

Méthodologies pour des systèmes experts de seconde génération

Jean-Luc DORMOY
Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France
IMATIEM
1, avenue du Général de Gaulle
92141 Clamart Cedex

Résumé

Les systèmes experts dits de première génération tentaient de capturer le savoir-faire d'un expert. Cette première vague, si elle a permis des réalisations remarquables, n'a pas donné les résultats escomptés.

Une seconde génération commence à sortir des laboratoires. Au lieu de rester au niveau de la connaissance superficielle, c'est-à-dire des modes de raisonnement non motivés qu'exprime l'expert lorsqu'il est sommé de s'expliquer, elle tente de reconstruire cette connaissance à partir des principes qui ont permis à l'individu de se forger sa qualité d'expert. On parle alors de systèmes basés sur la connaissance profonde, ou de système de seconde génération.

Plusieurs niveaux de connaissance peuvent être en jeu. Des activités comme la conduite de processus ou le diagnostic peuvent être bâties sur une description fonctionnelle de l'appareil ou de l'installation étudiés. Au delà, pour tout ce qui concerne les activités de: simulation, conduite, prévision du comportement, diagnostic, conduite en situation d'incident ou d'accident, vérification ou découverte de la fonction, conception,..., il pourra être nécessaire d'avoir une connaissance des processus physiques intimes qui permettent de comprendre la fonction (ou la perversion de celle-ci) réalisée par l'appareil. Cela a conduit au développement de domaines de recherche comme la physique qualitative.

L'exposé est organisé dans ses trois premières parties autour de deux exemples: un système "de première génération et demie" pour la conduite des centrales électriques, puis le système EXTRA de traitement des alarmes dans les centrales nucléaires, où la connaissance fonctionnelle de l'installation est représentée. On montre comment mettre en œuvre la "connaissance profonde", et les avantages que l'on en peut en attendre.

La physique qualitative fait l'objet de la partie suivante. Les directions de développement ainsi que les retombées à attendre de ce domaine de recherche sont évoquées.

1 Introduction

Le diagnostic, la conduite, le traitement des situations critiques, ... ont été et sont encore des domaines d'application privilégiés des systèmes experts, que ce soit dans le domaine industriel ou en médecine. Après la première vague des systèmes experts, accompagnée de l'apparition du cognitif - l'intermédiaire humain chargé de mettre dans la machine les talents et le savoir-faire de l'expert - une réflexion a eu lieu sur le type de connaissance qu'utilisaient ces systèmes et les capacités qui en résultaient. Cela a conduit à s'intéresser non plus aux réflexes ou au savoir-faire de l'expert dans la résolution d'un problème, mais aux connaissances de base qui lui ont permis par l'expérience de se forger sa qualité d'expert. La méthodologie alternative à celle de la première génération de systèmes experts consiste donc en une collecte de la connaissance de base de l'expert, sa représentation en machine, puis la reconstruction du système "réflexe" de diagnostic, de conduite, etc.

Cette communication illustre par des exemples cette démarche.

On décrit tout d'abord un système expert "classique" destiné à la conduite des centrales électriques [Héry, 1985][Héry & Laleuf, 1985][Ancelin, Héry, Laleuf & Legaud, 1985]. Il s'agit en fait d'un système intermédiaire entre les systèmes de première et de seconde génération. Les concepteurs de ce système sont revenus dans la phase de modélisation du problème à la "connaissance profonde", mais celle-ci n'a pas été représentée dans la machine.

Le système EXTRA de traitement des alarmes dans les centrales nucléaires [Ancelin, Gaussot & Legaud, 1986] est ensuite décrit. EXTRA utilise une représentation explicite de la topologie de l'installation étudiée, et des principes de diagnostic généraux, qui font appel à une connaissance fonctionnelle des composants de l'installation, pour construire une base de connaissances qui effectuera le traitement des alarmes proprement dit pour une installation spécifique. La méthodologie qui sous-tend EXTRA a deux caractéristiques essentielles qui le différencient des systèmes classiques:

- la connaissance sur l'installation est accessible au système sous forme déclarative, au lieu d'être noyée dans les règles, et elle est séparée de types de connaissances d'un autre ordre, comme les stratégies de diagnostic;
- un système de génération automatique de programme combine ces différents types de connaissance pour produire le logiciel de traitement final; cette étape peut être vue comme une phase de compilation de la connaissance.

On montre comment exploiter ces idées au maximum. La connaissance fonctionnelle et les stratégies de diagnostic peuvent être elles-mêmes séparées, et mises sous forme déclarative. Cette "mise à plat" des connaissances en permet une réutilisation dans la construction d'autres systèmes (par exemple un système de consignation de matériels) ou dans leur propre validation (par exemple une étude de la cohérence du système d'alarmes). En définitive, on en arrive à une représentation de la connaissance s'assimilant à ce qui est appelé dans la littérature de l'Intelligence Artificielle un "tableau noir", où plusieurs systèmes généraux, avec des buts différents, viennent piocher et échanger des connaissances.

La "connaissance profonde" dont il est question ici peut être de divers ordres: cela peut être comme dans EXTRA une connaissance de la fonction; mais l'on peut aller plus loin en prenant en compte les processus physiques intimes qui gouvernent le comportement de l'installation. La fonction des composants peut alors être redécouverte. Cependant, cette approche a des avantages supplémentaires. Par exemple, le comportement d'un composant peut très bien ne pas correspondre à sa fonction normale si ce composant ou un de ses voisins change de type de comportement, par exemple en cas de panne ou de dysfonctionnement. L'exploration de ces idées a conduit à la création d'un domaine de recherche actuellement très florissant: la physique qualitative. On

présentera la physique qualitative dans la dernière partie, et on donnera un exemple montrant les potentialités de cette approche.

2 Un système expert "classique": étude de cas

Nous décrivons ici un système expérimental pour la conduite des centrales nucléaires, réalisé à la Direction des Etudes et Recherches d'EDF entre 1984 et 1986 par MM Héry et Laleuf. On décrit tout d'abord le problème, puis le type de solution apporté, dans les termes des concepteurs. Puis nous proposons quelques réflexions quant à leur démarche.

2.1 Description du problème

Les centrales nucléaires sont pilotées depuis les salles de commande selon des normes précises. La réglementation fixe le cadre et le détail des multiples manœuvres que requiert le pilotage. Ces normes sont consignées dans des documents: les procédures de conduite. En simplifiant quelque peu, on peut représenter une procédure comme un guide qui permet de mener la tranche nucléaire d'un état initial à un état final. Ayant reconnu l'état initial, les opérateurs de conduite se doivent d'appliquer pas à pas les instructions de la procédure adéquate jusqu'à la situation finale souhaitée. Les étapes de la procédure respectent de multiples contraintes, résultant de considérations parfois complexes.

