir de laquelle les scénarios, où certains résultats sont obtenus ou certaines exigences ne sont pas satisfaites, sont précisés.
- *Condition.* Element représenté à partir de la classe Condition, auquel l’élément représenté à partir de la classe Altération de condition est associé.

Exemple 5.3

Dans les Figures 5.6 et 5.7, la structure contenant la représentation d’altérations de conditions nécessaires ou de faits observables caractérisant l’information sur l’altération d’une condition nécessaire est illustrée. Une partie des connaissances rapportées à l’analyse qualitative du fonctionnement du réservoir (Exemple 4.3, scénarios 2 et 5) est présentée.

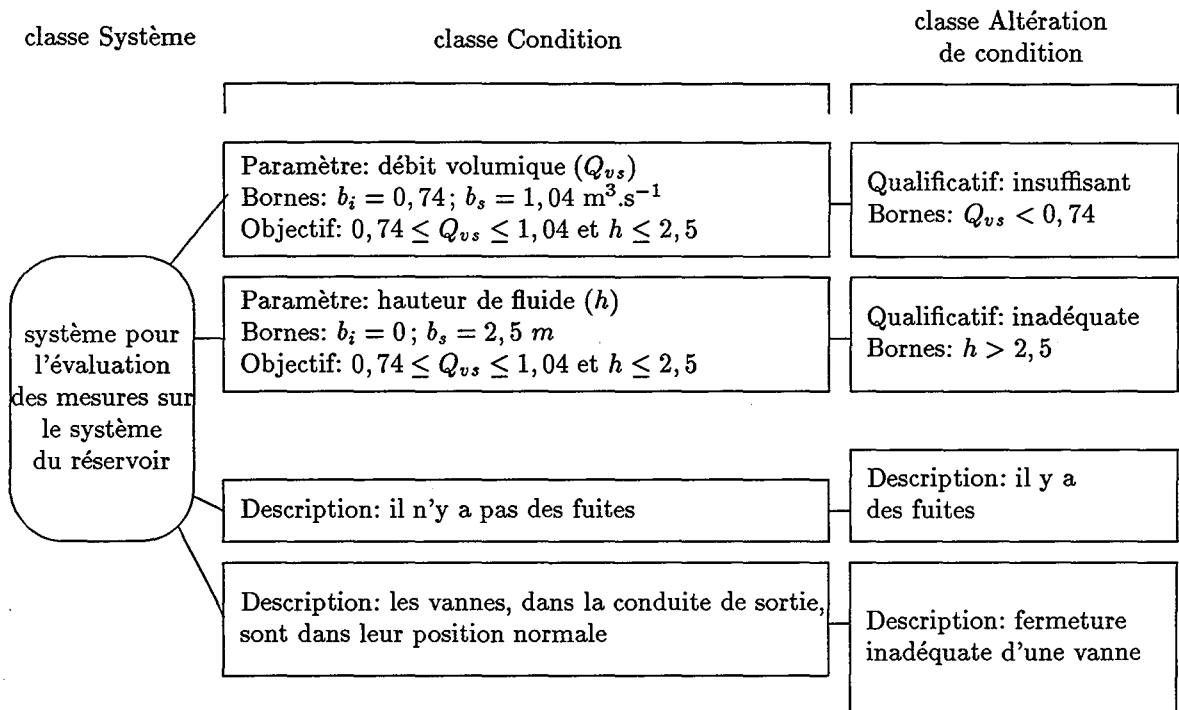


FIG. 5.6 - Représentation de faits observables et d'altérations de conditions nécessaires rapportés au fonctionnement du réservoir (Exemple 4.3, scénarios 2 et 5).

5.2.4 Les altérations des conditions nécessaires

La connaissance des conditions nécessaires est régulée:

- par la recherche des facteurs dont dépend la qualité des résultats;
- par la représentation du processus à partir duquel les effets sur cette qualité peuvent être expliqués.

Ainsi, la connaissance rapportée à un élément représenté à partir de la classe Altération de condition est définie à partir:

- (1) de la représentation des relations entre les altérations des conditions nécessaires et les faits observables;
- (2) de la représentation des relations entre les altérations des conditions nécessaires.

Les relations rapportées au deuxième point ci-dessus expriment la hiérarchie des objectifs. Dans cette perspective, on peut les représenter en considérant (Figure 5.8):

- les *conséquences* d'une altération d'une condition nécessaire prise en compte en tant qu'"influence";
- les *causes* d'une altération de condition nécessaire prise en compte en tant que "contribution".

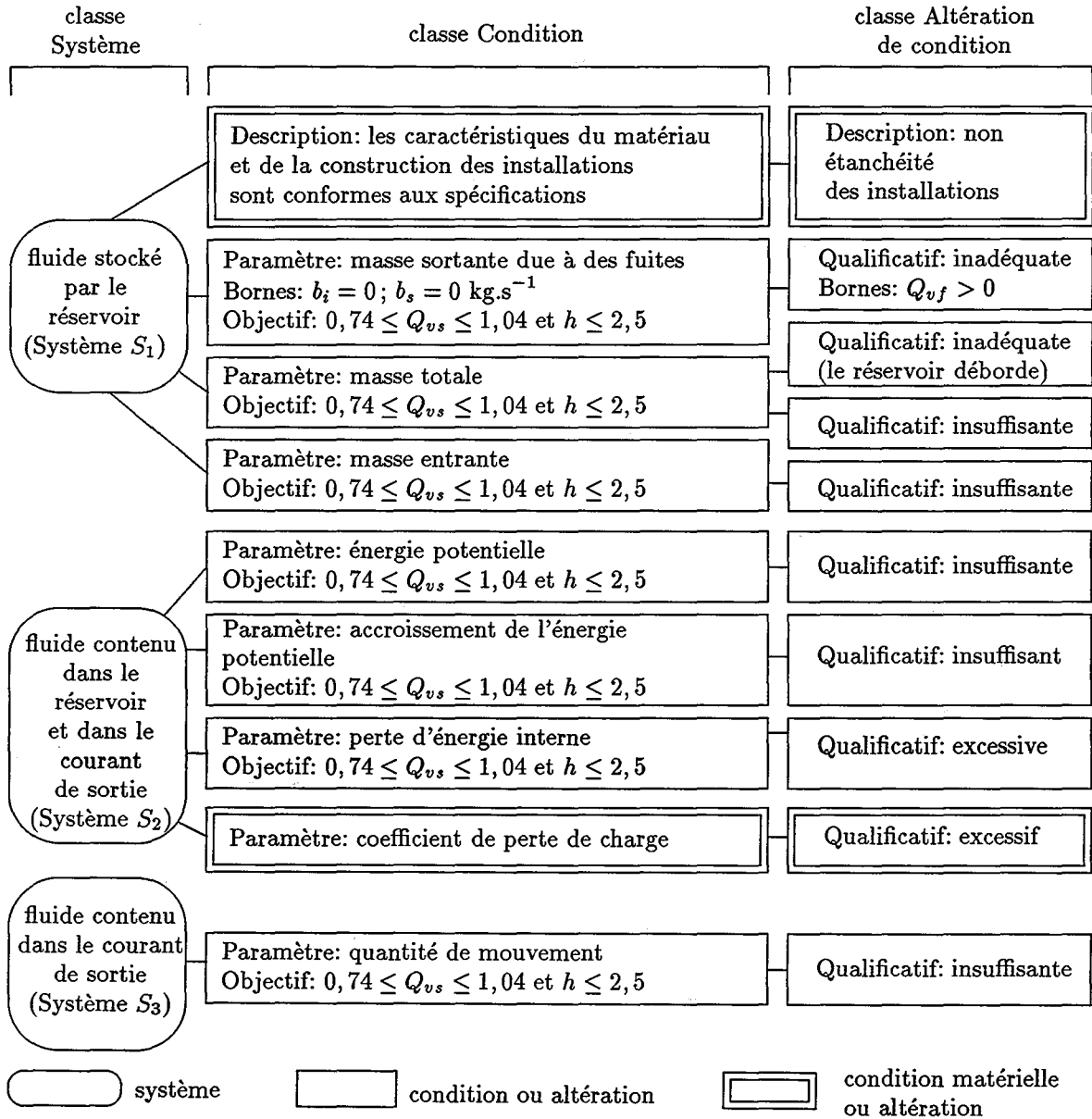


FIG. 5.7 - Représentation de faits observables et d'altérations de conditions nécessaires rapportés au fonctionnement du réservoir (Exemple 4.3, scénarios 2 et 5).

Alors, un élément R , représenté à partir de la classe Relation, est défini par les attributs suivants:

- *Altération:*

1. Élément représentant un fait F observable, caractérisant l'information sur l'altération d'une condition nécessaire, à laquelle l'élément R est associé.
2. Élément représentant une altération A de condition nécessaire, à laquelle l'élément R est associé.

- Cause:

1. Elément représentant une altération A' de condition nécessaire, auquel l'élément A en tant qu'"contribution" est associé.
2. Elément représentant une altération A' de condition nécessaire en tant que "contribution", auquel l'élément F est associé.

- Conséquence:

1. Elément représentant une altération A'' de condition nécessaire, auquel l'élément A en tant qu'"influence" est associé.
2. Elément représentant un fait observable F' , auquel l'élément A en tant que "contribution" est associé.

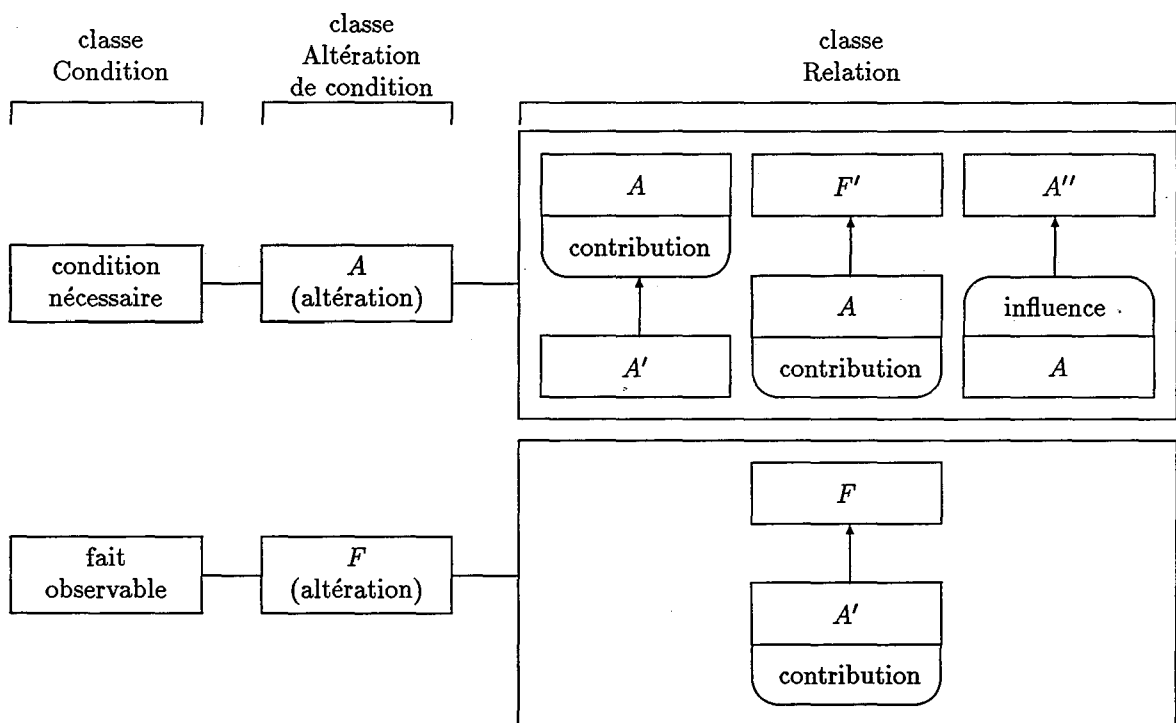


FIG. 5.8 - Eléments de la base de connaissances, représentés à partir de la classe Relation.

Les éléments représentés à partir de la classe Relation définissent un ensemble \mathcal{G} . Les noeuds d'un graphe $G \in \mathcal{G}$ sont définis par des éléments représentés à partir de la classe Altération de condition. Un arc est pointé par l'attribut "conséquence" lors de la définition d'un élément représenté à partir de la classe Relation.

