

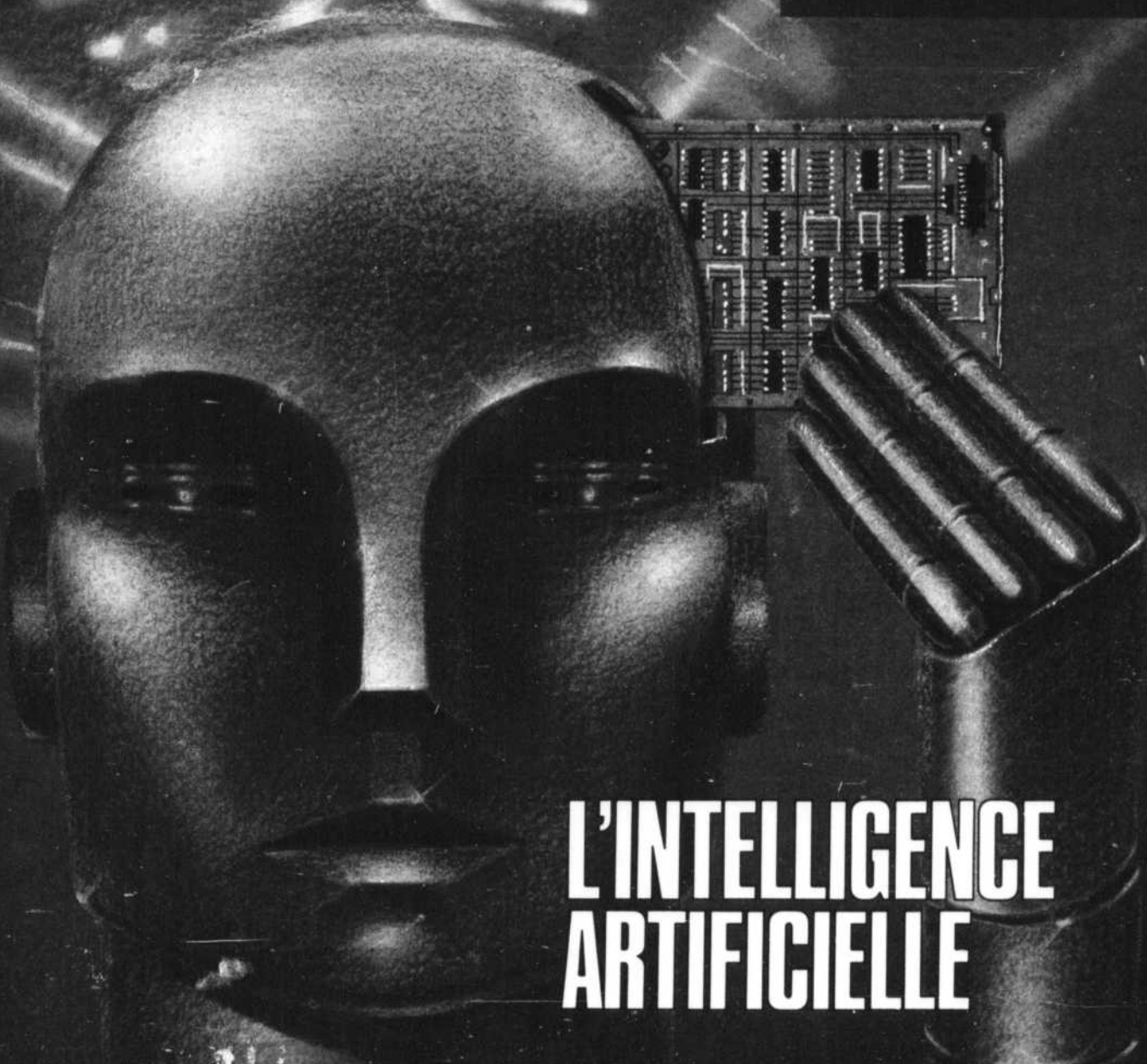
# L'ingénieur

Mai/juin 1987

N° 379

73<sup>e</sup> année

LA REVUE  
L'INGÉNIEUR  
A-T-ELLE UN AVENIR?