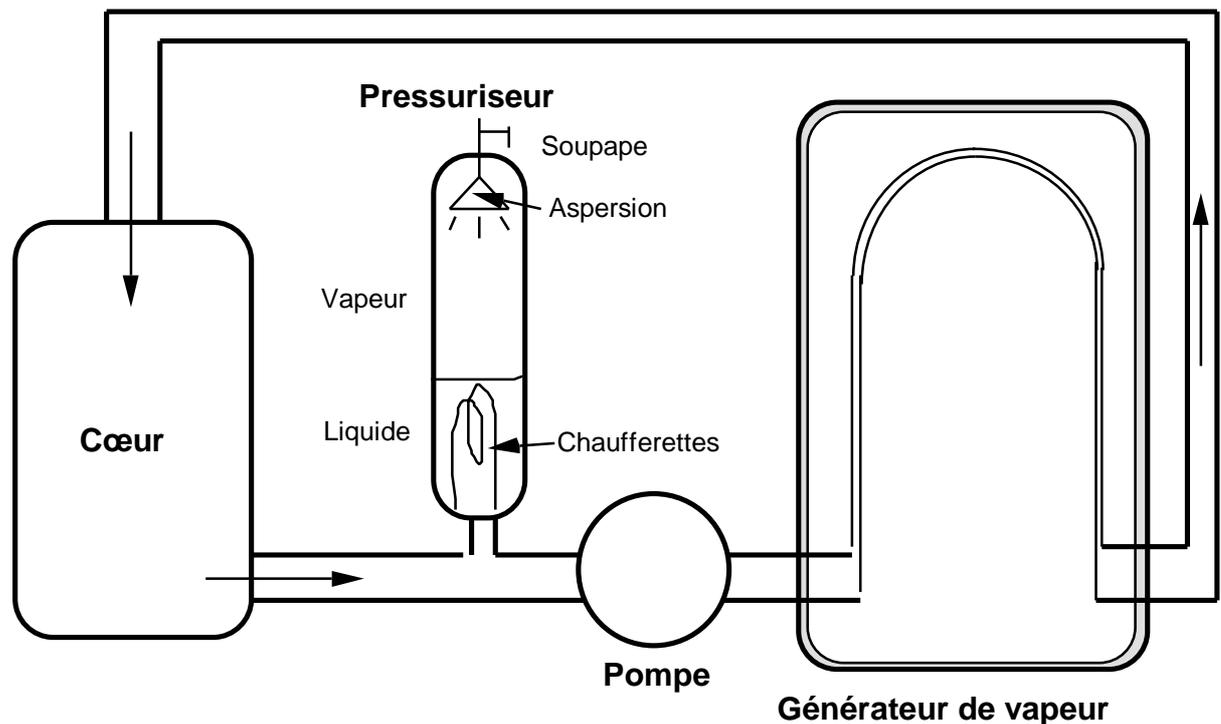


Figure 1: Le circuit primaire d'une centrale nucléaire.

Or, le problème de la conduite ne se trouve pas dans les procédures, mais en amont des procédures. De plus, les experts en fonctionnement qui les ont établies ont du, dans le souci de préserver une certaine généralité et de limiter le nombre des documents réglementaires, regrouper les solutions entre elles pour rendre compte de la multiplicité des cas initiaux envisageables: les procédures répondent donc souvent, non à une situation initiale précise, mais à toute une famille de situations, appelée "cas enveloppe".

Le deuxième inconvénient de l'approche procédurale de la conduite réside dans la rigidité et le cloisonnement des procédures. En effet, celles-ci sont une représentation *ordonnée* de la connaissance; elles exigent qu'on ait reconnu avec certitude la situation initiale qui les appelle. Elles ne tolèrent ensuite que peu de déviations, et n'offrent que peu de recours en cas d'erreur de diagnostic. Il est donc clair qu'un opérateur de conduite efficace utilise plus de connaissances que celles qui sont inscrites dans les procédures.

Ainsi, un système expert en conduite ne saurait être une simple automatisation des procédures, mais plutôt un système capable de générer au coup par coup des procédures "sur mesure".

2.2 Description du système expert

Le problème de la conduite est le suivant: faire passer la tranche d'un état initial à l'état final au moyen de diverses commandes et en minimisant certains critères (temps, risque).

On peut théoriquement représenter le vecteur d'état de la tranche (pressions, températures, etc) par une fonction de son vecteur de commandes:

$$(e_1, \dots, e_n) = F(c_1, \dots, c_p)$$

De même, on peut théoriquement chercher à chiffrer des coûts associés tant à un vecteur d'état qu'à un vecteur de commandes. En fait la seule idée qu'on ait réellement de F, ce sont certaines composantes de certaines dérivées partielles:

$$\frac{\partial Z}{\partial e_i}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial c_j}$$

Par ailleurs, la connaissance précise des coûts (notamment en matière de risque) est utopique. Elle se traduit en pratique par des consignes d'exploitation.

La base de connaissances du système expert comprendra deux grandes familles de règles:

- les lois, qui traduisent les dérivées partielles
- les consignes, qui traduisent les contraintes élémentaires.

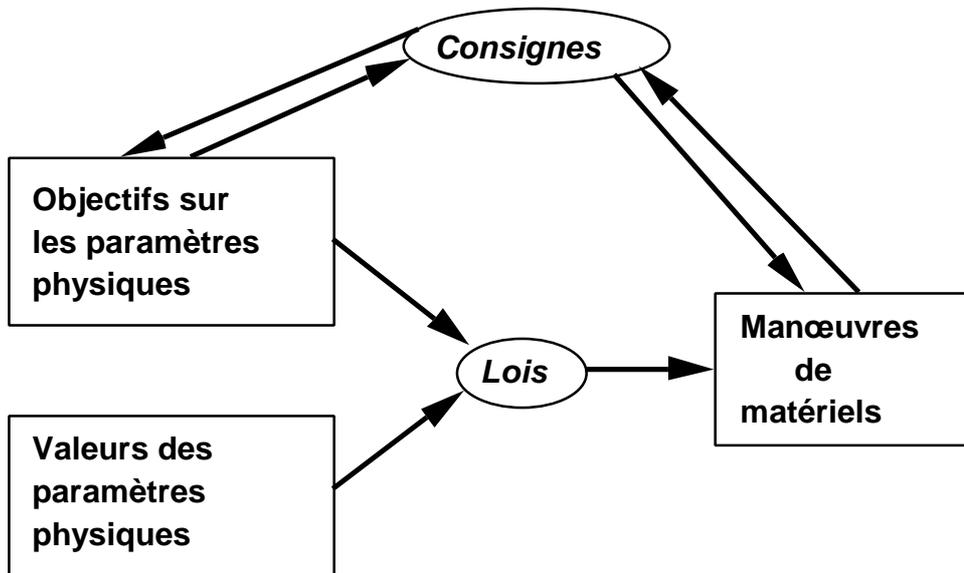


Figure 2: Le schéma du système expert de conduite.