Exemple 5.4

Dans cet exemple, on considère le fonctionnement de deux réservoirs (Figure 5.9).

La Figure 5.10 illustre les relations entre les éléments représentés à partir de la classe Altération de condition, cités dans l'Exemple 5.3 (Figure 5.6 et Figure 5.7). Les faits

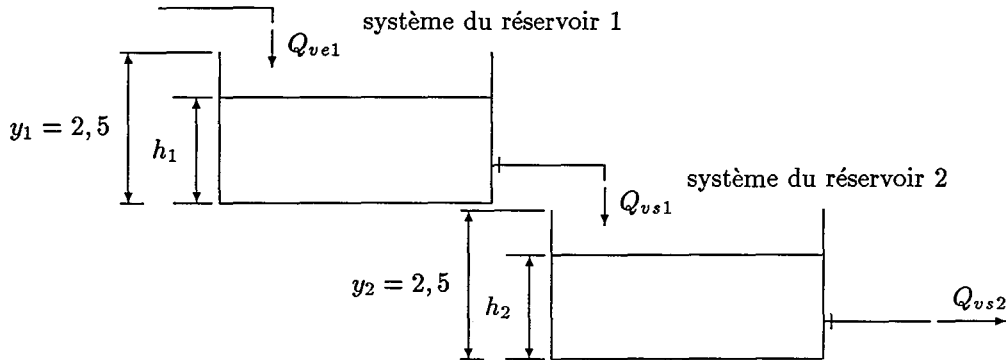


FIG. 5.9 - Système composé par deux réservoirs.

observables et les altérations des conditions nécessaires sont présentés d'une façon résumée (voir la Figure 5.11).

Ainsi, dans la Figure 5.10 un graphe G , défini à partir d'éléments R représentés à partir de la classe Relation, est présenté.

Considérons l'arc liant les noeuds 1 et 2. Cet arc est défini à partir de deux éléments:

– un élément R_1 , défini par les attributs:

1. *Altération*: le fait observable, représenté à partir de la classe Altération de condition, correspondant au noeud 1 (SEMR2: débit volumique insuffisant $Q_{vs2} < 0,74\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, l'objectif étant OBJ0.);
2. *Cause*: l'altération de condition de fonctionnement, représentée à partir de la classe Altération de condition, correspondant au noeud 2 (syst. rés. 2/ S_3 : quantité de mouvement insuffisante.).

– un élément R_2 , défini par les attributs:

1. *Altération*: l'altération de condition de fonctionnement, correspondant au noeud 2;
2. *Cause*: le fait observable, correspondant au noeud 1.

Dans un premier temps, les éléments R_1 et R_2 sont définis en considérant que la satisfaction des exigences dépend de l'état du système physique S_3 , et que celui-ci est défini par la quantité de mouvement. Dans un deuxième temps, les éléments R_1 et R_2 sont définis en considérant que Q_{vs2} est une mesure à partir de laquelle la quantité de mouvement peut être caractérisée.

5.3 Définition du mécanisme d'inférence

La base de connaissances est construite de manière à ce que les altérations des conditions nécessaires puissent être utilisées comme des hypothèses lors d'un diagnostic. Alors,

étant donné un ensemble \mathcal{E} de faits observés (inclus dans la base de faits), deux opérations sont définies:

- la recherche des causes,
- pour chaque cause recherchée, la recherche des conséquences.

La recherche des causes

La recherche des causes est réalisée en parcourant un graphe G (défini par les éléments représentés à partir de la classe Relation) dans le sens inverse à la direction pointée par les arcs. L'opération est initiée à partir d'un noeud défini par un fait observable $F \in \mathcal{E}$ inclus dans la base de faits, et comprend l'inspection de chaque noeud afin de l'identifier soit en tant qu'*hypothèse du dysfonctionnement* soit en tant qu'*hypothèse du défaut*.

Dès que l'opération est initiée, les noeuds sont caractérisés de la manière suivante:

- noeud *initial*: le noeud défini par un fait observable inclus dans la base de faits, à partir duquel l'opération est initiée;
- noeud *présent*: celui qui est l'objet présent d'une inspection;
- noeud *successeur* d'un noeud présent: l'un des noeuds encore non inspectés, à parcourir dans la recherche des causes;
- noeud *antécédent* d'un noeud présent: un noeud parcouru lors de la recherche des causes, et inspecté;
- noeud *terminal*:
 1. celui qui n'est pas pointé par un arc;
 2. tout noeud défini par une altération d'une condition matérielle.

La recherche des conséquences

La recherche des conséquences est réalisée en parcourant un graphe G dans le sens de la direction pointée par les arcs. L'opération est initiée à partir d'un noeud objet d'une inspection lors de la recherche des causes. L'objectif de cette opération est de déterminer, pour chaque noeud objet d'inspection:

- l'ensemble $\mathcal{F} = [F_1, F_2, \dots, F_n]$ composé par des noeuds parcourus, lesquels sont définis par des faits observables caractérisant des altérations de conditions nécessaires, et qui sont inclus dans la base de faits ($\mathcal{F} \subset \mathcal{E}$).

5.3.1 L'hypothèse du dysfonctionnement

L'identification d'un noeud d'un graphe G , en tant qu'hypothèse du dysfonctionnement, est faite en fonction des définitions suivantes:

définition 1: noeud-candidat

Soient:

- $\mathcal{F}_{\text{noeud antécédent}} = [F_1, F_2, \dots, F_n]$ l'ensemble des faits observés, déterminé lors de la recherche des conséquences d'un noeud *antécédent* direct d'un noeud *présent* lequel est l'objet d'inspection ($\mathcal{F}_{\text{noeud antécédent}} \subset \mathcal{E}$);
- $\mathcal{F}_{\text{noeud présent}} = [F_1, F_2, \dots, F_n]$ l'ensemble des faits observés, déterminé lors de la recherche des conséquences d'un noeud *présent* lequel est l'objet d'inspection ($\mathcal{F}_{\text{noeud présent}} \subset \mathcal{E}$);

Un noeud défini par une altération d'une condition nécessaire est *noeud-candidat* si, lors de la recherche des causes:

$$(\mathcal{F}_{\text{noeud antécédent}} \cap \mathcal{F}_{\text{noeud présent}}) \neq \emptyset$$

Donc, un noeud est *noeud-candidat* si, en tant qu'hypothèse, il explique un fait observé nouveau lors de la recherche des causes.

définition 2: noeud-non-candidat

Un noeud est *noeud-non-candidat* si:

$$(\mathcal{F}_{\text{noeud antécédent}} \cap \mathcal{F}_{\text{noeud présent}}) = \emptyset$$

Donc, un noeud est *noeud-non-candidat* lorsque, en tant qu'hypothèse, il n'explique aucun fait observé nouveau dans la recherche des causes.

définition 3: noeud-résolu

Un noeud est *noeud-résolu* si, lors de l'inspection dans la recherche des causes, il se présente dans une des situations suivantes:

- le noeud est *noeud-candidat* et chacun de ses noeuds successeurs est un *noeud-non-candidat*
- le noeud est *noeud-candidat* et il est un noeud *terminal*.

définition 4: noeud-hypothèse-du-dysfonctionnement

Un noeud est *noeud-hypothèse-du-dysfonctionnement* s'il est un *noeud-résolu*.

Exemple 5.5

Considérons les relations entre les éléments représentés à partir de la classe Altération de condition, présentés dans la Figure 5.10. Le schéma des éléments de cette figure est présenté dans la Figure 5.12. L'objectif est d'établir le diagnostic dès que les noeuds 1 et 11 sont inclus dans la base de faits. Ces noeuds sont définis par des informations sur le procédé, rapportées à des altérations de conditions de fonctionnement.

L'objectif de la recherche des causes est de sélectionner l'hypothèse concernant l'altération d'une condition de fonctionnement, à partir de laquelle les faits observés (noeuds 1 et 11, Figure 5.12) peuvent être expliqués.

Considérons que la recherche des causes est initiée à partir du noeud 1. A partir de l'inspection de son successeur (le noeud 2) par la recherche des conséquences, on détermine que le noeud 2 explique le fait observé correspondant au noeud 1 :

$$\mathcal{F}_{\text{noeud 2}} = [F_{\text{noeud 1}}]$$

Du fait que le noeud 1 est défini par un fait observable, $\mathcal{F}_{\text{noeud 1}} = \emptyset$ (le noeud 1 n'a pas des conséquences). Donc, le noeud 2 est un *noeud-candidat*.

Alors, en parcourant le graphe à partir du noeud 2 dans le sens inverse à la direction pointée par les arcs, on trouve que le noeud 12 explique les faits observés correspondant aux noeuds 1 et 11. Considérant que $\mathcal{F}_{\text{noeud 10}} = \mathcal{F}_{\text{noeud 1}}$:

$$(\mathcal{F}_{\text{noeud 10}} \cap \mathcal{F}_{\text{noeud 12}}) \neq \emptyset$$

Donc, le noeud 2 devient un *noeud-non-candidat*, et le noeud 12 est un *noeud-candidat*.

Aucun fait observé nouveau n'est déterminé à partir de la recherche des conséquences des successeurs du noeud 12. Ce noeud est, par conséquent, un *noeud-résolu*, et il est identifié comme l'*hypothèse du dysfonctionnement*.

5.3.2 L'hypothèse du défaut

Dès que, lors de la recherche des causes, un noeud est caractérisé en tant que *noeud-hypothèse-du-dysfonctionnement*, deux situations sont possibles :

- le noeud est défini par une altération d'une condition de fonctionnement ou par une altération d'une condition opératoire. Dans ce cas, le diagnostic présente seulement une explication théorique du phénomène physique et n'identifie pas la cause originelle du dysfonctionnement.
- le noeud est défini par une altération d'une condition matérielle. Le diagnostic présente autant l'explication du phénomène physique que du défaut à son origine. Cette situation est possible dans les circonstances où un fait observable, caractérisant l'altération d'une condition matérielle, est inclus dans la base de faits. Toutefois, dans les situations réelles, ceci n'est pas souvent le cas.

Dans les situations concernant le premier point ci-dessus, la recherche des causes doit se poursuivre. L'objectif de la recherche des causes est de sélectionner l'hypothèse à partir de laquelle l'hypothèse du dysfonctionnement peut être expliquée. L'objectif de la recherche des conséquences est de mettre en oeuvre l'identification des noeuds définis par une altération de condition matérielle, en tant qu'hypothèses du défaut possibles.

La recherche de causes est basée sur la stratégie classique (Pearl 1984) de réduction du problème. Le problème de sélection des altérations des conditions matérielles, en tant que causes originelles, est décomposé en ensembles de problèmes plus simples: les altérations des conditions de fonctionnement ou des conditions opératoires.

La recherche des causes est initiée à partir d'un noeud H identifié comme hypothèse du dysfonctionnement. Considérons que \mathcal{O} est l'ensemble des faits observables déterminé

à partir de la recherche des conséquences d'un noeud. Lors de l'inspection de H , \mathcal{O}_H est l'ensemble des faits observables déterminé à partir de la recherche des conséquences. Les successeurs d'un noeud inspecté ne sont pas parcourus si l'ensemble $\mathcal{O}_{\text{noeud inspecté}}$ contient un fait observable nouveau (non inclu dans la base de faits), c'est-à-dire:

$$(\mathcal{O}_H \cap \mathcal{O}_{\text{noeud inspecté}}) \neq \emptyset$$

Alors, soient N un noeud défini par une altération A d'une condition matérielle, lequel est l'objet d'une inspection, et R un élément représenté à partir de la classe Relation. Considérons que R est associé à l'élément A dans la base de connaissances, et qu'un fait observable F est défini comme attribut "conséquence" de R . Considérons aussi que F est un élément associé à un système du type "système du diagnostic".

A partir de l'activité de l'agent chargé de l'information pour le diagnostic, le fait F peut être éventuellement inclus dans la base de faits. Ceci se produisant, le noeud N est identifié comme l'hypothèse du défaut.

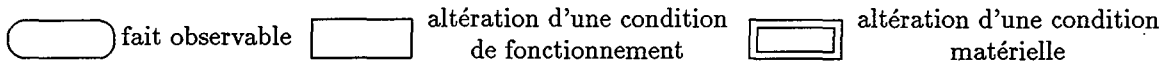
Un diagnostic est établi dès qu'un noeud est défini par une altération d'une condition matérielle et, à partir de la recherche des conséquences, est identifié comme hypothèse du défaut.