**L'INTELLIGENCE  
ARTIFICIELLE**

**dufresne farley samson brillon**  
ingénieurs-conseils

Chauffage — Plomberie — Climatisation Réfrigération —  
Électricité — Expertises — Études énergétiques

200 ouest, rue Sauvé, Montréal, H3L 1Y9

Tél. 384-0440

# Beaulier essai

ÉQUILIBRAGE DE LA VENTILATION  
RIGUEUR ET FIABILITÉ

**Maurice Beudet, ing.**

7127, De Lorimier, Montréal, Qc H2E 2N7

**(514) 376-0362**

ÉTUDES, INGÉNIERIE,  
APPROVISIONNEMENT,  
GESTION DE PROJET,  
CONSTRUCTION

## Lavalin

Siège Social:  
1100, boul. Dorchester ouest  
Montréal, Québec H3B 4P3



SIAL

Compagnie Internationale  
de Géophysique Inc.

- Etudes Géophysiques
- Hydrogéologie
- Vibration & Seismicité
- Géologie & Géochimie
- Exploration Minière
- Environnement

2225 Chemin Saint-François, Dorval,  
Québec, Canada H9P 1K3

☎ (514) 683-4215

• Télex : GTS HTD MTL  
• 05-821643

*Savez-vous reconnaître  
une vraie aubaine?*

Il existe aujourd'hui plusieurs ordinateurs bon marché qui ne manqueront pas de vous rappeler, lors de l'usage, que vous ne les avez pas payés cher !

Philips vous offre une composante standard qui se paie, bien sûr, mais surtout qui s'apprécie: LA QUALITÉ.

Philips appose son nom sur un appareil fiable, puissant et performant qui, en plus d'être entièrement compatible, possède de multiples possibilités d'expansion.

Prenez le temps de bien comparer les configurations offertes et vous réaliserez que la vraie aubaine n'est pas nécessairement l'appareil le moins cher ...



# PHILIPS



Configuration 1850,00 \$

- Processeur: Intel 8088-2
- 640 Ko de mémoire vive
- Vitesses d'exploitation: 4.77 et 8 Mhz
- Carte graphique ATI: 640 x 200 (CGA)  
720 x 340 (Hercules)
- 8 fentes d'expansion
- 2 lecteurs de disque souple
- Port série RS-232
- Port parallèle Centronics
- Clavier type IBM PC-83
- Moniteur monochrome Philips
- MS-DOS version 3.1
- GW-Basic
- Tuteur de Philips
- Traitement de texte TDT de Philips

**Succursale informatique**

5000, Jean-Talon Ouest  
340-4487

Papeterie  
340-4841

Librairie scientifique  
340-4851

**coopoly**

**Éditeur**

Les publications l'ingénieur inc.  
Case postale 6980, succursale A  
Montréal (Québec) H3C 3L4  
Tél. (514) 340-4764

**Conseil d'administration**

Paul Major, président  
Paul Hébert, vice-président

**Comité exécutif**

Guy Drouin, président exécutif  
Jacques Lapointe, vice-président  
Jean L. Corneille, vice-président  
Serge R. Tison, secrétaire  
Gilles G. Bélanger, trésorier  
Yolande Gingras, directeur général

**Administrateurs**

Adolphe Blach  
Claude Brulotte  
Roland Chevalier  
Gilles Delisle  
Fernand DeSerres  
Yvon Ganepuy  
Roger P. Langlois  
Emeric G. Léonard  
Roger Lessard  
Ovide J. Poitras  
Diane Rousseau  
Serge Saulnier  
Guy A. Sicotte  
Jean-Claude Thernien

**Directeur général**

Yolande Gingras

**Comité consultatif de rédaction**

Gilles G. Bélanger, directeur  
Joseph A. Bouchard  
Dominique Chassé  
Jules Delisle  
Pierre Desrochers  
Claude Gou  
Jacques Lapointe  
Raymond Leroux-Yves Lizotte  
Paul-Édouard Robert  
Georges Salloum

**Rédacteur en chef**

Joseph Kélada

**Publicité**

Robert Dumouchel  
Publications R.A.D. enr.  
605 rue Filatrault  
Suite 6  
Saint-Laurent, (Québec) H4L 3V3  
Tél. (514) 744-6019, 744-6162

**Composition**

Les Ateliers Chiora inc.  
(514) 383-4320

**Imprimerie**

Groupe d'imprimerie  
INTER-MARK Inc.  
(514) 526-3381

**Abonnements**

Canada 15 \$ par année  
Étranger 20 \$ par année  
À l'unité 3 \$  
Six (6) numéros par année