SI La valeur actuelle de la température primaire est inférieure à l'objectif courant

ALORS

Mettre les pompes primaires en service

- SI** Le niveau actuel du pressuriseur est supérieur à l'objectif courant
Le pressuriseur contient les deux phases liquide et vapeur

ALORS

Mettre les chaufferettes en service
Fermer le dispositif d'aspersion

- SI** La pression primaire est supérieure à l'objectif courant
Le pressuriseur contient les deux phases liquide et vapeur

ALORS

Fermer les chaufferettes
Mettre en marche le dispositif d'aspersion

- SI** L'objectif courant sur la pression primaire est supérieur à 29 bars
Le circuit RRA est en service

ALORS

Ramener l'objectif courant sur la pression à 29 bars

Figure 3: Trois lois et une consigne.

La figure 1 donne un schéma très simplifié du circuit primaire d'une centrale nucléaire (il y a aussi un circuit secondaire ...). La figure 2 schématise les types d'objets manipulés et leurs interactions via les règles. La figure 3 donne trois exemples de lois et un exemple de consigne. En pratique, ces règles sont mises en œuvre dans un langage de règles d'ordre 0⁺.

2.3 Problématique

D'emblée, les concepteurs de ce système ont voulu rejeter l'approche "superficielle" qu'une première expertise du domaine leur suggérait pourtant avec insistance. La conduite est régie par des *procédures*, et cette approche *procédurale* a les mêmes inconvénients pour la conduite des centrales que son équivalent informatique pour la conduite du traitement de l'information. Il faut retourner à la connaissance de base: quelles sont les considérations physiques, économiques et de sécurité qui ont motivé la définition de ces procédures? Une fois ces connaissances (re-)trouvées et modélisées, on peut construire un système qui dépasse la méthode des procédures, en ce qu'il retrouve une procédure pour chaque cas traité. En ce sens, ce système dépassait déjà dans son contenu les systèmes de première génération.

Mais il ne les dépassait pas encore dans sa forme. Les connaissances physiques, de sécurité, etc, sont fournies sous une forme *orientée* pour la conduite. Par exemple, la première des trois lois de la figure 3 provient de la véritable loi physique: *le fonctionnement des pompes primaires tend à augmenter la température primaire*. Ou encore, la consigne de cette même figure est en fait: *la pression primaire ne doit pas dépasser 29 bars si le RRA est en service*. Le système ne connaît pas ces lois, il n'en a qu'une forme exécutable (des règles) adaptée au problème à résoudre.

Par ailleurs, tout n'était pas dans ce système aussi "pur" que l'exposé qui précède tend à le démontrer. Certaines "lois" ne sont en fait valables que dans un domaine de fonctionnement précis. Cela signifie que l'on revient indirectement dans le cadre des procédures; les connaissances physiques parcellaires sur lesquelles s'appuie le système leur sont en définitive équivalentes. Ce fait est à l'origine des *incohérences* constatées par les auteurs dans les premières moutures du système, ce qui a motivé la conception d'un *vérificateur de cohérence* pour le langage à base de règles 0⁺

GENESIA I [Héry, 1985] qui servait de support. La suppression des incohérences dans les règles a conduit petit à petit les auteurs vers une "procéduralisation" de la base de règles par l'utilisation de conditions de contrôle artificielles. En définitive, l'histoire de la conception de ce système montre qu'une *approche déclarative nécessite de représenter les "connaissances profondes" de l'expert dans la machine*. Le système EXTRA, dont la description suit, est une application de ce principe: les bases de règles qu'il génère n'ont pas ces problèmes d'incohérence.

Mentionnons pour finir que ce système de conduite a été couplé à un simulateur de centrale [Ancelin, Héry, Laleuf & Legaud, 1985]. Il a donc conduit une "centrale simulée" en temps réel (et même accéléré) pendant plusieurs heures.

3 Diagnostic basé sur la fonction: le système EXTRA

3.1 Description du problème

Un des aspects les plus délicats de la conduite d'une tranche nucléaire est de se trouver dans une situation accidentelle avec une multitude d'alarmes présentes. Ainsi, sur une tranche nucléaire à eau pressurisée, près de 1000 variables sont surveillées, ce qui peut conduire à l'apparition de centaines d'alarmes lors du "déclenchement" de l'installation. Or, si une alarme isolée est efficace pour attirer l'attention de l'opérateur sur un problème local, il est souvent difficile à l'opérateur de faire le diagnostic d'une situation si un grand nombre d'alarmes sont présentes.

Le système expert EXTRA a deux objectifs:

- diagnostic: identifier l'état de l'installation d'un point de vue matériel;
- conséquence du diagnostic et aide à l'opérateur: indiquer éventuellement le choix d'une consigne de conduite ou de fiches d'alarmes.

Le premier objectif est le plus délicat. Le problème réside dans le conflit entre la grande quantité d'informations disponibles et la contrainte du temps réel. Ainsi, dans une de ses premières versions, EXTRA traitait l'ensemble des alimentations électriques et certains circuits auxiliaires d'une tranche nucléaire, soit 200 alarmes, 80 composants mécaniques (vannes, pompes, échangeurs), 410 matériels électriques (tableaux, diesels, disjoncteurs, etc), 75 informations analogiques (mesures de capteurs), 800 informations tout ou rien (alarmes, entrées calculateur), 1000 défauts potentiels. Un diagnostic était fourni toutes les 10 secondes.

3.2 Description du système expert

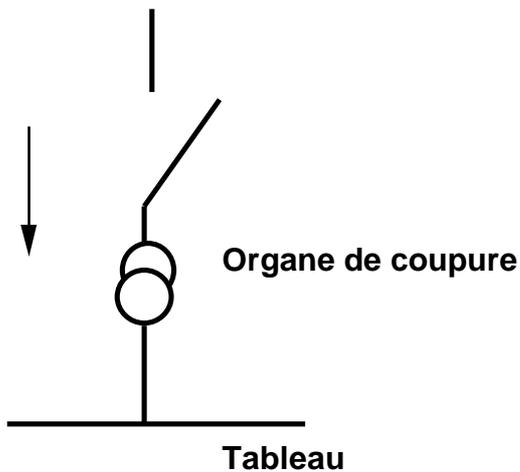
Le système expert est basé sur deux types de connaissances:

- la connaissance de la topologie de l'installation à surveiller (c'est-à-dire son schéma, avec une description de ses composants),
- des stratégies de diagnostic basées sur la connaissance de la fonction des composants.

3.2.1 Stratégies de diagnostic

Le diagnostic s'effectue en trois étapes:

- 1) Un état de l'installation est reconstitué à partir des informations disponibles (alarmes, capteurs).
- 2) Les défauts potentiels signalés par les alarmes présentes sont répertoriés.
- 3) A partir des résultats des deux premières étapes, on élimine les défauts potentiels (engendrés dans la seconde phase) qui:
 - a) sont incompatibles avec l'état de l'installation (reconstitué dans la première étape),
 - b) sont des conséquences normales d'autres défauts déjà identifiés (figures 4 et 5),



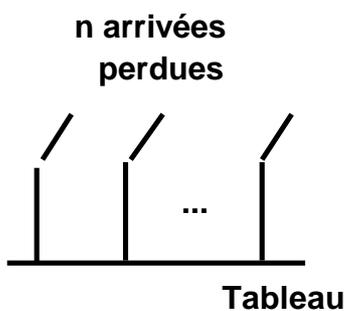
SI

T est un tableau électrique
 C est un organe de coupure
 C alimente T
 T n'est pas en court-circuit

ALORS

La fermeture de C ne doit pas être prise en compte

Figure 4: Elimination de défaut potentiel sans conséquence.