Exemple 5.6

Dans l'Exemple 5.5, le noeud 12 du graphe présenté dans la Figure 5.12 est défini par une altération d'une condition de fonctionnement. Dans ce cas, le diagnostic présente seulement une explication théorique du phénomène physique, et n'identifie pas la cause originelle du dysfonctionnement.

Par ailleurs, l'hypothèse du dysfonctionnement correspondant au noeud 12 (établie dans l'Exemple 5.5) peut être expliquée, éventuellement, en identifiant un noeud défini par une altération de condition matérielle en tant qu'hypothèse du défaut.

Alors, la recherche des causes, réalisée à partir du noeud 12, amène à l'inspection du noeud 14 (Figure 5.12). Si, à partir de l'activité de l'agent chargé de l'information pour le diagnostic, le fait observable correspondant au noeud 15 est inclus dans la base de faits, le noeud 14 est identifié comme l'hypothèse du défaut.



OBJ0: $0,74 \leq Q_{vs2} \leq 1,04 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $h_1 \leq 2,5$ et $h_2 \leq 2,5$

SEMR1: système pour l'évaluation des mesures sur le système du réservoir 1

SEMR2: système pour l'évaluation des mesures sur le système du réservoir 2

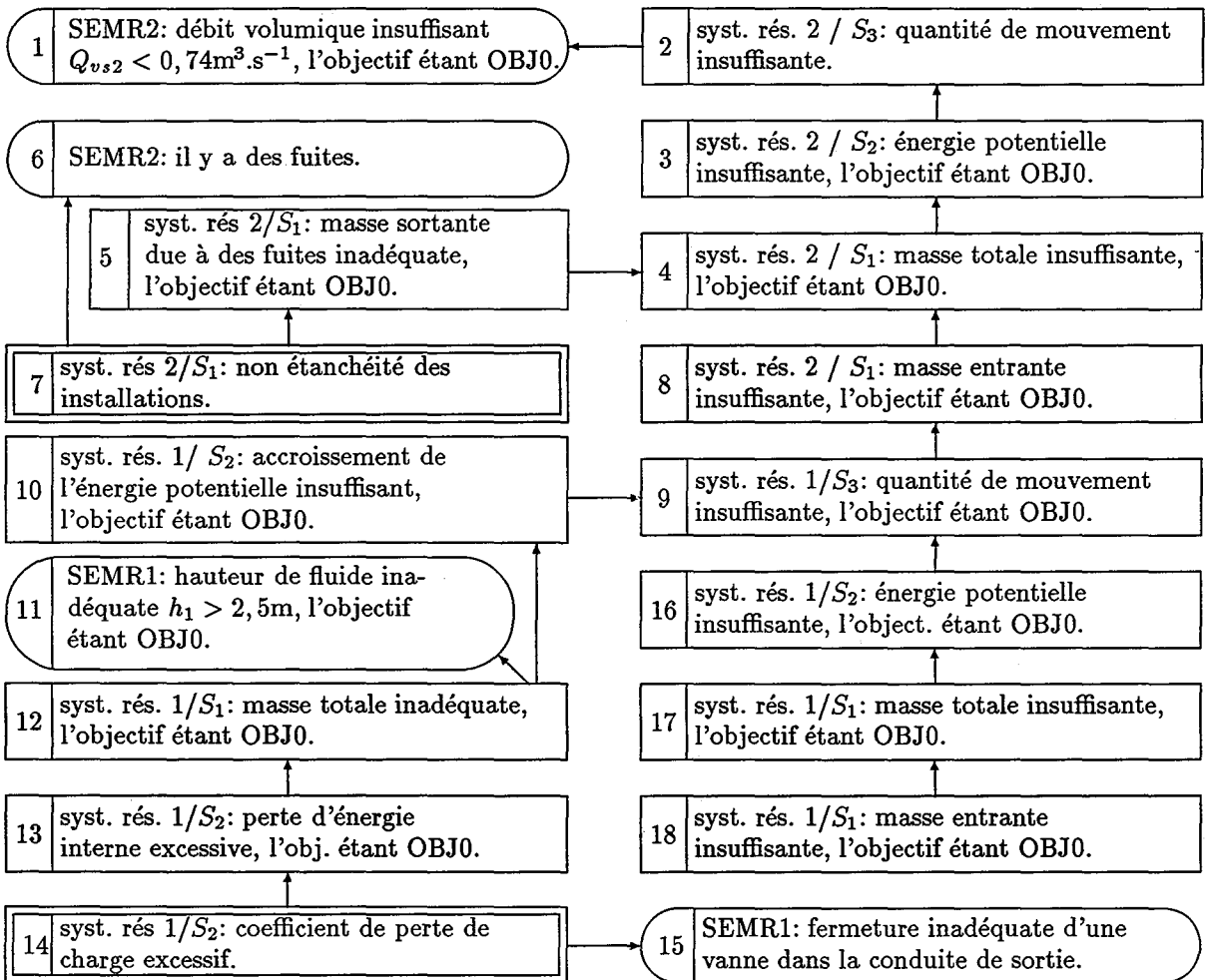


FIG. 5.10 - Relations entre les éléments représentés à partir de la classe Altération de Condition, concernant le fonctionnement du réservoir (Exemple 4.3, scénarios 2 et 5).

classe	attribut	
Système	nom du système:	système pour l'évaluation des mesures sur le système du réservoir 2
Condition	paramètre:	débit volumique (Q_{vs2})
Altération de condition	bornes:	$Q_{vs2} < 0,74\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Altération de condition	qualificatif:	insuffisant
Condition	objectif:	$0,74 \leq Q_{vs2} \leq 1,04$, $h_1 \leq 2,5$ et $h_2 \leq 2,5$

Resumé: système pour l'évaluation des mesures sur le système du réservoir 2: débit volumique insuffisant $Q_{vs2} < 0,74\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, l'objectif étant $0,74 \leq Q_{vs2} \leq 1,04$, $h_1 \leq 2,5$ et $h_2 \leq 2,5$.

Système	nom du système:	fluide stocké par le réservoir (Système S_1)
Altération de condition	description:	non étanchéité des installations

Resumé: fluide stocké par le réservoir (Système S_1): non étanchéité des installations.

FIG. 5.11 - Résumé récapitulatif de la représentation d'un élément à partir de la classe Altération de Condition.

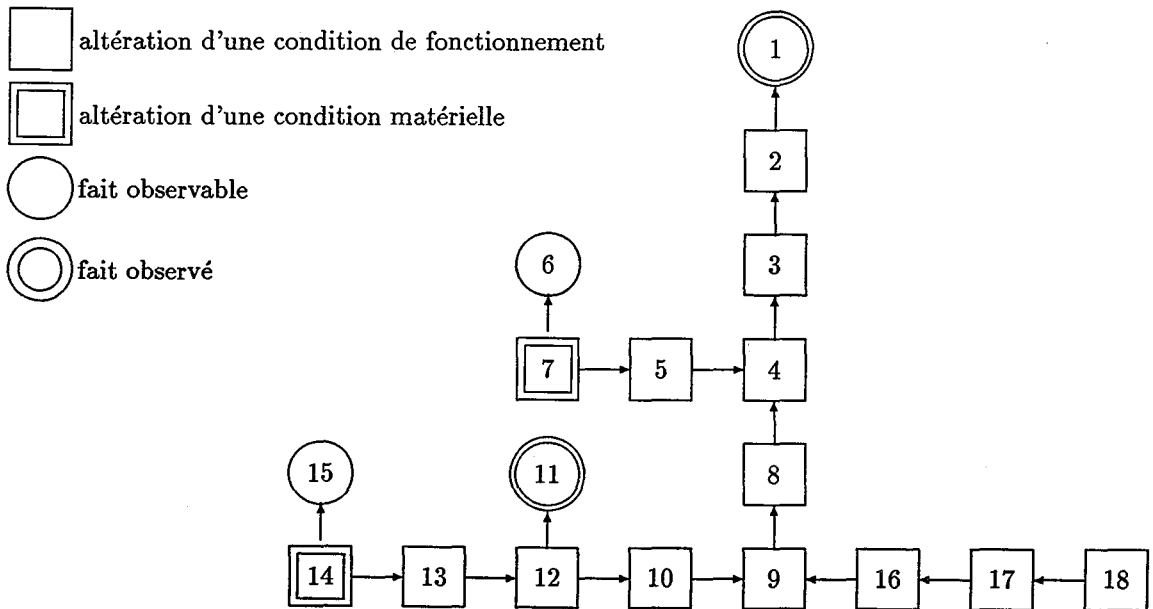


FIG. 5.12 - Graphe où les noeuds et les arcs correspondent aux éléments représentés lors de l'Exemple 5.4.

Chapitre 6

Diagnostic lors du dysfonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité

6.1 Le modèle mathématique

Le système constitué par le réacteur¹, dont on a introduit les notions du fonctionnement lors de l'Exemple 4.1, est modélisé à partir de la considération de deux volumes de contrôle (Figure 6.1):

- VC_1 concernant le mélange réactionnel dans le réservoir;
- VC_2 concernant le fluide caloporteur à l'intérieur de la double enveloppe.

Les quantités fondamentales considérées correspondent à:

- La masse totale du mélange réactionnel associée au volume de contrôle VC_1 ;
- La masse du réactif (constituant A) associée au volume de contrôle VC_1 ;
- L'énergie totale associée au volume de contrôle VC_1 ;
- L'énergie totale associée au volume de contrôle VC_2 .

La masse du constituant B n'est pas prise en compte, lorsque celle-ci est définie à partir de la masse totale du mélange réactionnel et de la masse du réactif A, associées au volume de contrôle VC_1 . La quantité de mouvement des volumes de contrôle VC_1 et VC_2 est négligée, en considérant qu'elle ne change pas quelque soit le mode opératoire. Le volume du fluide caloporteur, dans la double enveloppe, est constant.

¹La méthode de simulation numérique du réacteur se trouve dans (Luyben 1990). Le modèle de connaissance est présenté dans (Stephanopoulos 1984), (Levenspiel 1972) et (Villermaux 1993).

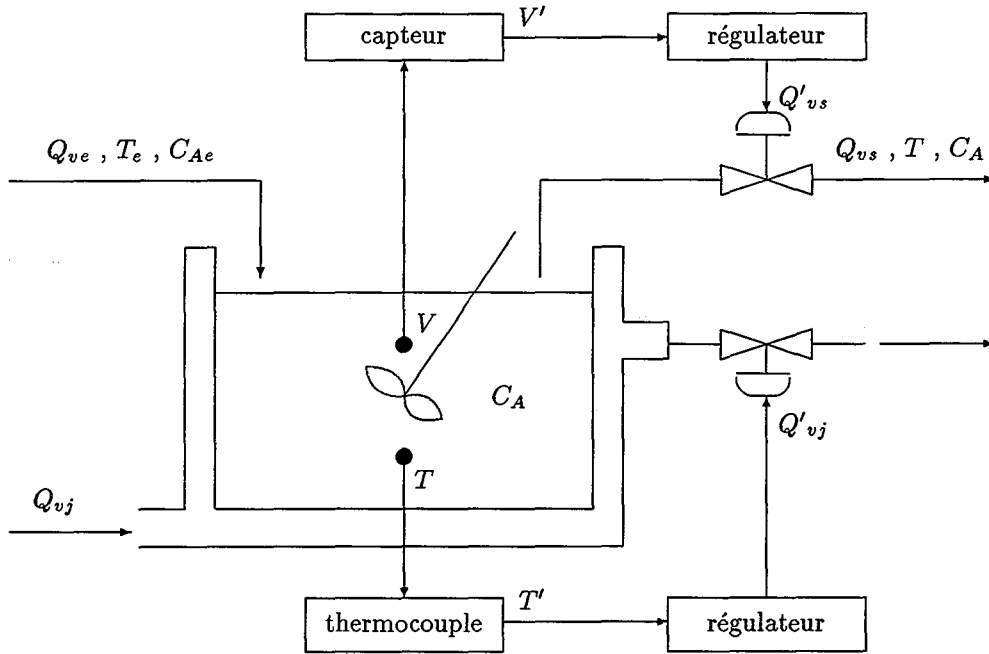


FIG. 6.1 - Réacteur.