**Droits d'auteurs**

Les auteurs des articles publiés dans l'INGÉNIEUR conservent l'entière responsabilité des théories et des opinions émises par eux. Reproduction permise, avec mention de la source; on voudra bien cependant faire tenir à la Rédaction un exemplaire de la publication dans laquelle paraîtront les articles. Engineering Index, Biol. Che., Sci., Abstracts Periodex et Radar signalent les articles publiés dans l'INGÉNIEUR — ISSN — 0020-1138 — Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Canada — Bibliothèque nationale du Québec

**Courrier de deuxième classe**

Enregistrement n° 5788

# Sommaire

## 4 Systèmes experts: une technologie à la portée des entreprises

par Bernard Moulin

## 8 La représentation des connaissances dans les systèmes experts

par Ruddy Lelouche

## 17 Une démarche pour la conception de systèmes experts

par Bernard Moulin

## 22 Un système expert pour la mise en forme des matériaux

par G. Salloum, P. Girard, P. Raducanu

## 27 Systèmes experts et conception assistée par ordinateur: un couplage intéressant

par C. Marche, B. Robert, G. Siew



*Chers confrères ingénieurs et lecteurs de la revue,*

Vous trouverez avec ce numéro un rappel spécial de renouvellement de votre abonnement à la revue.

Tout comme il est bon de faire le point au cours d'une vie ou d'une carrière, il en va de même à ce moment dans l'histoire de la revue. Depuis plus de 75 ans, celle-ci apporte régulièrement, plusieurs fois par année, de nombreux articles d'intérêt aux ingénieurs du Québec. Elle a fourni continuellement un moyen de communication scientifique de langue française. Elle a contribué à faire connaître les principaux aspects de la pratique du génie. Elle a favorisé la sensibilisation des ingénieurs aux nouveaux développements technologiques. La revue a toujours respecté des critères de haute qualité pour satisfaire les exigences de ses abonnés et être le reflet de leur professionnalisme.

La direction a réussi à publier la revue à un coût d'abonnement raisonnable grâce au soutien de sa société fondatrice, l'Association des Diplômés de Polytechnique, et grâce à sa politique publicitaire. Il y a quelques années plusieurs ingénieurs, parmi les chefs de file de notre profession, ont contribué à mettre sur pied la Fondation de l'Ingénierie Canadienne dont les revenus apportent une aide financière partielle à la revue, dans le but de contribuer à assurer son maintien.

Nous nous devons de souligner à nos lecteurs le fait que les abonnements constituent une source de revenus essentielle pour la survie de la revue. Pourtant, plusieurs ingénieurs omettent de payer leur abonnement, croyant peut-être que la revue peut faire ses frais autrement. Tel n'est pas le cas. Pour maintenir son niveau de qualité et de représentativité auprès de l'auditoire restreint qu'est la population des ingénieurs du Québec, la revue doit recevoir leur plein appui et ceci par la voie du paiement de l'abonnement par tous ceux qui la reçoivent et qui désirent continuer de la recevoir. Les sondages nous démontrent votre satisfaction du contenu rédactionnel et de la présentation de votre revue. La direction ne ménage aucun effort pour qu'il en soit ainsi.

Il est donc capital pour l'avenir de la revue que tous ceux qui la reçoivent paient leur abonnement: il s'agit d'une question de survie parce que l'Association des Diplômés de Polytechnique n'a pas les moyens financiers pour absorber les déficits.

Le Conseil d'administration poursuit actuellement une étude de rentabilité et de relance de la revue et envisage certaines transformations pour augmenter son intérêt et son tirage.

Cette évolution de la revue paraît sûrement intéressante mais elle sera impossible sans qu'une première étape ne soit franchie: il faudra absolument que ceux qui reçoivent actuellement la revue paient leur abonnement, sinon...

Paul Major, ing.  
Président  
Conseil d'administration  
Les Publications l'ingénieur (LPI).

# introduction

## Le développement des systèmes experts

Dans ce numéro spécial sur les systèmes experts nous nous efforcerons, dans la mesure du possible, de projeter un éclairage «réaliste» sur la technologie des systèmes experts et sur sa mise en œuvre, notamment dans le domaine de l'ingénierie.