SI

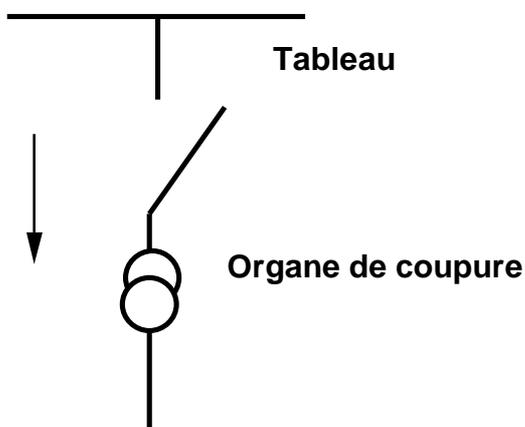
T est un tableau électrique
 T a n arrivées
 ces n arrivées sont perdues

ALORS

La perte de tension sur T est une conséquence normale de la situation et ne doit pas être prise en compte

Figure 5: Elimination de défaut potentiel conséquence d'un défaut identifié.

c) sont masqués, vus les moyens d'information dont on dispose, par un autre défaut identifié (figure 6).



SI

T est un tableau électrique
 C est un organe de coupure
 C est sur un départ de T
 T est hors tension

ALORS

L'ouverture de C ne doit pas être prise en compte

Figure 6: Elimination de défaut masqué.

3.2.2 Compilation-génération du système de diagnostic

Afin de ne pas mélanger ces types de connaissances, la topologie est représentée sous forme de faits d'un système de production d'ordre 1 (Alouette, puis GENESIA II), et les connaissances de diagnostic sous forme d'une base de règles d'ordre 1, qui ne fait aucune mention à une installation particulière.

Cependant, pour des raisons d'efficacité liées au temps réel, ce n'est pas la base de règles 1 qui tournera en ligne pour faire le diagnostic. Celle-ci servira en fait à générer, en prenant en compte la topologie particulière de l'installation, une base de règles d'ordre 0⁺ (GENESIA I), (figure 7).

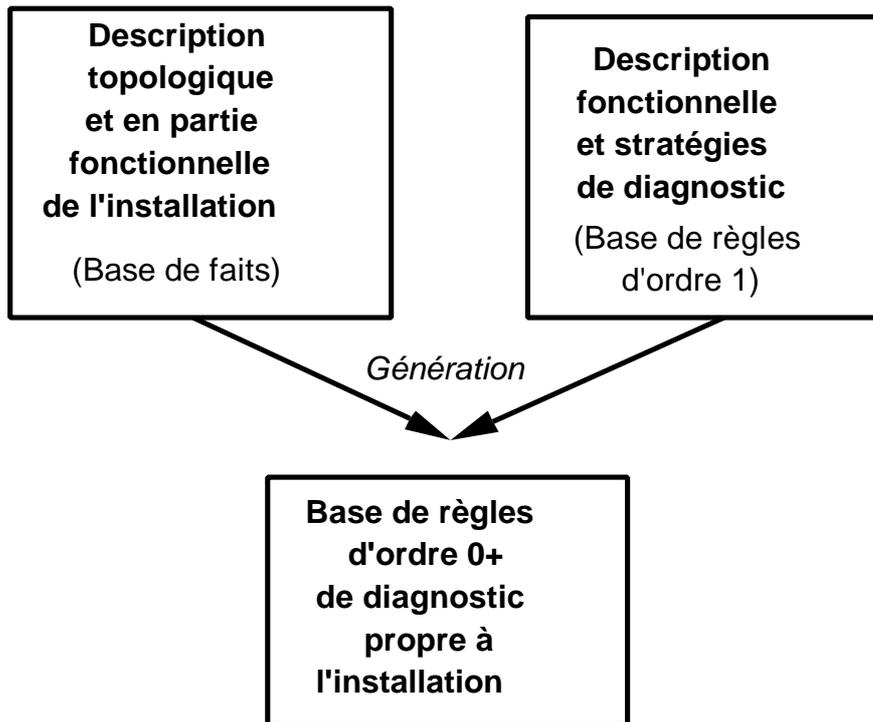


Figure 7: génération d'un système de diagnostic EXTRA.

Prenons un exemple. Considérons le principe de diagnostic de la figure 8 (qui découle de ce comment fonctionne un tableau électrique).

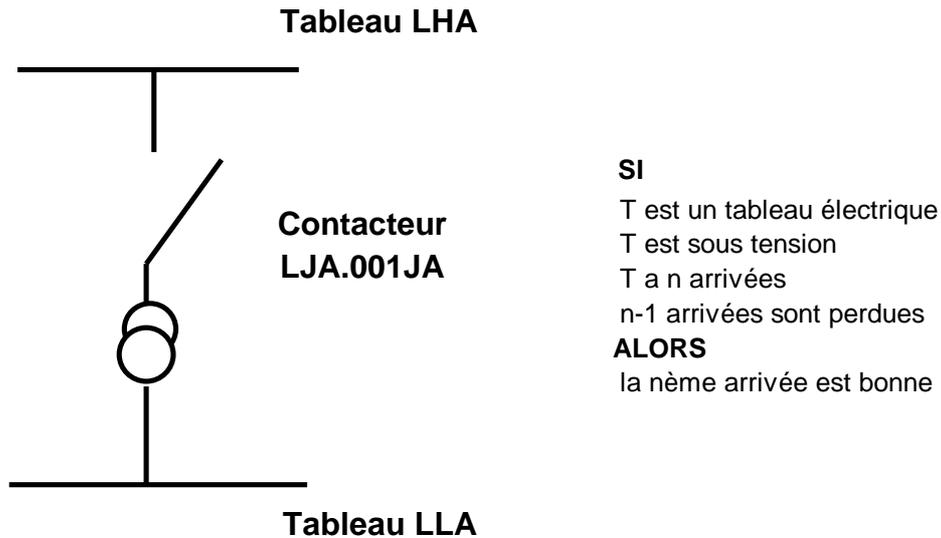


Figure 8: Un principe de diagnostic.

L'application de ce principe au schéma de la figure 8 conduit à la règle d'ordre 0⁺ suivante:

SI
Le tableau LLA est sous tension
ALORS
Le contacteur LLA001JA est fermé
Le tableau LHA est sous tension

Signalons enfin que la base de règles d'ordre 0⁺ ainsi obtenue peut être compilée en un programme FORTRAN, Pascal, C, etc [Dang Tran & Lagrange, 1988], [Ghallab, 1988] afin d'améliorer encore les performances.