6.1.1 Application du principe de conservation

Volume de contrôle \$VC_1\$: bilans de matière et d'énergie

Bilan de matière

L'application du principe de conservation sur la masse totale du mélange réactionnel associée au volume de contrôle \$VC_1\$ amène à :

$$\begin{array}{l} \text{masse totale} \\ \text{du mélange réactionnel} \\ \text{accumulée} \end{array} = \begin{array}{l} \text{masse} \\ \text{entrante} \end{array} - \begin{array}{l} \text{masse} \\ \text{sortante} \\ \text{du mélange} \end{array} + \begin{array}{l} \text{masse totale} \\ \text{du mélange réactionnel} \\ \text{générée ou consommée} \end{array} \quad (6.1)$$

ou

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_e Q_{ve} - \rho Q_{vs} + 0 \quad (6.2)$$

- où
- \$\rho_e, \rho\$ = masse volumique à l'entrée du réacteur (\$\text{kg.m}^{-3}\$)
 - \$\rho\$ = masse volumique du mélange réactionnel (\$\text{kg.m}^{-3}\$)
 - \$Q_{ve}, Q_{vs}\$ = débit volumique à l'entrée et à la sortie du réacteur (\$\text{m}^3.\text{s}^{-1}\$)
 - \$V\$ = volume du mélange réactionnel dans le réservoir (\$\text{m}^3\$)

Bilan de matière du réactif

L'application du principe de conservation sur la masse du réactif A associée au volume de contrôle \$VC_1\$ amène à :

$$\begin{array}{l} \text{masse du réactif} \\ \text{accumulée} \end{array} = \begin{array}{l} \text{masse du réactif} \\ \text{entrante} \end{array} - \begin{array}{l} \text{masse du réactif} \\ \text{sortante} \end{array} - \begin{array}{l} \text{masse du réactif} \\ \text{consommée} \\ \text{par la réaction} \end{array} \quad (6.3)$$

ou

$$\frac{d(n_A)}{dt} = \frac{d(C_A V)}{dt} = C_{Ae} Q_{ve} - C_A Q_{vs} - r_A V \quad (6.4)$$

- où r_A = vitesse de la réaction ($\text{kmol} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^3)^{-1}$)
 C_{Ae} = concentration molaire de réactif à l'entrée du réacteur ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$)
 C_A = concentration molaire de réactif dans le mélange réactionnel ($\text{kmol} \cdot \text{m}^{-3}$)
 n_A = nombre de moles de réactif dans le mélange réactionnel

D'après la relation d'Arrhénius, la variation de la vitesse r_A avec la température est donnée par:

$$r_A = k e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (6.5)$$

- où k = facteur préexponentiel (s^{-1})
 E = énergie d'activation ($\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$)
 R = constante des gaz parfaits ($\text{kJ} \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1}$)
 T = température du mélange réactionnel (K)

Bilan d'énergie

L'application du principe de conservation de l'énergie totale associée au volume de contrôle VC_1 amène à:

$$\begin{array}{l} \text{énergie totale} \\ \text{accumulée} \end{array} = \begin{array}{l} \text{énergie totale} \\ \text{entrante} \end{array} - \begin{array}{l} \text{énergie totale} \\ \text{sortante} \end{array} - \begin{array}{l} \text{énergie prélevée} \\ \text{par le fluide caloporteur} \end{array} \quad (6.6)$$

Dans le bilan ci-dessus on a négligé le travail mécanique de l'agitateur. Ainsi, l'énergie totale du mélange réactionnel est donnée par:

$$E = U + K + P \quad (6.7)$$

où U est l'énergie interne, K est l'énergie cinétique et P l'énergie potentielle du mélange réactionnel.

Par ailleurs, considérant que le réacteur ne se déplace pas ($dK/dt = dP/dt = 0$), le terme à gauche du bilan d'énergie du volume de contrôle VC_1 est donné par:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d(U + K + P)}{dt} = \frac{dU}{dt} \quad (6.8)$$

Du fait que la matière associée au volume de contrôle est formée par un liquide, on peut procéder à l'approximation suivante:

$$\begin{array}{l} \text{énergie totale accumulée,} \\ \text{par le mélange réactionnel} \\ \text{(volume de contrôle } VC_1) \end{array} = \frac{dU}{dt} \simeq \frac{dH}{dt} = \begin{array}{l} \text{enthalpie totale accumulée,} \\ \text{par le mélange réactionnel} \\ \text{(volume de contrôle } VC_1) \end{array} \quad (6.9)$$

De plus,

$$\text{énergie totale entrante} = \rho_e Q_{ve} h_e(T_e) \quad (6.10)$$

et

$$\text{énergie totale sortante} = \rho Q_{vs} h(T) \quad (6.11)$$

où h_e est l'enthalpie massique à l'entrée, h est l'enthalpie massique du mélange réactionnel, et

$$\begin{aligned} T_e &= \text{température à l'entrée (K)} \\ T &= \text{température du mélange réactionnel (K)} \end{aligned}$$

Ainsi, le bilan d'énergie du volume de contrôle VC₁ est décrit par:

$$\frac{dH}{dt} = \rho_e Q_{ve} h_e(T_e) - \rho Q_{vs} h(T) + \dot{Q} \quad (6.12)$$

où \dot{Q} est la puissance thermique (algébrique) cédée par la double enveloppe au mélange réactionnel.

Volume de contrôle VC₂: bilan d'énergie

L'application du principe de conservation de l'énergie totale associée au volume de contrôle VC₂ (le fluide caloporteur contenu dans la double enveloppe) amène à l'équation:

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{Q_{vj}(T_{je} - T_j)}{V_j} - \frac{\dot{Q}}{\rho_j V_j c_j} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \text{où } T_j &= \text{moyenne de la température du fluide caloporteur à l'intérieur de la} \\ &\quad \text{double enveloppe (K)} \\ T_{je} &= \text{température du fluide caloporteur à l'entrée de la double} \\ &\quad \text{double enveloppe (K)} \\ Q_{vj} &= \text{débit volumique de fluide caloporteur (m}^3\text{s}^{-1}\text{)} \\ V_j &= \text{volume à l'intérieur de la double enveloppe (m}^3\text{)} \\ c_j &= \text{capacité calorifique massique du fluide caloporteur (kJ.(kg.K)}^{-1}\text{)} \\ \rho_j &= \text{masse volumique du fluide caloporteur (kg.m}^{-3}\text{)} \end{aligned}$$

6.1.2 Caractérisation des quantités fondamentales

Les quantités fondamentales, dont la variation est représentée par le terme à gauche des bilans de matière et d'énergie, sont celles sur lesquelles le principe de conservation est appliqué. Elles définissent l'état du système, et peuvent être caractérisées par des variables que l'on désigne comme les variables d'état. Cela fait, les équations (6.2), (6.4) et (6.12) se présentent dans une forme plus adéquate à l'emploi.

Caractérisation de la masse totale du mélange réactionnel

Dans l'équation (6.2), il faut spécifier la masse volumique ρ du mélange réactionnel et son volume V . La masse volumique est une fonction des concentrations molaires C_A et C_B (concentration du constituant B dans le mélange réactionnel) et de la température T . La dépendance de ρ par rapport à C_A , C_B et T est, en général, faible. Donc, la masse

volumique peut être considérée comme constante dans la durée de la réaction. Alors, on suppose $\rho_e = \rho$, et

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (6.14)$$

La seule variable nécessaire pour la caractérisation de la masse totale du mélange réactionnel est V , et l'équation (6.2) devient:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{ve} - Q_{vs} \quad (6.15)$$

Caractérisation de la masse du réactif

A partir de quelques manipulations algébriques de l'équation (6.4):

$$\frac{d(C_A V)}{dt} = C_A \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_A}{dt} = C_{Ae} Q_{ve} - C_A Q_{vs} - k e^{-\frac{E}{RT}} C_A V \quad (6.16)$$

ou

$$V \frac{dC_A}{dt} = -C_A (Q_{ve} - Q_{vs}) + C_{Ae} Q_{ve} - C_A Q_{vs} - k e^{-\frac{E}{RT}} C_A V \quad (6.17)$$

et ainsi

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{ve}}{V} (C_{Ae} - C_A) - k e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (6.18)$$

Caractérisation de l'énergie totale du mélange réactionnel

L'enthalpie d'un système liquide est une fonction de la température et de sa composition

$$H = H(T, n_A, n_B) \quad (6.19)$$

où n_A et n_B est le nombre de moles du constituant A et du constituant B dans le mélange réactionnel.

La différentiation de l'expression ci-dessus amène à:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \frac{\partial H}{\partial n_A} \frac{dn_A}{dt} + \frac{\partial H}{\partial n_B} \frac{dn_B}{dt} \quad (6.20)$$

Par ailleurs,

$$\frac{\partial H}{\partial T} = \rho V c_p \quad \frac{\partial H}{\partial n_A} = \bar{H}_A(T) \quad \frac{\partial H}{\partial n_B} = \bar{H}_B(T) \quad (6.21)$$

où c_p est la capacité calorifique massique du mélange réactionnel ($\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$), et \bar{H}_A et \bar{H}_B est l'enthalpie molaire partielle du constituant A et du constituant B.

Etant donné que le bilan de matière du constituant B est donné par:

$$\frac{dn_B}{dt} = \frac{d(C_B V)}{dt} = 0 - C_B Q_{vs} + r_A V \quad (6.22)$$

une fois qu'on substitue les grandeurs ci-dessus et les grandeurs de l'équation (6.4) dans l'équation (6.20), on a:

$$\frac{dH}{dt} = \rho V c_p \frac{dT}{dt} + \bar{H}_A [C_{Ae} Q_{ve} - C_A Q_{vs} - r_A V] + \bar{H}_B [-C_B Q_{vs} + r_A V] \quad (6.23)$$

En substituant $\frac{dH}{dt}$ par son équivalent (équation (6.12)), on trouve:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = -\bar{H}_A [C_{Ae} Q_{ve} - C_A Q_{vs} - r_A V] - \bar{H}_B [-C_B Q_{vs} + r_A V] + \rho_e Q_{ve} h_e(T_e) - \rho Q_{vs} h(T) + \dot{Q} \quad (6.24)$$

Par ailleurs,

$$Q_{ve} \rho_e h_e(T_e) = Q_{ve} [\rho_e h_e(T) + \rho_e c_{pe} (T_e - T)] = Q_{ve} [C_{Ae} \bar{H}_A(T) + \rho_e c_{pe} (T_e - T)] \quad (6.25)$$

et

$$Q_{vs} \rho h(T) = Q_{vs} [C_A \bar{H}_A(T) + C_B \bar{H}_B(T)] \quad (6.26)$$

En substituant les grandeurs ci-dessus dans l'équation (6.24), on trouve:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = Q_{ve} \rho_e c_{pe} (T_e - T) + (\bar{H}_A - \bar{H}_B) r_A V + \dot{Q} \quad (6.27)$$

Finalement, du fait que $(\bar{H}_A - \bar{H}_B) = \Delta H_r =$ enthalpie de la réaction à la température T , que $\rho_e = \rho$ et que $c_{pe} = c_p$:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{ve}}{V} (T_e - T) + \frac{(-\Delta H_r) r_A}{\rho c_p} + \frac{\dot{Q}}{\rho c_p V} \quad (6.28)$$

où $\Delta H_r =$ enthalpie de la réaction ($\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$)

A partir de l'équation (6.28), on peut conclure que la température T du mélange réactionnel est la variable à partir de laquelle l'énergie totale du système peut être caractérisée.

Caractérisation de l'énergie totale du fluide contenu dans la double enveloppe

A partir de l'équation (6.13), on peut conclure que la température T_j du fluide caloporteur contenu dans la double enveloppe est la variable à partir de laquelle l'énergie totale du volume de contrôle VC_2 peut être caractérisée.