Notre objectif ultime est de permettre aux lecteurs d'aborder la question du développement des systèmes experts dans les entreprises d'un point de vue pragmatique. Pour cela nous présenterons dans un premier article les principales caractéristiques qui distinguent les systèmes experts par rapport à des systèmes manipulant des «bases de données traditionnelles», nous proposerons une catégorisation simple des types d'applications pour lesquels les techniques de systèmes experts et les techniques de bases de données semblent bien adaptées.

En envisageant les avantages et les inconvénients de ces techniques de conception nous illustrerons la complémentarité de ces approches dans le cadre du développement de systèmes informatiques complexes.

D'autre part, le lecteur pourra explorer diverses facettes de la mise en œuvre des systèmes experts dans les entreprises. Dans l'article sur «**La représentation des connaissances et les systèmes experts**», R. Lelouche montre l'importance que revêt le choix de représentations adaptées à la description des connaissances utilisées par les experts et manipulables par ordinateur. Il décrit les principaux modes de représentation des connaissances utilisées en ingénierie du savoir.

L'article «**Approche méthodologique de la conception de systèmes experts**» présente les traits caractéristiques d'un projet de conception de systèmes experts, en adoptant le point de vue du responsable de projet.

Dans «**Système expert pour la mise en forme de matériaux**», G. Salloum, P. Girard et P. Raducanu décrivent les principales caractéristiques d'un système expert qui met en œuvre les principes de l'ingénierie et de la science des matériaux, pour la prévention et la solution de problèmes pendant la mise en forme de matériaux.

Avec «**Systèmes experts de conception assistée par ordinateur, un couplage intéressant**», C. Marche, B. Robert et G. Siew illustrent l'utilisation de la technologie des systèmes experts en conception assistée par ordinateur dans le domaine de l'hydraulique, avec un logiciel de conception hydrologique et un outil à l'utilisation d'un logiciel qui traite des écoulements en rivières.

Bien entendu, ce numéro ne prétend pas épuiser le sujet sur les systèmes experts et leurs applications. Nous espérons que le lecteur retiendra de sa lecture quelques éléments de base, qui lui permettront de mieux appréhender l'impact de cette nouvelle technologie dans son propre milieu de travail, et lui donneront peut être le goût de poursuivre son exploration d'un sujet qui, incontestablement marquera l'évolution de la profession d'ingénieur au cours des prochaines années.

## Systemes experts: une technologie à la portée des entreprises

Bernard Moulin

*Cet article présente des notions fondamentales reliées à l'utilisation de la technologie des systèmes experts. Il montre les principales distinctions existant entre des applications qui nécessitent la mise en œuvre de bases de données et celles impliquant la conception de bases de connaissances. Il propose enfin quelques indications permettant de déterminer si un projet nécessite la conception d'un système à base de connaissances.*

### Introduction

Intelligence artificielle, systèmes experts, «machines intelligentes»... Tous ces mots, dont se sont emparés les médias au cours des trois dernières années, ont fortement contribué à rendre populaires des travaux qui, jusque là, étaient restés dans les laboratoires. Le rêve millénaire de créer «une intelligence artificielle» serait-il enfin à la portée de nos ordinateurs? La recherche du sensationnel, la nécessité d'attirer l'attention quel qu'en soit le prix, conduit à une débauche de titres et d'annonces qui enflamment l'imagination du profane: la barrière de l'intelligence et le mur de la connaissance seraient-ils enfin franchis par ces machines et ces programmes d'intelligence artificielle.

La réalité est presque peu différente. De nombreux systèmes experts ont été développés de façon opérationnelle dans divers do-

maines d'application (médecine, ingénierie, électronique, chimie etc.), mais même les systèmes les plus complexes qui ont été développés à ce jour, ne peuvent manipuler qu'une quantité de connaissances très limitée et ne permettent de «simuler» que des tâches «expertes» très restreintes. Un des systèmes experts les plus connus est R1, qui a été conçu pour la configuration d'ordinateurs à la Digital Equipment Corporation. Il emmagasine dans sa base de connaissances quelque 4000 règles heuristiques qui permettent d'assembler les différentes parties d'un ordinateur en fonction des besoins du client. Pourtant R1 «ne sait pas ce qu'est un ordinateur»!! Il ne peut pas décrire un ordinateur, ou expliquer comment il fonctionne. Il peut seulement résoudre les problèmes de configuration d'ordinateurs pour lesquels ses règles heuristiques peuvent fournir une solution.