3.3 Evolutions d'EXTRA

Les concepteurs du système de conduite décrit au paragraphe 2 avaient *utilisé* la "connaissance profonde" sur l'installation, mais ne l'avaient pas *représentée* en machine. Dans EXTRA, on tente de séparer les connaissances de divers ordres, et de les fournir sous une forme la plus déclarative possible à la machine. En particulier, le système est utilisable sur différentes installations - possédant des topologies différentes - pourvu qu'elles soient constituées de composants de types connus. On peut cependant aller plus loin dans cet ordre d'idée.

3.3.1 Représentation de la fonction et des stratégies de diagnostic

Les connaissances fonctionnelles et de stratégie de diagnostic sont mélangées dans la version d'EXTRA décrite précédemment. Par exemple, le principe de diagnostic de la figure 8 provient de l'équation booléenne suivante, qui traduit le fonctionnement d'un tableau:

$$\text{Tension}(\text{Sortie}(\text{Tableau})) = \sum_{a \in \text{Arrivées}(\text{Tableau})} \text{Tension}(a) \quad (1)$$

Cette équation n'est pas orientée. En particulier, elle contient plus d'information que le principe de la figure 8. Celui-ci se limite à une propagation des valeurs des variables

dans un seul sens: si le terme de gauche vaut 1, et tous les termes de droite sauf un valent 0, alors le terme de droite restant vaut 1.

Sans rentrer plus avant dans les détails, cela donne un aperçu de ce comment les connaissances fonctionnelles et la manière de les exploiter en vue d'un diagnostic peuvent être séparées.

3.3.2 Un "tableau noir" des connaissances sur l'installation

En définitive, les connaissances sur l'installation sont toutes représentées de manière déclarative. Les stratégies de diagnostic sont une *source de connaissance* qui fournit une méthode pour résoudre le problème du traitement des alarmes. (Nous employons ces termes de *tableau noir* et de *source de connaissance* par référence à ces notions dans le langage de l'Intelligence Artificielle) [Hayes-Roth, 1985] [Laasri, Maître, Mondot, Charpillet & Haton, 1988].

Un aspect important de cette méthodologie de représentation des connaissances est la *réutilisation potentielle* des connaissances. Par exemple, les mêmes connaissances topologiques et fonctionnelles peuvent être réutilisées pour:

- la mise en œuvre d'un système d'aide à la consignation des matériels. La consignation d'un matériel consiste à isoler des sources de fluide (courant électrique, liquide ou vapeur à haute pression ou température, ...) afin de permettre au personnel d'entretien ou de maintenance d'y accéder.

- la vérification de la "cohérence" du système d'alarmes et de capteurs, c'est-à-dire la bonne conception d'un aspect clé de l'installation.

Il s'agit à chaque fois d'écrire une base de connaissances générale qui effectue - ou génère un système qui effectue - la tâche à accomplir. En définitive, c'est une véritable *base de connaissances générale* sur le type d'installation étudiée que l'on constitue par cette méthodologie.

4 Physique qualitative

La première grande idée de la physique qualitative est la *physique*: on représente les *lois physiques* qui gouvernent un appareil ou une installation, ou leurs composants. Cette description dépasse le niveau de la fonction; elle peut permettre par exemple de comprendre un phénomène non répertorié, particulièrement en cas de défaut. Son autre facette est la représentation *qualitative*: on ne tente pas de manipuler des systèmes d'équations numériques, mais de disposer de modèles simplifiés, permettant d'expliquer et de comprendre "ce qui se passe". Nous montrons dans cette section quelques exemples s'appuyant sur ces idées: équations qualitatives, algèbre des signes.

En tant que domaine de recherche de l'Intelligence Artificielle, la physique qualitative va encore plus loin. Au lieu d'utiliser des modèles spécialement conçus à son intention, son but peut être de les *construire*. En définitive, le but ultime de la physique qualitative est de *faire raisonner la machine sur le monde physique*. Il est hors du cadre de cette communication d'évoquer cet aspect.

4.1 Les modèles de la physique qualitative basés sur les signes

Un des aspects de la physique qualitative est la notion d'*équation qualitative* (ou *confluence*). Considérons par exemple un simple tuyau muni d'une vanne où circule un fluide (figure 9). Si nous appelons ΔP la différence de pression entre les deux bords, Q le flux du fluide, ρ sa densité et S la section sous la vanne, la loi d'équilibre d'écoulement du fluide est:

$$Q = C S (2 \Delta P / \rho)^{1/2} \quad (2)$$

où C est une constante. Cette loi justifie les inférences suivantes (sous les hypothèses d'un fluide incompressible, soit $\rho = \text{Constante}$):

Si P augmente et S reste stable, alors Q augmente. (R1)

Si P diminue et Q augmente, alors S augmente. (R2)

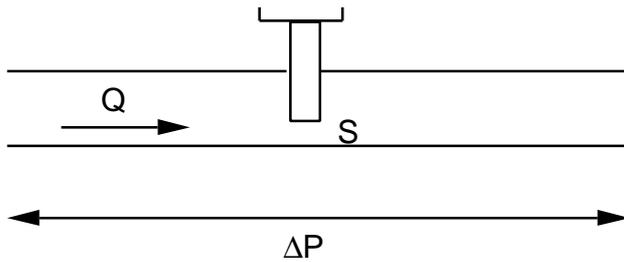


Figure 9: Un tuyau et une vanne.

En fait, la forme exacte de l'équation importe peu. Si l'on considère par exemple la loi d'Ohm s'appliquant à une résistance (figure 10)

$$U = RI \quad (3)$$

le même type d'inférence peut être fait en substituant Q , $1/S$ et P par I , R et U (ce qui a une signification physique).

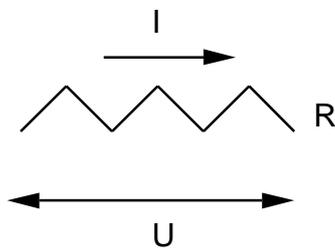


Figure 10: Une résistance.

Cela incite donc à ne considérer que le signe de l'évolution des variables physiques entre deux états d'équilibre, et des contraintes liant ces signes: des équations qualitatives. Ainsi, si l'on note $?X$ le signe de l'évolution de la variable X , les deux lois précédentes fournissent les équations qualitatives:

$$?P - ?Q + ?S \sim 0 \quad (4)$$

$$?U - ?I - ?R \sim 0 \quad (5)$$

Avant de définir formellement ces notations, montrons comment cela fonctionne intuitivement. La règle (R2), par exemple, revient à propager les valeurs $?P=-$ et $?Q=+$ dans l'équation (5):

$$[-] - [+] + ?S \sim 0 \quad (6)$$

ce qui permet de déduire par une règle des signes apprise en classe de quatrième des collèges que $?S$ vaut nécessairement $+$.

Les équations qualitatives utilisent trois notions: une addition et une multiplication (figure 11) et une "égalité qualitative", ou "compatibilité des signes" (figure 12). On remarquera l'introduction, en plus des trois "signes" $+$, 0 et $-$, d'un quatrième élément: $?$. Cela est nécessaire pour définir l'addition: $[+] + [-] = ?$.