Le terme \dot{Q} de puissance thermique cédée par la double enveloppe au mélange réactionnel est donné par:

$$\dot{Q} = U A_H (T_j - T) \quad (6.29)$$

où U = coefficient de transfert de chaleur global ($\text{kW.m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
 A_H = surface d'échange thermique entre le mélange réactionnel et la double enveloppe (m^2)

6.1.3 Régulation

Considérons le cas où la stabilité du procédé est assurée par la commande de la température T du mélange, et où l'influence de la variation du débit volumique à l'entrée ou à la sortie du réacteur est prise en compte par une régulation indépendante du volume V du mélange réactionnel. Considérons que la commande de la température T et celle du volume V sont réalisées au moyen de régulateurs proportionnels. Ainsi, la régulation du réacteur est prise en compte à partir des équations suivantes:

$$Q'_{vs} = Q_{vsbi} - K_V(\bar{V} - V') \quad (6.30)$$

$$Q'_{vj} = Q_{vjbi} - K_C(\bar{T} - T') \quad (6.31)$$

où \bar{V}, \bar{T} = signal d'entrée de référence
 V', T' = signal de retour primaire (mesures du volume V et de la température T)
 Q_{vsbi}, Q_{vjbi} = biais du régulateur
 K_V, K_C = gain proportionnel du régulateur
 Q'_{vs}, Q'_{vj} = variable réglée (débit volumique à la sortie du réacteur Q_{vs} et débit volumique de fluide caloporteur Q_{vj})

6.2 Définition des connaissances qualitatives

6.2.1 Les contributions et les influences

Dans les équations (6.15), (6.18), (6.28) et (6.13), le terme à gauche représente la variation d'une quantité fondamentale S , laquelle définit l'état de la matière associée à un volume de contrôle VC , et est caractérisée par une variable dépendante x .

Dans les mêmes équations, les termes à droite représentent une grandeur G à partir de laquelle un phénomène physique, associé à un volume de contrôle VC , est pris en compte lors de l'application du principe de conservation sur la quantité fondamentale S .

Les "contributions" sont définies par les quantités S_i et par les grandeurs G_{ij} :

- dans l'équation (6.15): S_1 = masse totale, caractérisée par la variable dépendante V ; G_{11} = masse entrante, représentée par la variable indépendante Q_{ve} ; et G_{12} = masse sortante, représentée par la variable indépendante Q_{vs} .
- dans l'équation (6.18): S_2 = masse du réactif, caractérisée par la variable dépendante C_A ; $G_{21} = (Q_{ve}/V)(C_{Ae} - C_A)$ que l'on peut désigner par "flux net de réactif"; et $G_{22} = ke^{-\frac{E}{RT}}C_A$ = masse du réactif consommée par la réaction.

- dans l'équation (6.28): S_3 = enthalpie totale (du mélange réactionnel), caractérisée par la variable dépendante T ; $G_{31} = (Q_{ve}/V)(T_e - T)$ que l'on peut nommer comme "flux net d'enthalpie"; $G_{32} = (-\Delta H_r r)/(\rho c_p)$ que l'on peut associer à l'enthalpie générée par la réaction; et $G_{33} = -\dot{Q}/(\rho c_p V)$ que l'on peut nommer comme "puissance thermique prélevée par le fluide caloporteur".
- dans l'équation (6.13): S_4 = enthalpie totale (du fluide caloporteur contenu dans la double enveloppe), caractérisée par la variable dépendante T_j ; $G_{41} = (Q_{vj}/V_j)(T_{je} - T_j)$ que l'on peut nommer comme "flux net d'enthalpie" (du fluide caloporteur); et $G_{42} = Q/(\rho_j V_j c_j)$ que l'on peut nommer comme "puissance thermique reçue du mélange réactionnel".

A partir des équations (6.15), (6.18), (6.28) et (6.13), les "influences" sont définies par les paramètres et les variables indépendantes.

- dans l'équation (6.15): Q_{ve} et Q_{vs} .
- dans l'équation (6.18): Q_{ve} , C_{Ae} , A et E .
- dans l'équation (6.28): Q_{ve} , T_e , $(-\Delta H_r)$, A , E , ρ , c_p , U et A_H .
- dans l'équation (6.13): Q_{vj} , T_{je} , V_j , U , A_H , ρ_j et c_j .

Les relations entre les contributions et les influences

Soit $g(t)$ une variable indépendante ou un paramètre, représentés dans les équations du modèle quantitatif, à partir desquels une "influence" est définie. Une relation $R(G, g(t))$ est établie si $g(t)$ est représenté dans un terme définissant une grandeur G . Dans ces relations, la "contribution" définie par la grandeur G est un effet de $g(t)$.

Les relations entre les contributions

A partir du modèle quantitatif, les relations sont établies de la manière suivante:

- Pour chaque équation $\dot{S} = \sum_{i=1}^n G_i$, on établit les relations $R(S, G_i)$. Dans ces relations, la "contribution", définie par la quantité S , est un effet d'une des grandeurs G_i .
- Etant donné deux variables dépendantes x_1 et x_2 caractérisant, respectivement, deux quantités S_1 et S_2 , une relation $R(G, S_1)$ est établie si G est définie par l'un des termes de $\dot{S}_2 = \sum_{i=1}^n G_i$, et x_1 est représentée dans le terme définissant la grandeur G . Dans ces relations, la grandeur G est un effet de la quantité S_i .

La Figure 6.2 illustre les "contributions", "influences" et "relations" définies à partir des équations (6.15), (6.18), (6.28) et (6.13).

Réacteur soumis à régulation

L'objectif de la régulation du volume V du mélange réactionnel est de supprimer l'effet de la variation du débit volumique à l'entrée Q_{ve} ou à la sortie Q_{vs} du réacteur, de manière que $V = V' \simeq \bar{V}$.

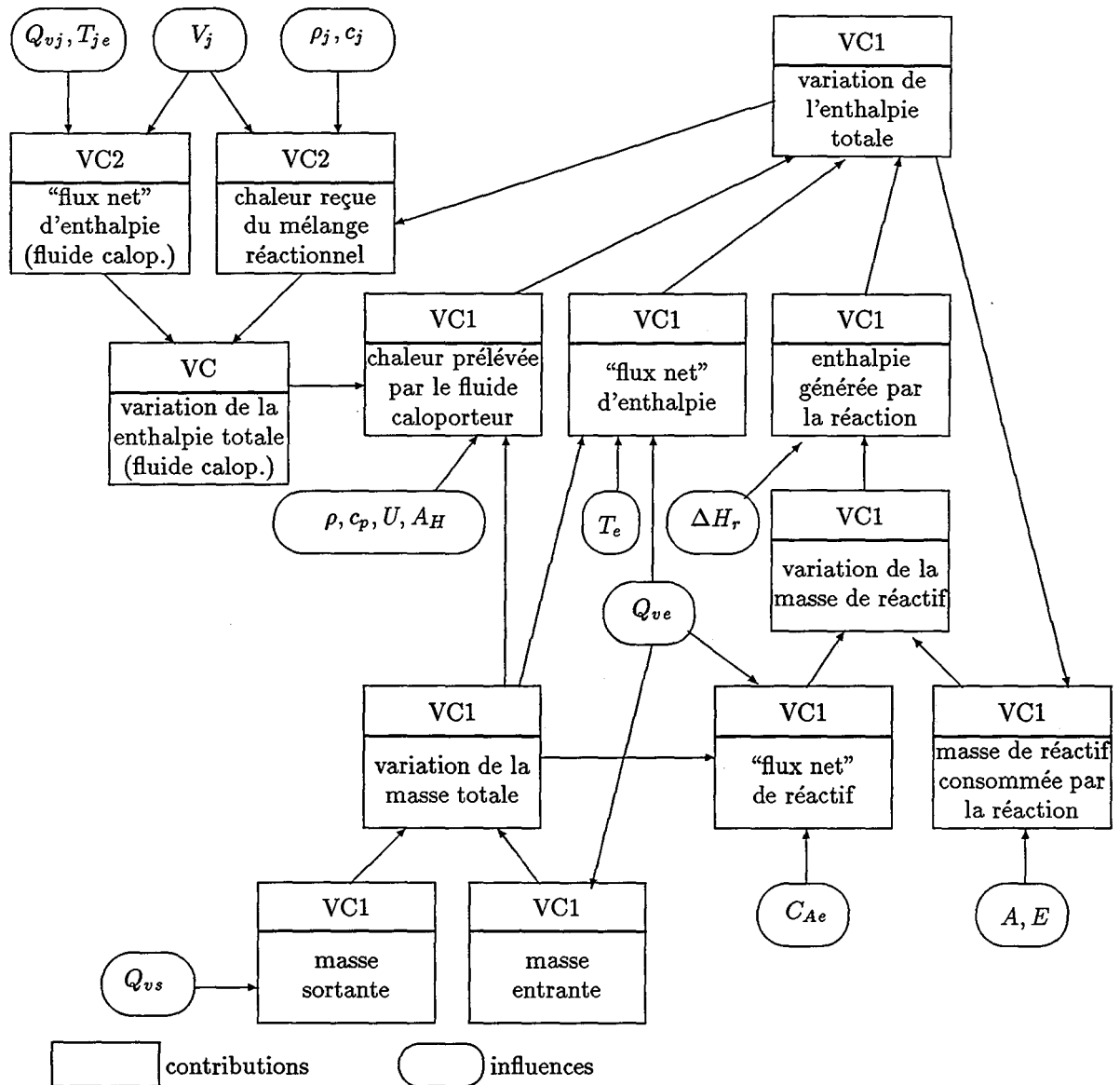


FIG. 6.2 - Contributions, influences et leurs relations lors du fonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité.

Cela est fait à partir de l'intervention sur le débit volumique de sortie Q_{vs} , de telle sorte que $Q_{vs} = Q'_{vs} = Q_{ve}$.

L'objectif de la régulation de la température T du mélange réactionnel est d'assurer la stabilité du procédé en présence des perturbations, de manière que $T = T' \simeq \bar{T}$. Cela est fait à partir de l'intervention sur le débit volumique de fluide caloporteur Q_{vj} de telle sorte que:

$$\frac{Q_{vj}(T_{je} - T_j)}{V_j} = \frac{Q'_{vj}(T_{je} - T_j)}{V_j}$$

et

$$\frac{Q'_{vj}(T_{je} - T_j)}{V_j} = -\frac{\dot{Q}}{\rho_j V_j c_j} = -\frac{\dot{Q}}{\rho c_p V} = \frac{Q_{ve}}{V}(T_e - T) + \frac{(-\Delta H_r)r_A}{\rho c_p}$$

Ainsi, dès que le réacteur est effectivement soumis à ces régulations, l'application du principe de conservation sur les quantités fondamentales amène aux équations suivantes:

$$0 \simeq Q_{ve} - Q_{vs} \quad (6.32)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{ve}}{V}(C_{Ae} - C_A) - k e^{-\frac{E}{RT}} C_A \quad (6.33)$$

$$0 \simeq \frac{Q_{ve}}{V}(T_e - T) + \frac{(-\Delta H_r)r_A}{\rho c_p} - \frac{UA_H(T - T_j)}{\rho c_p V} \quad (6.34)$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{Q_{vj}(T_{je} - T_j)}{V_j} + \frac{UA_H(T - T_j)}{\rho_j V_j c_j} \quad (6.35)$$

où $V \simeq \bar{V}$; $T \simeq \bar{T}$; $Q_{ve} = Q_{vs} = Q'_{vs}$ et $Q_{vj} = Q'_{vj}$

Q'_{vs} et Q'_{vj} définissent des nouvelles "influences", concernant de l'information, à partir de laquelle l'intervention sur le débit volumique à la sortie du réacteur et sur le débit volumique de fluide caloporteur permet la régulation du volume et de la température du mélange réactionnel. La Figure 6.3 illustre les nouvelles relations.

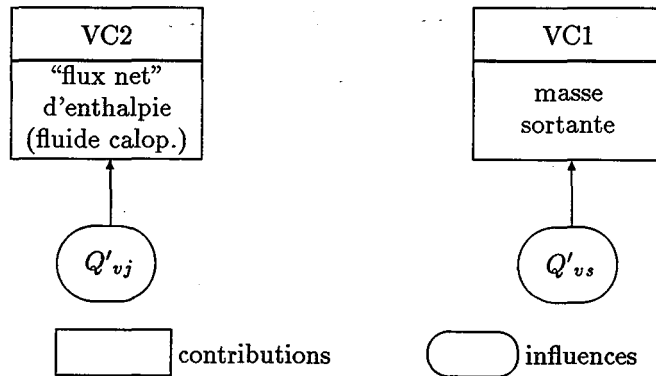


FIG. 6.3 - Relations entre des "influences" et des "contributions" lorsque le réacteur est soumis à une régulation.