### Des bases de données...

«Une base de données» est un concept qui est devenu familier pour les usagers de l'informatique. Nous rappelons ici brièvement certaines de leurs caractéristiques les plus importantes.

Une base de données est un ensemble de données organisées en fonction d'une structure de données — souvent appelée «schéma» — et généralement manipulées par l'intermédiaire d'un logiciel spécialisé appelé système de gestion de bases de données (SGBD).

Le schéma de la base de données est élaboré par les concepteurs de telle façon qu'il rende compte des propriétés intrinsèques — ou sémantiques — de la réalité au sujet de laquelle la base de données doit être créée.

Prenons l'exemple d'une boutique qui vend des micro-ordinateurs et des logiciels. Les employés doivent disposer de données précises concernant les matériels, les logiciels disponibles, les prix, les fournisseurs de ces produits, pour pouvoir répondre aux demandes de renseignements des clients, pour établir des factures, mettre à jour l'état des stocks, commander des produits ou pièces. L'essentiel des tâches

accomplies par les employés consiste à manipuler des données connues, ou faits concernant les produits vendus par la boutique.

Ces tâches peuvent être efficacement supportées par un système construit autour d'une base de données. La figure 1 présente de façon simplifiée les composantes fondamentales d'un tel système: une base de données contenant des *objets informatiques* — facture, client, logiciel, matériel, fournisseur — des programmes permettant à l'employé d'interroger la base de données, de gérer la facturation aux clients, de produire des rapports, de gérer les commandes aux clients.

On peut remarquer que ces programmes adoptent des procédures de manipulation de données déterminées, bien connues et peu évolutives, comme c'est habituellement le cas pour les systèmes d'information.

Notons enfin que l'une des caractéristiques fondamentales des SGBD réside dans une séparation claire, au sein des systèmes, entre les programmes et les données qu'ils manipulent (principe d'indépendance des données et des programmes).

### ... aux bases de connaissances.

Au delà de l'utilisation des bases de données on trouve les systèmes à base de connaissances, qui sont caractérisés par une distinction nette entre les connaissances mises en œuvre et les algorithmes de résolution qui les manipulent. Dans un système informatique traditionnel, le comportement du système prend la forme de programmes, qui doivent être modifiés dès que les règles sur lesquelles se base ce comportement changent.

Dans un système à base de connaissances on distingue la stratégie de résolution de problèmes sur laquelle se base le comportement du système — par exemple un problème de diagnostic —, des règles spécifiques que doit mettre en œuvre le système pour résoudre ce type de problème dans un champ d'application donné tel que celui des règles relatives à la détection des causes d'emploi chez les humains ou

M. Bernard Moulin est professeur au département d'informatique de l'Université Laval. M. Moulin est diplômé de l'École d'Ingénieurs Centrale de Lyon, il est docteur-ingénieur ès mathématiques appliquées et détient une maîtrise en sciences économiques. Ses domaines d'expertise touchent à la conception de bases de données, à la modélisation des systèmes d'information, aux méthodologies de conception de systèmes, à la gestion de projets, à la représentation des connaissances et à l'ingénierie du savoir (intelligence artificielle). Il dirige plusieurs projets de recherche reliés à ces domaines, dans lesquels il a réalisé plusieurs contrats de formation ou d'expertise-conseil. Il est membre du groupe «Design and Evaluation of Information Systems» de l'International Federation of Information Processing.