+	0	+	-	?
0	0	+	-	?
+	+	+	?	?
-	-	?	-	?
?	?	?	?	?

*	0	+	-	?
0	0	0	0	0
+	0	+	-	?
-	0	-	+	?
?	0	?	?	?

Figure 11: L'addition et la multiplication qualitatives.

$a - b$ ssi $a = b$ ou $a = ?$ ou $b = ?$

Figure 12: L'égalité qualitative.

4.2 Un exemple de modèle: le pressuriseur d'une centrale nucléaire

L'exemple que nous donnons ici, à savoir le pressuriseur d'une centrale nucléaire (figure 13), a trois buts:

- montrer ce que peut être un modèle qualitatif un tant soit peu complexe,
- traiter un problème commun aux précédentes sections,
- montrer comment un modèle qualitatif peut permettre de raisonner, là où des équations numériques simples n'existent tout simplement pas.

4.2.1 Description du pressuriseur

Le pressuriseur a une fonction de "tampon" des variations de volume de l'eau liquide du circuit primaire (figure 1), grâce au matelas de vapeur qu'il contient. Il possède les organes suivants:

- une soupape permettant de libérer de la vapeur,
- un dispositif d'aspersion qui, par injection d'un brouillard d'eau "froide", permet de condenser la vapeur,
- des chaufferettes, permettant d'accroître la température du liquide,
- le conduit reliant le pressuriseur au circuit primaire.

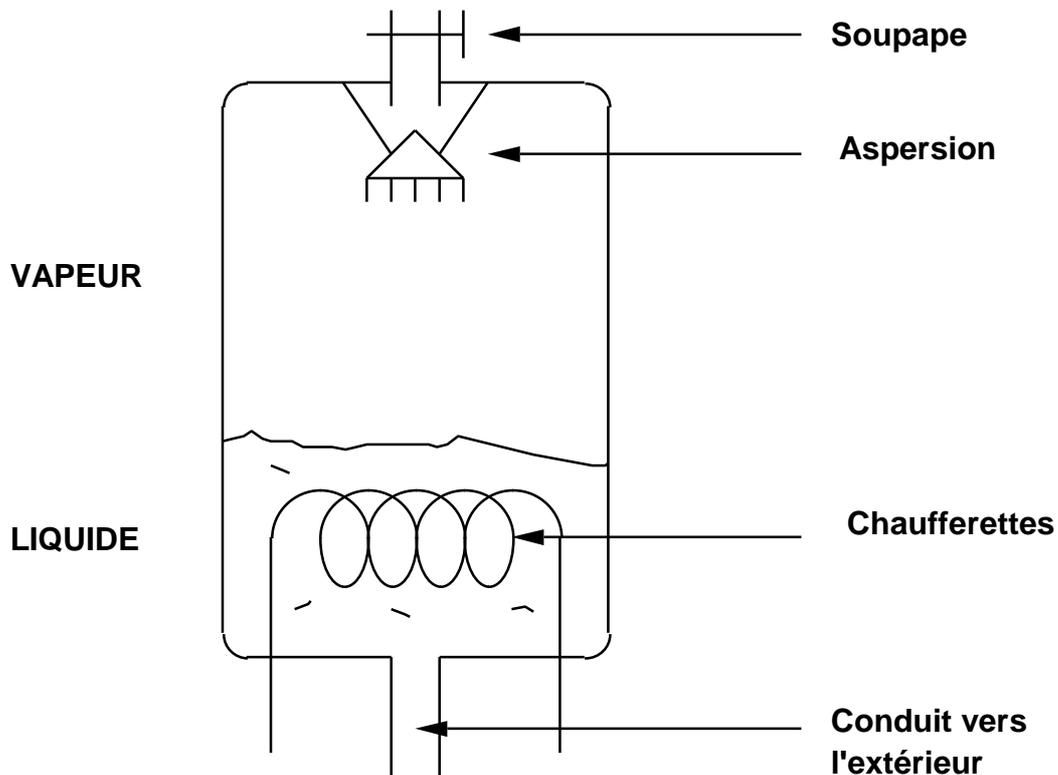


Figure 13: Le pressuriseur d'une centrale nucléaire.

4.2.2 Le diagramme enthalpie pression

Outre l'expression de lois d'équilibre (conservation de la masse, ...), la construction du modèle qualitatif du pressuriseur s'appuie sur des abaques, qui représentent les états possibles d'un mélange liquide-vapeur en eau. Une telle abaque est le diagramme enthalpie-pression (figure 14).

La courbe principale de ce diagramme est la courbe de saturation, qui décrit les états d'équilibre de la phase liquide (en bas) et de la vapeur (en haut). Les états possibles de la phase liquide se situent sous sa courbe de saturation, ceux de la phase vapeur au-dessus. La partie à droite de P_c (pression critique) représente la zone du fluide, où liquide et vapeur sont indistinguables.

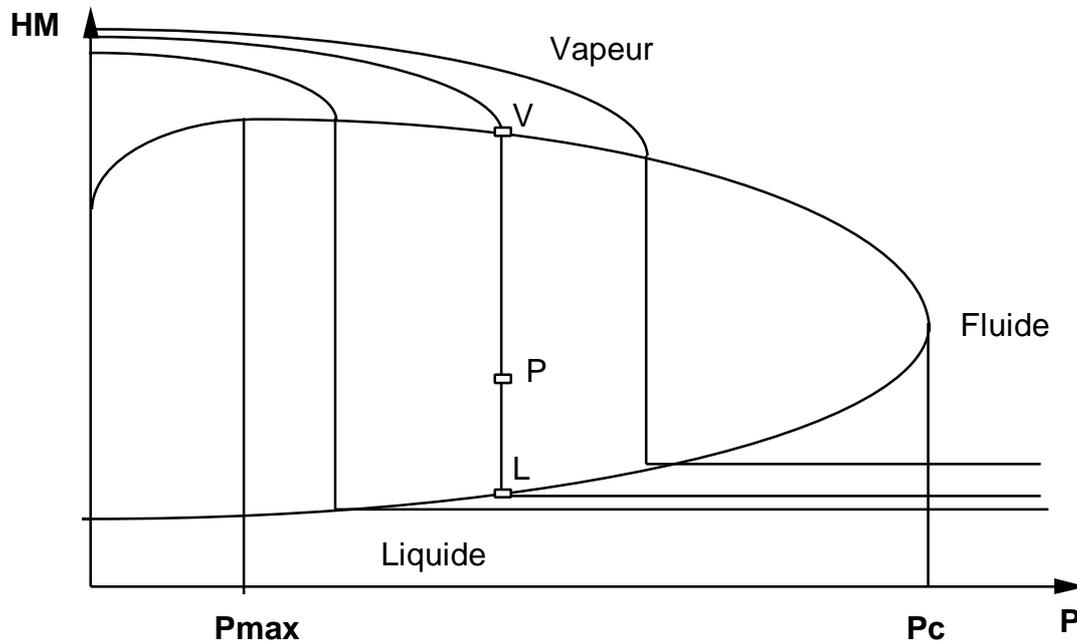


Figure 14: Le diagramme enthalpie-pression.