6.2.2 La réalisation des objectifs et les conditions

Considérons que, à partir du cahier des charges, l'objectif fixé concerne l'obtention, au cours du temps, de valeurs souhaitées de la fraction molaire de réactif x_A dans le mélange réactionnel, qui doivent se trouver à l'intérieur d'un intervalle spécifié. La mesure de x_A est obtenue à partir des mesures de la concentration de réactif C_A et de la concentration de produit C_B dans le mélange réactionnel, où

$$x_A = \frac{C_A}{C_A + C_B}$$

Cet objectif est réalisé tant que le fonctionnement du réacteur est maintenu dans l'état d'équilibre (Exemple 4.1), et en absence de certaines perturbations dont l'effet n'est pas supprimé par les systèmes de commande. Ainsi, à partir de la considération, lors de ces deux situations, des "influences" dont les effets sur les "contributions" amènent à la non réalisation de l'objectif fixé, on peut définir les conditions nécessaires.

Dans un premier temps, considérons que la température et le volume du réacteur ne sont pas régulés, et, donc, que les effets de certains défauts ou de certaines perturbations sur les résultats souhaités ne sont pas supprimés. A partir des relations entre les influences et les contributions et des relations entre les contributions, les altérations des conditions nécessaires peuvent être définies. Ces altérations sont prises en compte lors de l'impact d'une grandeur $g(t)$ sur les grandeurs G et sur les quantités fondamentales S , menant:

- au changement de la masse totale du mélange réactionnel, caractérisée par le volume V ;
- au changement de la masse du réactif dans le mélange réactionnel, caractérisée par la concentration de réactif C_A ;
- au changement de l'enthalpie totale du mélange réactionnel, caractérisée par la température T ;
- au changement de l'enthalpie totale du fluide caloporteur contenu dans la double enveloppe, caractérisée par la température T_j .

Des *conditions internes* peuvent être définies à partir des paramètres et des variables indépendantes des équations (6.15), (6.18), (6.28) et (6.13). Les *conditions propres* sont définies à partir des termes des mêmes équations (représentant les grandeurs G et les quantités fondamentales S). Alors, les relations entre les altérations de ces conditions peuvent être établies en prenant en compte les relations entre les "influences" et les "contributions" et le rapport entre les termes des équations. Ainsi, par exemple, en prenant en compte le rapport entre les termes des équations (6.15) et (6.18)

$$\frac{dV}{dt} = Q_{ve} - Q_{vs}$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_{ve}}{V}(C_{Ae} - C_A) - ke^{-\frac{E}{RT}}C_A$$

on peut considérer qu'une valeur excessive ou insuffisante de la "masse sortante" (représentée par la variable indépendante Q_{vs}) peut avoir un rapport, respectivement, avec la diminution ou l'augmentation de la "masse totale" du mélange réactionnel (caractérisée par une diminution ou augmentation de V). On peut considérer aussi qu'une valeur excessive ou insuffisante du "flux net de réactif" (représenté par $[(Q_{ve}/V)(C_{Ae} - C_A)]$) peut avoir un rapport, respectivement, avec l'accroissement ou le décroissance de la "masse du réactif" (caractérisée par une augmentation ou diminution de C_A). Par ailleurs, du fait que le "flux net de réactif" dépend de V , on peut considérer que l'accroissement de la "masse totale" peut avoir un rapport avec une valeur insuffisante du "flux net de réactif". Dès que ces considérations concernent l'éventuelle non obtention des résultats souhaités

(une valeur excessive ou insuffisante de x_A), elles définissent des relations entre des altérations de conditions propres. D'une façon similaire, on peut considérer qu'une valeur insuffisante du débit volumique à l'entrée du réacteur Q_{ve} peut avoir un rapport avec une valeur insuffisante du "flux net de réactif"; en définissant une relation, respectivement, entre l'altération d'une condition interne et l'altération d'une condition propre.

La Figure 6.4 illustre des relations entre des altérations de conditions nécessaires.

VC1: mélange réactionnel

VC2: fluide caloporteur contenu dans la double enveloppe

S_4 : système pour la commande du volume du mélange réactionnel

S_3 : système pour la commande de la température du mélange réactionnel

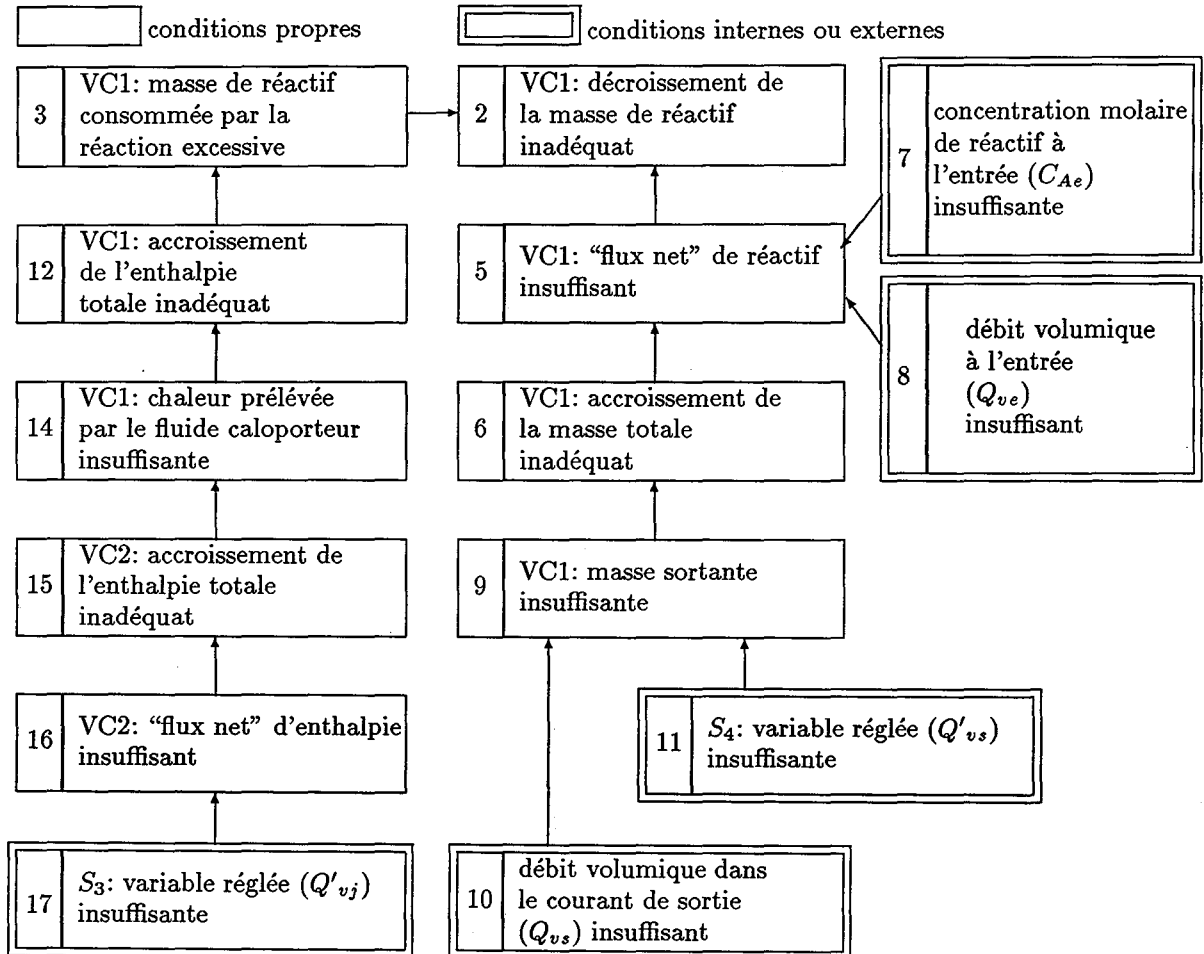


FIG. 6.4 - Relations entre des altérations de conditions nécessaires lors du dysfonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité.

Fonctionnement avec régulation de la température et du volume

Dès que le fonctionnement du réacteur est soumis à une régulation du volume V et de la température T du mélange réactionnel, deux conditions propres sont définies: le

non changement de la masse et de l'enthalpie totales du mélange réactionnel. Celles-ci dépendent de la qualité des informations Q'_{ve} et Q'_{vj} permettant, respectivement, l'intervention sur le débit volumique à l'entrée du réacteur Q_{ve} et sur le débit volumique de fluide caloporteur Q_{vj} . Ces informations (Q'_{ve} et Q'_{vj}), au cours du temps, définissent des conditions externes.

Ainsi, par exemple, à partir de l'équation (6.32), et à partir des relations entre les influences et les contributions, on peut considérer qu'une valeur insuffisante de la variable réglée Q'_{vs} du régulateur du volume du mélange réactionnel peut avoir un rapport avec une valeur insuffisante de la "masse sortante" (représentée par la variable indépendante Q_{vs}). Par ailleurs, dans ces circonstances le volume V augmente (l'équation (6.32) n'est plus valable). Les effets d'une telle altération peuvent être pris en compte à partir du rapport entre les termes des équations (6.15) et (6.18), c'est à dire, dans les circonstances où le fonctionnement du réacteur n'est pas soumis à la régulation du volume du mélange réactionnel. Une relation entre l'altération d'une condition externe et l'altération d'une condition propre est alors établie (Figure 6.4).

Toutefois, du fait que la température du mélange réactionnel est régulée, les relations entre les termes de l'équation (6.33) en tant que "causes", et les termes de l'équation (6.34) en tant que "conséquences", ne sont pas valables. De la même façon, par exemple, un rapport entre une valeur excessive ou insuffisante de la "masse entrante" (équation (6.15)) et l'accroissement ou décroissance de la "masse totale", ne doit pas être pris en compte.

Dans la Figure 6.4, des relations entre les effets d'une valeur insuffisante de la variable réglée Q'_{vj} sont aussi présentées. Lors de cette situation, les effets d'une telle altération peuvent être pris en compte à partir du rapport entre les termes des équations (6.13), (6.28) et (6.18).

Des relations entre des altérations de conditions externes et des altérations de conditions internes, associées à des défauts des systèmes de commande, peuvent être établies à partir des équations (6.30) et (6.31).

6.3 Les relations entre les faits

Les relations entre des faits observables et certaines altérations de conditions nécessaires peuvent être établies à partir des mesures de V , T et C_A , et en considérant que:

- la "masse totale" est caractérisée par le volume V du mélange réactionnel;
- la "masse du réactif" est caractérisée par la concentration molaire C_A de réactif dans le mélange réactionnel;
- l'"enthalpie totale" du mélange réactionnel est caractérisée par la température T .

Ainsi, par exemple, on peut établir un rapport entre une valeur excessive de T (c'est à dire, $T > T_{\text{souhaitée}}$) et l'accroissement inadéquat de l'"enthalpie totale" du mélange réactionnel.

Par ailleurs, un rapport entre x_A et la "masse du réactif consommé par la réaction" peut être établie en considérant que les concentrations molaires de réactif et de produit

dans le mélange réactionnel dépendent directement de la vitesse de la réaction r_A . D'une façon similaire, il est possible d'établir des relations entre x_A et:

- (1) le taux de variation de la concentration de réactif à l'entrée du réacteur; lorsque, en considérant que $T \simeq T_{\text{souhaitée}}$, la masse du réactif consommé par la réaction ne change pas lors d'un changement de C_{A_e} ;
- (2) la valeur du débit volumique à l'entrée du réacteur Q_{ve} ; lorsque, en considérant que $Q_{ve} = Q_{vs}$ lors de la régulation du volume du mélange réactionnel, à une augmentation de Q_{ve} , est associée une diminution du temps de passage du réactif à l'intérieur du réacteur.

Les Figures 6.5 et 6.6 illustrent les relations entre des faits observables et des altérations de conditions nécessaires présentées dans la Figure 6.4.

La sélection des hypothèses à partir des faits observés

La régulation du volume et de la température du mélange réactionnel (équations (6.32) et (6.34)) nous permet de prendre en compte l'indépendance entre les effets provoqués par les altérations des *conditions internes*. Ainsi, une traduction des objectifs par les contextes physiques, les phénomènes et les effets peut être mise en oeuvre. En fait, l'impact de l'altération d'une condition interne sur les conditions propres ou externes peut être représenté sans qu'on prenne en compte les effets réciproques entre les altérations de ces dernières. De la même manière, on peut représenter les relations entre les effets des altérations de conditions internes sans considérer celles-ci. La dépendance entre les faits observables est fonction des connexions logiques établies à partir de contextes physiques indépendants.