figure 1: Système de gestion des commandes et de la facturation

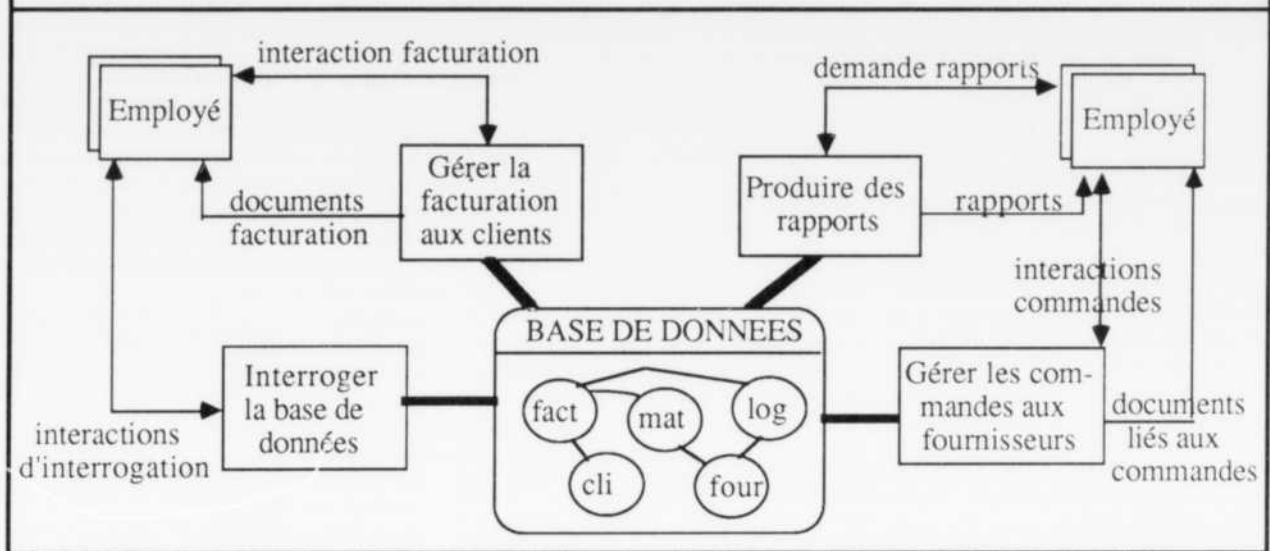
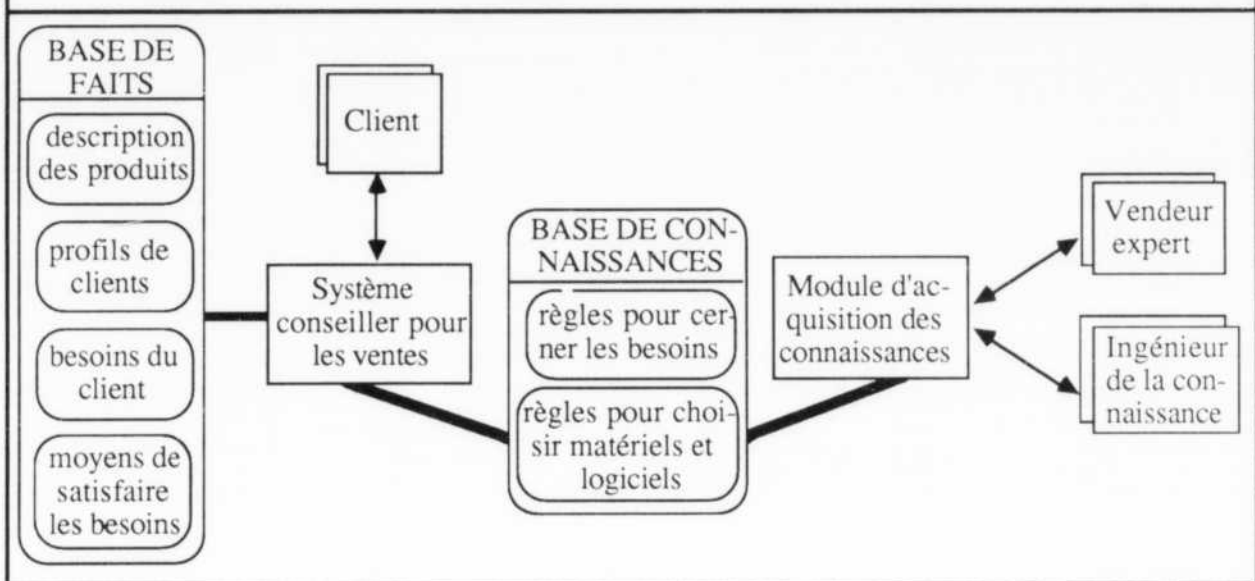






figure 2 : Système à base de connaissances "conseiller en ventes"



**LEGENDE**

- |   |   |   |  |
|---|---|---|--|
|  | "Environnement" décrivant les limites du système. |  | "accumulation" représentant de l'information contenue dans le système. |
|  | "Processus" décrivant une fonction du système.    |  | canal de communication entre processus et accumulation                 |

des règles nécessaires à l'interprétation des causes de pannes d'un ordinateur.