Ainsi, les points L et V représentent respectivement des états des phases liquide et vapeur en équilibre. Le point P représente le système dans son entier; il est déduit de L et V comme étant le barycentre de ces points avec les poids x et $(1-x)$, où x est le titre en vapeur (c'est-à-dire le rapport masse de la vapeur/masse totale).

Les autres courbes sont les isothermes; une de ces courbes est le lieu des états correspondant à une même température.

4.2.3 Le modèle qualitatif

On considère une transformation infinitésimale du système; chaque variable physique X part donc d'une valeur X et subit une transformation (en signe) δX . Nous allons décrire sous forme d'équations qualitatives les contraintes sur ces quantités contenues dans le diagramme H-P. Chaque courbe, partie de courbe ou région va être décrite par une équation qualitative. Celle-ci ne tiendra que sous certaines conditions sur les états du mélange au début ou lors de la transformation. Ainsi, nous aurons besoin du prédicat $\text{Sat}(\text{Phase})$ (resp. $\text{E-Sat}(\text{Phase})$), qui sera vrai ssi la phase Phase était saturante au départ de la transformation (resp. reste saturante durant la transformation). Enfin, on considère que la pression n'atteint jamais la pression critique.

Les courbes de saturation.

Ces équations traduisent les pentes des courbes de saturation.

- Si $\text{E-Sat}(\text{Liq})$
Alors $\delta P - \delta \text{HM}(\text{Liq}) \sim 0$ (7)

- Si $\text{E-Sat}(\text{Vap})$ et $P < P_{\text{max}}$
Alors $\delta \text{HM}(\text{Vap}) - \delta P \sim 0$ (8)

- Si E-Sat(Vap) et $P > P_{\max}$
Alors $\partial P - \partial HM(\text{Vap}) \sim 0$ (9)

Régions sous et sur les courbes de saturation.

Ces équations traduisent le fait que, si la phase quitte la saturation, alors le vecteur $(\partial P, \partial HM(\text{Phase}))$ doit faire avec la normale à cette courbe orientée vers le sens des mouvements possibles un produit scalaire positif. Les signes des composantes de cette normale sont connus.

- Si Sat(Liq) et non E-Sat(Liq)
Alors $\partial P - \partial HM(\text{Liq}) \sim +$ (10)

- Si Sat(Vap) et non E-Sat(Vap) et $P < P_{\max}$
Alors $\partial P - \partial HM(\text{Vap}) \sim +$ (11)

- Si Sat(Vap) et non E-Sat(Vap) et $P > P_{\max}$
Alors $\partial P - \partial HM(\text{Vap}) \sim +$ (12)

Isothermes: gradient de température.

Ces équations sont la traduction qualitative de l'expression de la différentielle de la température:

$$\partial T = T(P, HM) \cdot (\partial P, \partial HM) \quad (13)$$

soit:

- $\partial T(\text{Liq}) - \partial HM(\text{Liq}) \sim 0$ (14)

- $\partial T(\text{Vap}) - \partial P - \partial HM(\text{Vap}) \sim 0$ (15)

Pentes relatives des isothermes et de la courbe de saturation de la vapeur.

Rien dans les équations qui précèdent ne montre que, dans la zone $P > P_{\max}$, la pente d'une isotherme de la phase vapeur est plus grande en valeur absolue que celle de la courbe de saturation à leur point de contact. Les équations qui suivent traduisent ce fait.

- Si Sat(Vap) et E-Sat(Vap) et $P > P_{\max}$
Alors $\partial T(\text{Vap}) - \partial P + \partial HM(\text{Vap}) \sim 0$ (16)

- Si Sat(Vap) et non E-Sat(Vap) et $P > P_{\max}$
Alors $\partial T(\text{Vap}) - \partial P + \partial HM(\text{Vap}) \sim +$ (17)

4.3 Méthodes de résolution et de compilation

4.3.1 Problématique

Construire un modèle qualitatif ne suffit évidemment pas; il faut savoir l'exploiter. On peut le faire avec différents objectifs: simulation, diagnostic, découverte de la fonction, aide à la conception, ...

Cependant, il y a presque toujours à la base une étape de simulation: étant données certaines "entrées", comment réagit le système dans son intégralité? Par exemple, dans le cas du pressuriseur, on peut se demander quel est l'effet d'une augmentation du régime des chaufferettes, ou de l'aspersion, etc. Il s'agira là d'une simulation stricto sensu. Mais on peut aussi se demander comment on peut faire baisser le niveau de liquide, ou la pression, etc. Ou encore ce qui a pu causer une telle baisse du niveau, de pression, ... Cela signifie que l'on affecte certaines valeurs à certaines variables, et que l'on désire connaître la ou les valeurs possibles des autres variables. Par exemple, on voudrait déduire que, si l'on suppose que le régime d'aspersion augmente, mais que les autres "entrées" du pressuriseur restent stables, alors le niveau augmente et la pression

diminue. En pratique, on dispose donc d'un ensemble d'équations que l'on voudrait résoudre.

On peut en fait adopter une formalisation plus générale: on choisit certaines variables de référence, et on doit exprimer les autres variables en fonction de ces variables de référence. Par exemple, on aimerait, à partir du modèle qualitatif, trouver les relations:

$$?Niveau \sim ?Aspersion - ?Chaufferettes \quad (18)$$

$$?P \sim - ?Aspersion + ?Chaufferettes \quad (19)$$

Le lecteur pourra se référer à la figure 3 de la section 2.2: deux des règles qui y sont mentionnées sont des conséquences de ces relations. En fait, on pourrait en étendant le modèle du pressuriseur à tout le circuit primaire reconstruire automatiquement les "lois" du système expert de conduite décrit dans la section 2. Il s'agit donc là d'une sorte de *compilation* du modèle qualitatif dans un but donné.

4.3.2 Méthodes de calcul qualitatif

Sans pouvoir rentrer ici dans les détails, des méthodes existent pour effectuer cette sorte de compilation [Dormoy & Raiman, 1987, 1988], [Dormoy, 1987, 1988a, 1988b], [Travé & Dormoy, 1988]. Elles s'appuient essentiellement sur une règle de *résolution qualitative*:

Règle de résolution qualitative: Soit x, y, z, a, b des quantités qualitatives telles que

$$x + y \sim a \quad (20)$$

et $-x + z \sim b \quad (21)$

Si x est différent de ?, alors

$$y + z \sim a + b \quad (22)$$

En pratique, cette règle s'applique de la manière suivante. (20) et (21) sont deux équations qualitatives, x une quantité physique et y et z deux expressions sommes de quantités physiques ou de leurs opposées. Par exemple, supposons que les conditions ad hoc sont remplies pour que les deux équations (14) et (16) soient vérifiées simultanément. On peut alors appliquer la règle de résolution qualitative à ces deux équations en prenant $x=?HM(Vap)$, $y=z=?T(Vap)-?P$ (le fait qu'ici y et z sont égaux est contingent) et $a=b=0$.

$$?T(Vap) + ?HM(Vap) - ?P \sim 0 \quad (16)$$

$$?T(Vap) - ?HM(Vap) - ?P \sim 0 \quad (14)$$

On obtient la nouvelle équation (23)

$$?T(Vap) - ?P \sim 0 \quad (23)$$

Appliquer récursivement la règle de résolution qualitative en la contrôlant de manière ad hoc permet en définitive de déduire des relations telles que (18) et (19). On peut d'ailleurs montrer sous certaines conditions une propriété de complétude de la résolution qualitative: on trouve toujours les meilleures relations possibles du type (18) et (19). Pour plus de détail, le lecteur est prié de se référer aux références mentionnées ci-dessus.