Etant donné un ensemble de faits observés, à partir de l'application du mécanisme d'inférence, on peut, dans un premier temps, identifier des hypothèses du dysfonctionnement correspondant à des circonstances de dysfonctionnement indépendantes. Ces hypothèses caractérisent la dépendance entre tous les éléments de l'ensemble des faits observés ou, éventuellement, la dépendance de certains des faits observés. Cela nous permettra, dans une deuxième étape de la recherche des causes, d'identifier une ou plus d'une hypothèse du défaut.

Exemple

Scénario 1

A partir de la connaissance représentée dans les Figures 6.5 et 6.6, considérons que les faits observables, correspondant aux noeuds 1 et 4, sont inclus dans la base de faits. Dans une première étape du diagnostic, les noeuds 3, 8 et 19 sont identifiés en tant qu'hypothèse du dysfonctionnement.

Dans une deuxième étape du diagnostic, lors de la recherche des causes du noeud 3, le noeud 12 et ses successeurs sont écartés, lorsque le fait observable correspondant au noeud 13 n'est pas inclus dans la base de faits. Alors, à partir des connaissances représentées, les conclusions sont rapportées à des explications théoriques concernant les altérations de conditions représentés dans les noeuds 3, 8 et 19. Un diagnostic final ne peut pas, donc, être établi.

VC1: mélange réactionnel

S₅: système pour l'évaluation de l'information sur le procédé

S₃: système pour la commande de la température du mélange réactionnel

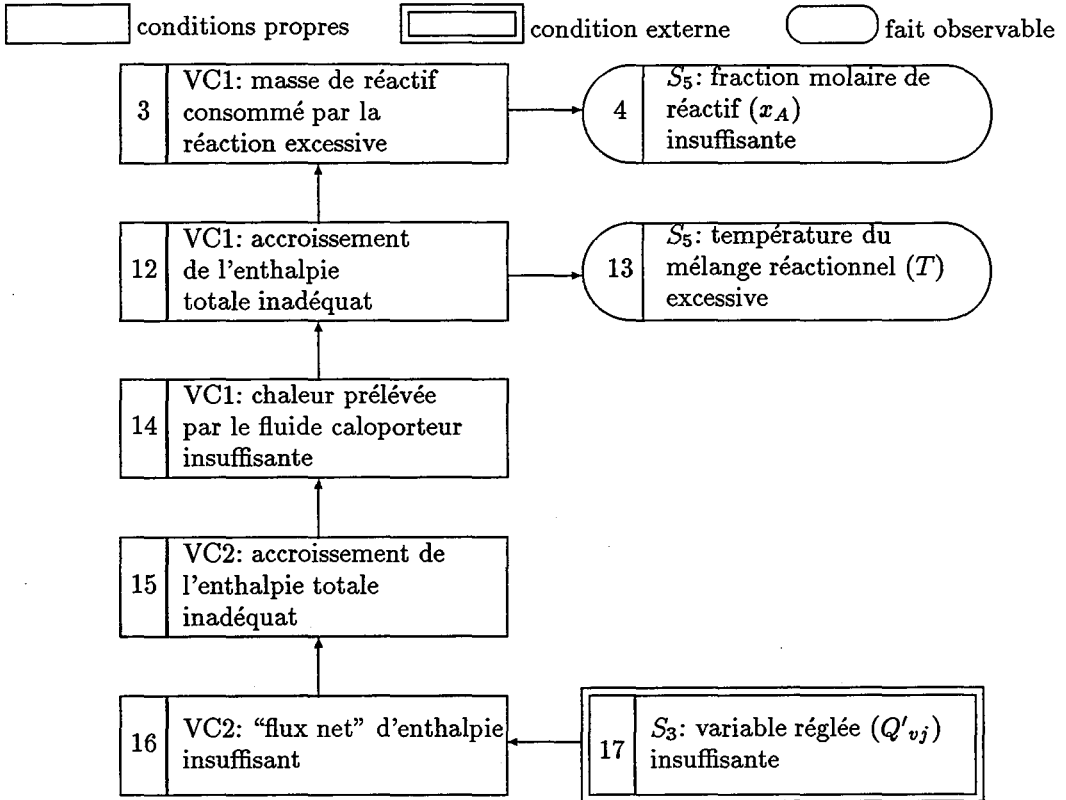


FIG. 6.5 - Relations entre faits observables et altérations de conditions nécessaires lors du dysfonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité.

Scénario 2

Considérons, maintenant, que le fait observable correspondant au noeud 20 est inclus dans la base de faits. Une seule hypothèse du dysfonctionnement (le noeud 6) est identifiée.

Lors de la recherche des causes du noeud 6, deux situations sont alors possibles:

1. Le noeud 11 est identifié comme hypothèse du défaut, et le diagnostic est terminé.
2. Plus de connaissance doit être ajoutée au modèle, de façon à ce que les hypothèses déjà identifiées puissent être expliquées.

VC1: mélange réactionnel

VC2: fluide caloporteur contenu dans la double enveloppe

S_4 : système pour la commande du volume du mélange réactionnel

S_5 : système pour l'évaluation de l'information sur le procédé

□ conditions propres

▭ conditions internes ou externes

○ fait obs.

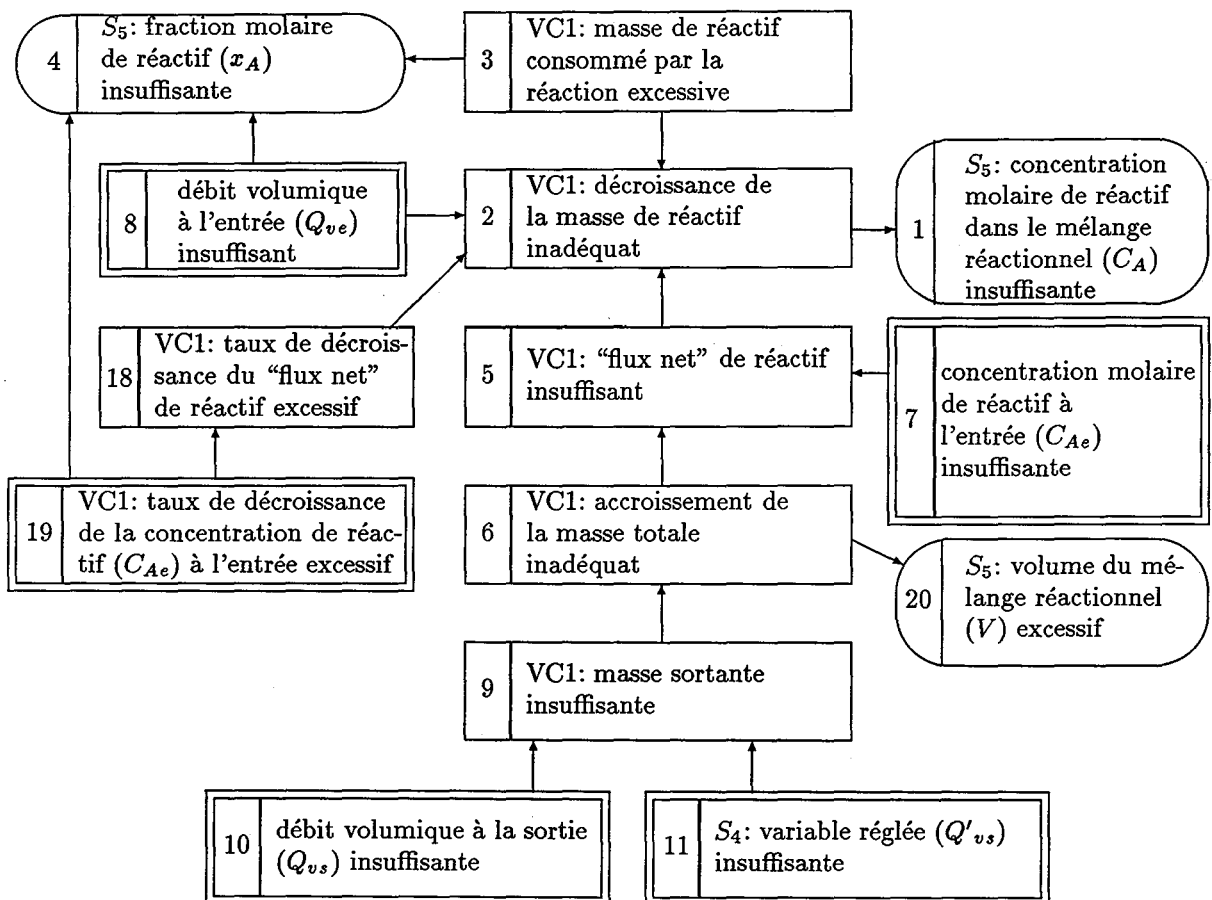


FIG. 6.6 - Relations entre faits observables et altérations de conditions nécessaires lors du dysfonctionnement d'un réacteur idéal continu parfaitement agité.

Chapitre 7

Conclusions générales

Les concepts proposés sont fondés sur une réflexion sur le processus d'acquisition de la connaissance qui permet au spécialiste d'avancer dans l'analyse des activités en production. Plus précisément, en attribuant cette tâche au spécialiste, nous l'avons confondue avec le processus de construction des modèles permettant le diagnostic. Edwards (1991) signale que:

“Si le pouvoir des experts n'est pas de connaître les lois qui régissent le monde mieux que le reste de l'humanité, mais simplement de savoir mieux s'en servir, alors ils servent bien à avoir des connaissances enregistrées. Leur expertise tient donc au fait de mieux maîtriser leur “monde” (ensemble de règles opérationnelles, mais forcément porteuses de “vraies” explications) que les autres, et c'est grâce à cette connaissance qu'ils sont performants.”

Modéliser les aptitudes des experts nous confronte à des difficultés considérables: s'il est relativement aisé de reconstituer un raisonnement par des règles condition-action, il est difficile de faire formuler ces règles par le spécialiste. A l'inverse, si pour le spécialiste, il est facile de produire des descriptions de problèmes, il est très difficile de les représenter formellement afin de reproduire ses raisonnements.

Notre réflexion privilégie ce dernier point, c'est-à-dire que nous envisageons la définition de moyens permettant au spécialiste (ou, en général, à un individu placé au sein d'une organisation industrielle) de mieux représenter formellement les descriptions de problèmes afin de reproduire ses raisonnements.

Dans un premier temps, nous avons proposé la définition, à partir des modèles mathématiques contenant la description du comportement dynamique ou statique des systèmes, des éléments qu'on a désignés par “influences”, “contributions” et “relations”. Ils constituent un moyen d'établir des relations formelles entre les éléments d'un modèle préliminaire, de telle manière qu'un spécialiste, pour améliorer ses connaissances, puisse s'appuyer sur celles composant un modèle créé par un autre spécialiste.

Les “influences” sont définies à partir des variables indépendantes, des paramètres physiques et de l'information représentés dans le modèle de connaissance quantitatif, dont les valeurs sont fixées. On a défini les “contributions” à partir de grandeurs dépendantes, résultant de l'application du principe de conservation sur la masse, l'énergie et la quantité

de mouvement associées aux systèmes physiques. Ainsi, deux contextes sont modélisés:

- le contexte défini par l'état des composants, dans les circonstances où l'état des composants ne change pas lors d'un changement des résultats de leur interaction;
- le contexte défini par les résultats de l'interaction des composants du dispositif industriel, dans les circonstances où ces résultats changent lors d'un changement de l'état des composants.

A partir de ce modèle préliminaire, on peut prendre en compte:

- les relations entre les éléments représentés, traduisant les décisions de conception,
- les circonstances où les effets résultants de l'interaction des composants tendent à la réalisation des objectifs du dispositif industriel.

Toutefois, cette représentation n'est pas adaptée au diagnostic car elle se limite aux circonstances où le fonctionnement correspond au processus conduisant à la réalisation d'objectifs fixés. Plus précisément, cette représentation prend en compte les circonstances où un ensemble de valeurs fixées est associé à un ensemble de résultats, sans qu'on puisse attribuer aux relations un sens de causalité. Cette limitation est due au fait que l'influence des composants sur l'activité du système est associée à un rapport entre les valeurs *fixées* à un instant t et les valeurs *fixées* correspondant à un état initial $x(0)$.