Ainsi les *systèmes à base de connaissances* (SBC) comportent essentiellement trois composantes:

- une base de données, appelée *base de faits*, qui emmagasine les données manipulées par le système;
- une *base de connaissances* qui permet de spécifier le comportement du système, habituellement sous la forme de règles;
- un *moteur d'inférence*, logiciel spécialisé qui construit automatiquement le raisonnement du système en sélectionnant et en activant les règles pertinentes de la base de connaissances, en fonction de l'état de la base de faits.

Nous réservons l'appellation de *système expert* à la catégorie de SBC qui exploitent des connaissances relativement «rares», détenues par quelques experts humains très sollicités.

Lorsqu'on veut développer un SBC, il est nécessaire de bien identifier les caractéristiques du comportement que devra simuler le système: s'agit-il d'une activité d'interprétation, de classification, de diagnostic, de planification, de conception? On peut ainsi déterminer la stratégie de résolution de problèmes la mieux adaptée au type de comportement identifié et, par conséquent, choisir un environnement de conception de systèmes à base de connaissances (expert system shell), qui fournit ou permet d'introduire le moteur d'inférence requis.

Dans le cas de la boutique de vente de micro-ordinateurs, nous pourrions envisager le développement d'un système *conseiller en vente*, qui pourrait aider les clients à cerner leurs besoins afin de choisir un micro-ordinateur et des logiciels. Le système *conseiller en vente* doit donc simuler, dans une certaine mesure, le comportement du vendeur humain lorsqu'il conseille ses clients.

Ce comportement ne consiste pas en une pure recherche de données: un SGBD n'est donc pas suffisant, puisqu'il doit mettre en œuvre des connaissances concernant le client, la démarche de choix

d'un micro-ordinateur, la démarche de choix de logiciels, la meilleure façon de se comporter avec un client compte tenu de son profil. Il est difficile de modéliser un tel comportement sous forme algorithmique.

Aussi le système *conseiller en vente* prend la forme d'un système à base de connaissances qui manipule une base de faits, contenant la description des produits à vendre, des profils de clients connus, la description des besoins du client, les moyens de satisfaire des besoins typiques avec les produits disponibles. Sa base de connaissances contient essentiellement deux ensembles de règles: le premier formalisant la démarche suivie par le vendeur pour cerner les besoins du client; le second caractérisant la manière de choisir le matériel et le logiciel pour répondre aux besoins identifiés (voir figure 2).

### L'acquisition des connaissances

Le développement d'un SBC met en présence trois catégories d'intervenants: les usagers auxquels on destine le SBC, les concepteurs ou «ingénieurs de la connaissance» qui prennent en charge les aspects méthodologiques et techniques du projet et les *experts du domaine*, spécialistes qui détiennent les connaissances que l'on veut formaliser et emmagasiner dans le SBC.

L'acquisition des connaissances est l'une des phases les plus critiques de la conception d'un SBC, puisque l'efficacité du comportement du système dépend de la qualité et de la cohérence des connaissances qu'il contient. Au cours de cette phase les *ingénieurs de la connaissance* doivent aider les *experts* à identifier, représenter et structurer des connaissances qu'ils utilisent pour leurs activités spécialisées, le plus souvent de façon intuitive.

Un environnement de conception de systèmes à base de connaissances offre des outils d'édition et de validation — sous-système d'acquisition des connaissances — qui permettent aux

ingénieurs de la connaissance de construire et de modifier de façon déclarative la base de connaissances, en utilisant pour la spécification des règles un langage de haut niveau, habituellement un sous-ensemble du français ou de l'anglais.

La pratique montre que les règles d'un SBC peuvent être classées en plusieurs catégories qui correspondent normalement à des connaissances exactes du domaine, à des connaissances heuristiques ou règles empiriques, à des méta-connaissances ou règles s'appliquant sur d'autres règles.

Dans le cas du système *conseiller en vente*, la règle «SI l'ordinateur doit être utilisé en France ALORS fournir une alimentation supportant une tension de 220 volts» correspond à des connaissances exactes du domaine; la règle «SI le client est un utilisateur novice en informatique ALORS il sera plus attiré par un Macintosh» correspond à une *règle heuristique*; la règle «SI le client connaît précisément ses besoins ALORS activer la procédure de proposition d'un produit» est un exemple de *méta-règle*.