4.4 Autres types de modèles qualitatifs

Nous n'avons évoqué ici que les modèles basés sur les signes. Or, la physique qualitative est maintenant loin de se limiter à ce genre de modèle. On peut citer par exemple les modèles basés sur les ordres de grandeur [Raiman, 1986], [Dague, Devès & Raiman, 1987]. Les techniques exploitant ces modèles varient également, par exemple la simulation qualitative [Kuipers, 1986] ou l'analyse comparative [Weld, 1988]. D'autres domaines sont également attaqués, par exemple la description et la cinématique de mécanismes [Joskowicz & Addanki, 1988], [Faltings, 1987]. Il est impossible de simplement évoquer les types de problèmes abordés.

5 Perspectives

Nous avons voulu dans cet article montrer *l'esprit* qui doit prévaloir à notre avis à ce que l'on appelle les *systèmes experts de seconde génération*. En particulier, nous n'avons pas, ou si peu, abordé les outils de mise en œuvre de ces idées.

Il y a deux raisons à cela. Tout d'abord, les problèmes de modélisation priment à notre avis ceux de mise en œuvre. En ce sens, les outils ne constituent pas en soi un problème. Ainsi, un langage à règles de production permet de faire bien des choses: tout dépend de la manière dont il est utilisé. En définitive, ce qui devrait se vendre aujourd'hui n'est plus tant des outils (quoiqu'ils peuvent aussi constituer un goulet d'étranglement) que de la méthodologie de représentation et d'exploitation des connaissances.

L'autre raison est beaucoup plus simple: nous n'avons pas la place nécessaire pour aborder les deux aspects, et il a fallu trancher.

Bibliographie

[Ancelin, Gaussot & Legaud, 1986] Jean Ancelin, Jean-Philippe Gaussot, Pierre Legaud. EXTRA 5000: Un traitement d'alarmes temps réel par système expert sur le simulateur CP2 du Bugey. Note EDF HI/5525-02, août 1986.

[Ancelin & Legaud, 1986] Jean Ancelin, Pierre Legaud. Un système expert pour le traitement des alarmes d'un réacteur nucléaire. Sixièmes journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Avignon 1986.

[Ancelin, Héry, Laleuf & Legaud, 1985] Jean Ancelin, Jean-François Héry, Jean-Claude Laleuf, Pierre Legaud. Couplage d'un système expert et d'une simulation pour l'étude du pilotage d'un processus. COGNITIVA 85, juin 1985.

[Dang Tran & Lagrange, 1988] François Dang Tran, Jean-Philippe Lagrange. Compilation de bases de règles par systèmes experts. Huitièmes journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Avignon, mai-juin 1988.

[De Kleer & Brown, 1984] Johan de Kleer, J.S. Brown. A qualitative physics based on confluences. Artificial Intelligence Vol. 24 n°1-3, December 1984.

[De Kleer, 1984] Johan de Kleer. How Circuits Work. Artificial Intelligence Vol. 24 n°1-3, December 1984.

[Dague, Devès & Raiman, 1987] P. Dague, P. Devès, O. Raiman. Troubleshooting: When Modeling Is The Trouble. AAAI87.

[Dormoy, 1984] Jean-Luc Dormoy. Représentation des connaissances en physique et systèmes experts. Journées internationales sur les systèmes experts et leurs applications, Avignon 1984.

[Dormoy, 1987] Jean-Luc Dormoy. Résolution qualitative: complétude, interprétation physique et contrôle. Mise en oeuvre dans un langage à base de règles: BOOJUM. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), Décembre 1987.

[Dormoy, 1988a] Jean-Luc Dormoy. Controlling Qualitative Resolution. Second workshop on Qualitative Physics, IBM Scientific Center, Paris, July 1988.

[Dormoy, 1988b] Jean-Luc Dormoy. Controlling Qualitative Resolution. AAAI88.

[Dormoy, 1988c] Jean-Luc Dormoy. New Methods in Qualitative Calculus. Symposium über Operations Research, Paderborn, September 1988.

[Dormoy & Raiman, 1987] Jean-Luc Dormoy, Olivier Raiman. Assembling a Device. First workshop on Qualitative Physics, Urbana-Champaign (Ill.), May 1987.

[Dormoy & Raiman, 1988] Jean-Luc Dormoy, Olivier Raiman. Assembling a Device. AAAI88.

[Faltings, 1987] Boi Faltings. Qualitative Kinematics in Mechanisms. IJCAI 1987.

[Ghallab, 1988] Malik Ghallab. Compilation de bases de connaissances. Actes des journées du PRC Intelligence Artificielle, Toulouse, mars 1988.

[Hayes-Roth, 1985] Barbara Hayes-Royh. A Blackboard Architecture for Control. Artificial Intelligence, Vol. 26, pp. 251-321, July 1985.

[Héry, 1985] Jean-François Héry. Convergence commutative d'une base de connaissances: les logiciels L.R.C. appliqués à une maquette d'aide à la conduite d'une centrale nucléaire. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, juin 1985.

[Héry & Laleuf, 1985] Jean-François Héry, Jean-Claude Laleuf. Une maquette pour l'étude des possibilités des systèmes experts dans l'aide à la conduite des centrales nucléaires. Note EDF HI/5097-02 HT/14/23/85, 1985.

[Joskowicz & Addanki, 1988] Leo Joskowicz, Sanjaya Addanki. From Kinematics to Shape: An Approach to Innovative Design. AAAI 1988.

[Kuipers, 1986] Ben Kuipers. Qualitative Simulation. Artificial Intelligence, Vol. 29, 1986.

[Laasri, Maître, Mondot, Charpillet & Haton, 1988] H. Laasri, B. Maître, F. Charpillet, J.P. Haton. ATOME: A Blackboard Architecture with Temporal and Hypothetical Reasoning. Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence, Munich, August 1988.

[Raiman 1986] Olivier Raiman. Order of Magnitude Reasoning. AAAI86.

[Travé & Dormoy, 1988] Louise Travé, Jean-Luc Dormoy. Qualitative Calculus and Applications. Special session on Second Generation Expert Systems of the 12th World IMACS Conference, Paris, July 1988.

[Weld, 1988] Dan Weld. Comparative Analysis. Artificial Intelligence, Vol. 36, n° 3, October 1988.