Dans un deuxième temps, nous proposons la considération des influences entre les grandeurs physiques à partir de l'impact d'un état $x(t)$ sur la *qualité* des résultats souhaités. Ces critères de qualité sont définis en fonction des circonstances dans lesquelles la qualité des effets de l'interaction des composants est satisfaite. Cette analyse dépend de plusieurs aspects liés au fonctionnement, dont ceux qui sont rapportés à la stabilité du système face à certaines perturbations ou ceux liés directement à l'impact de la perturbation sur le comportement d'une variable d'intérêt. Cette nouvelle représentation est formalisée à partir du modèle préliminaire, menant à la définition d'éléments qu'on a désigné par "conditions nécessaires à la réalisation des objectifs du dispositif industriel".

Par ailleurs, la définition de ces nouveaux éléments est prise en compte lors des circonstances où la qualité des résultats souhaités n'est pas obtenue. Ces circonstances sont précisées à partir de la considération des défauts. Ainsi, dès qu'on attribue les défauts aux "influences" (définies lors de la construction du modèle préliminaire), on peut, à partir de la description du comportement du système donnée par le modèle quantitatif, établir des relations entre les altérations des "conditions".

Dans cette perspective, on prend en compte le fonctionnement réel du dispositif industriel, exposé à des perturbations. A partir de cette représentation, on peut établir une hiérarchie entre les activités au sein d'une organisation (des tâches de la production) théoriquement conçue.

Nous avons proposé dans le Chapitre 5 une formulation pour la représentation de la connaissance et pour le diagnostic, où la construction de la base de connaissances comprend des étapes résultant du processus d'acquisition de la connaissance qualitative. Ces étapes sont mises en oeuvre en fonction de la représentation d'éléments à partir de

quatre classes: Système, Condition, Altération de condition et Relation. La formulation a été développée de telle manière qu'un utilisateur, basé sur la structure de la formulation et sur les concepts attribués à chaque classe, puisse ajouter des connaissances nouvelles.

On a conclu que la représentation de la structure mettant en rapport les "conditions" est fondamentalement conditionnée par la considération des possibilités de régulation du procédé. La connaissance est donc formulée à partir d'une dualité entre la réalisation de comportements (espérés en fonction de certaines intentions) et des facteurs contribuant à leur échec. Les relations de dépendance entre les altérations des "conditions" sont définies en supposant la régulation de certaines grandeurs physiques associées au procédé. Effectivement, la notion classique des organisations suppose l'accomplissement des tâches (et leur totale réussite) dans un certain ordre préalablement mis au point.

Références

- Asbjornsen, O. A. (1986). A systems engineering approach to process modeling. In D. M. Prett et M. Morari (Eds.), *Shell workshop on process control*, Boston, pp. 139–182. Shell Corporation: Butterworth.
- Asbjornsen, O. A. (1989). Control and operability of process plants. *Computers chem. Engng* 4(5), 351–364.
- Cauvin, S. (1995). *Un environnement générique à base de connaissances pour la supervision de procédés de raffinage et de pétrochimie*. Ph. D. thesis, Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Cauvin, S. et L. Bes (1995). Model-based alarm filtering for pilot plants. In *Workshop on fault diagnosis - Newcastle*.
- Cauvin, S. et B. Braunschweig (1993). Model-based diagnosis for continuous process supervision: the alexip experience. *Engng Applic. Artif. Intell.* (4), 333–343.
- Chandrasekaran, B. (1986). Generic tasks in knowledge-based reasoning: high-level building blocks for expert system design. *IEEE Expert* 1, 23–30.
- Chandrasekaran, B. (1994). Functional representation: a brief historical perspective. *Applied Artificial Intelligence* 8, 173–197.
- Charpillat, F. et J. P. Haton (1992). Abduction, raisonnement hypothétique et maintien de cohérence. In *Actes des 4èmes journées nationales en intelligence artificielle*. Teknea.
- Chen, L. W. et M. Modarres (1992). Hierarchical decision process for fault administration. *Computers chem. Engng* 16(5), 425–448.
- de Kleer, J. (1985). How circuits work. In D. G. Bobrow (Ed.), *Qualitative reasoning about physical systems*, Cambridge, Mass. MIT Press.
- de Kleer, J. et J. S. Brown (1984). A qualitative physics based on confluences. *Artificial Intelligence* 24, 7–83.
- Douglas, J. M. (1985). A hierarchical decision procedure for process synthesis. *AIChE Journal* 31(3), 353–362.
- Edwards, W. (1991). Discussion: of human skills. Social Science Research Institute - University of Southern California, 22 p.
- Finch, F. E., O. O. Oyeleye, et M. A. Kramer (1990). A robust event-oriented methodology for diagnosis of dynamic process systems. *Computers chem. Engng* 14(12), 1379–1396.

- Forbus, K. D. (1984). Qualitative process theory. *Artificial Intelligence* 24, 85–108.
- Iri, M. et K. Aoki (1979). An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process. *Computers chem. Engng* 3, 489–493.
- Iwasaki, Y. (1995). Causal functional representation language with behaviour-based semantics. *Applied Artificial Intelligence* 1, 6–31.
- Kokawa, M. et S. Shingai (1982). Failure propagating simulation and nonfailure paths search in network systems. *Automatica* 18(3), 335–341.
- Kramer, M. A. et B. L. Palowitch (1987). A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph. *AIChE Journal* 33(7), 1067–1078.
- Kuipers, B. (1986). Qualitative simulation. *Artificial Intelligence* 29, 289–388.
- Kumar, A. N. (1994). Function-based reasoning: an introduction. *Applied Artificial Intelligence* 8, 167–172.
- Levenspiel, O. (1972). *Chemical reaction engineering*. New York: John Wiley and Sons. 578 p.
- Luyben, W. L. (1990). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers* (2ème édition ed.). New York: Mc. Graw Hill, Inc. 725 p.
- Mohindra, S. et P. A. Clark (1993). A distributed fault diagnosis method based on digraph models: steady-state analysis. *Computers chem. Engng* 17(2), 193–209.
- Noorsaman, A. et S. Papastratos (1992). Knowledge-based student training tool to fault diagnosis in a distillation column. In *ESCAPE-2*, pp. 389–394.
- Oyeleye, O. O. et M. A. Kramer (1988). Qualitative simulation of chemical process systems: steady-state analysis. *AIChE Journal* 34(9), 1441–1454.
- Pearl, J. (1984). *Heuristics*. Reading, Mass.: Addison-Wesley Publishing Co.
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inferences*. St. Matheus, California: Morgan and Kauffmann.
- Perry, R. H. (1984). *Perry's chemical engineers' handbook*. Mc. Graw Hill, Inc. 2336 p.
- Ramesh, T. S. et J. F. Davis (1992). Knowledge-based diagnostic systems for continuous process operations based upon the task framework. *Computers chem. Engng* 16(2), 109–127.
- Rasmussen, J. (1985). The role of hierarchical knowledge representation in decision making and system management. *IEEE Expert* 15, 234–243.
- Rich, S. H. et V. Venkatasubramanian (1987). Model-based reasoning in diagnostic expert systems for chemical process plants. *Computers chem Engng* 11(2), 111–122.
- Rich, S. H. et V. Venkatasubramanian (1989). Causality-based failure-driven learning in diagnostic expert systems. *AIChE Journal* 35(6), 943–950.
- Shiozaki, J. et H. Matsuyama (1985). An improved algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process. *Computers chem. Engng* 9(3), 285–293.

- Shum, S. K. et J. F. Davis (1988). An expert system approach to malfunction diagnosis in chemical plants. *Computers chem. Engng* 12(1), 27-36.
- Stephanopoulos, G. (1984). *Chemical process control: an introduction to theory and practice*. New Jersey: Prentice Hall. 696 p.
- Stephanopoulos, G., G. Henning, et H. Leone (1990). Model.la. a modeling language for process engineering - i, ii. *Computers chem. Engng* 14(8), 813-869.
- Stephanopoulos, G. et J. Johnston (1987). Design-kit: An object-oriented environment for process engineering. *Computers chem. Engng* 11(6), 655-674.
- Sticklen, J. et J. McDowell (1995). Future directions in function-based reasoning. *Applied Artificial Intelligence* 1, 1-3.
- Villiermaux, J. (1993). *Génie de la réaction chimique: conception et fonctionnement des réacteurs* (2ème édition ed.). Paris: Lavoisier. 448 p.
- Wilcox, N. A. et D. M. Himmelblau (1994). The possible cause and effect graphs (pceg) model for fault diagnosis - i, ii. *Computers chem. Engng* 18(2), 103-127.

Aucun duplicata ne lui sera délivré.

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE

o o o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur ACCARY Armand, Professeur, ENSC Mulhouse,

Monsieur BOURSEAU Patrick, Professeur, Université de Bretagne -Sud Lorient.

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur RIBAS SANTOS Eduardo

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Contribution au diagnostic qualitatif des procédés en intelligence
artificielle."**

en vue de l'obtention du titre de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE**

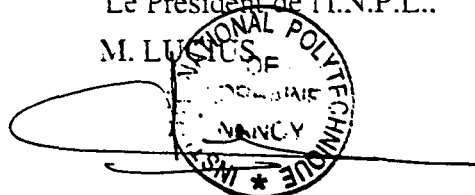
Spécialité : **"GENIE DES PROCEDES"**

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

Fait à Vandoeuvre le. 28 Novembre 1996

Le Président de l'I.N.P.L..

M. LUCIUS



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX



Résumé

L'objectif de la supervision des procédés est de surveiller le fonctionnement d'une unité afin d'assurer la réalisation des objectifs fixés, quels que soient les incidents et perturbations extérieures pouvant intervenir. Il est nécessaire d'avoir une vue générale afin d'être en mesure de réagir et de se focaliser sur les points clés.

Dans cette thèse, nous proposons une modélisation de la connaissance du fonctionnement des procédés adaptée à la représentation généralement choisie par les spécialistes lors d'un problème donné: à l'aide d'un modèle complet du fonctionnement normal de l'unité, ils cherchent à trouver des fautes ou des combinaisons de fautes possibles. Les concepts proposés sont fondés sur une réflexion du processus d'acquisition de la connaissance qui permet au spécialiste de progresser dans l'analyse des activités en production. Ce processus inclut la formulation, à partir des modèles mathématiques contenant la description du comportement dynamique ou statique des systèmes, d'un modèle préliminaire, de telle manière qu'un spécialiste, pour améliorer ses connaissances, puisse s'appuyer sur celles composant un modèle créé par un autre spécialiste.

Dans un premier temps, nous introduisons une méthodologie pour la définition des connaissances permettant au spécialiste (ou, en général, à un individu placé au sein d'une organisation industrielle) de mieux représenter formellement les descriptions de problèmes afin de reproduire ses raisonnements. Dans un deuxième temps, nous proposons une formulation pour la représentation de la connaissance et pour le diagnostic, où la construction de la base de connaissances comprend des étapes résultant du processus d'acquisition de la connaissance qualitative.

Les concepts sont illustrés par des procédés simples choisis dans le domaine du génie des procédés. Ainsi, le diagnostic qualitatif d'un réacteur idéal continu parfaitement agité est examiné en détail dans le cadre général précédemment étudié.

Abstract

Chemical process supervision includes monitoring of the units in order to assure satisfaction of the goals in presence of an ever changing external environment. A global process view is necessary so that key points are focused and corrective measures can be selected.

In this work, we present a modeling of the knowledge of process operation adapted to the representation currently used by experts under process malfunctioning: from the normal unit functioning model, they imagine possible faults or combinations of faults. The proposed concepts are based on the way we think that knowledge is acquired by specialists, permitting them to progress in the definition of production activities. This process includes the definition of a preliminary model, formulated from the mathematical models containing the description of dynamic and static system behaviour. Since these models are based on fundamental knowledge, one specialist can ameliorate his knowledge using models created by other specialists.

In a first stage, we introduce a method giving to plant staff the opportunity to define knowledge in such a manner that experts can reproduce their reasoning. According to this method, descriptions of problems can be better represented and formalized by the experts themselves. In a second stage, we propose a formal system to represent knowledge and to make automatic diagnosis. The knowledge base is constructed by steps resulting from the qualitative knowledge acquisition process.

The application of the concepts is illustrated with the consideration of simple processes from the chemical engineering domain. The qualitative diagnosis of a continuous (ideal) stirred tank reactor is examined in detail in the previously described framework.