### Utilisation d'un SBC

Il ne faut pas oublier que le SBC doit être utilisé par des usagers qui ne sont pas experts du domaine, en leur permettant d'accéder aux connaissances spécialisées contenues dans la base de connaissances. Aussi le comportement du SBC doit être adapté aux attentes des usagers potentiels, à leurs besoins, tout en tenant compte de leur niveau de connaissance du domaine concerné. Il est donc possible que les ingénieurs de la connaissance doivent développer des interfaces différentes pour permettre à diverses catégories d'usagers d'exploiter la même base de connaissances.

Notons enfin que les SBC comportent des mécanismes d'explication de leur raisonnement, que l'utilisateur peut activer en posant des questions telles que POURQUOI ou COMMENT, afin de déterminer la chaîne d'inférences qui a conduit le système à poser une question ou à établir une conclusion.

Dans le cas du système *conseiller en vente*, une séance de consultation se déroule de la façon suivante (voir la figure 2 pour repérer les composantes du système indiquées entre guillemets dans le texte suivant). Le client entre en contact avec le système qui lui pose une série de questions afin de recueillir les données concernant le «profil du client» (données emmagasinées dans la base de faits). Le système active ensuite l'ensemble des «règles pour cerner les besoins du client», et dirige la consultation en posant des questions au client, en utilisant les réponses pour compléter dans la base de faits les données relatives aux «besoins du client». En fonction des réponses du client, le système adapte son comportement en sélectionnant les règles pertinentes pour poursuivre la consultation (le comportement du système dans cette phase se rattache à la catégorie des systèmes de diagnostic). A tout moment le client peut poser la question «pourquoi» pour obtenir des explications au sujet des questions posées par le système.

Lorsque le système a complété la caractérisation des «besoins du client», il active le bloc de «règles pour choisir matériels et logiciels» et utilise les données concernant les «moyens de satisfaire les besoins» pour sélectionner une solution matérielle et identifier les logiciels requis. Le système pose au client les questions nécessaires pour déterminer les caractéristiques détaillées de la solution en cours d'élaboration. Enfin le système propose une solution au client. Ce dernier peut obtenir des réponses aux questions *pourquoi* et *comment*, concernant la solution suggérée et les demandes faites par le système. Si la solution ne convient pas au client, le système peut poursuivre sa recherche pour proposer d'autres solutions qui correspondent aussi aux besoins du client.

Le module d'acquisition des connaissances permet de saisir et de modifier les règles de la base de connaissances qui sont spécifiées par l'ingénieur de la connaissance et les vendeurs experts, en fonction de leur expertise de vente et de leur connaissance des réactions probables des clients.

### Déterminer si un projet nécessite la conception d'un SBC.

Nous proposons ici une catégorie simple des types d'applications pour lesquels il est préférable d'utiliser des techniques de systèmes à base de connaissances ou des techniques de bases de données.

En effet la technologie des systèmes à base de connaissances permet de résoudre certaines catégories de problèmes informatiques, mais elle ne remet pas en cause l'utilisation de technologies plus traditionnelles: bases de données, outils de quatrième génération.

Comment reconnaître un projet *typique* qui requiert uniquement la technologie des bases de données?

Les applications concernées doivent uniquement manipuler des données, suivant une démarche algorithmique, pour exécuter des processus relativement répétitifs et bien connus. L'effort principal de modélisation porte sur la représentation des structures de données. Le système nécessite une manipulation effective et intensive de grandes quantités de données. Pour implanter le système, on utilise en général un SGBD (de 3<sup>ème</sup> ou de 4<sup>ème</sup> génération) qui fournit des outils complémentaires: dictionnaire de données, générateur de rapports, langage d'interrogation.

Comment reconnaître un projet *typique* qui requiert uniquement la technologie des systèmes à base de connaissances ou des systèmes experts?

Les applications concernées doivent, non seulement, manipuler des données mais aussi des connaissances, qui sont des représentations symboliques. Les tâches concernées sont en général mal définies, les problèmes rencontrés sont peu stabilisés et ne peuvent pas être résolus algorithmiquement. L'effort principal de modélisation porte sur la représentation des connaissances. Le système nécessite une manipulation effective et intensive de grandes quantités de connaissances. Pour implanter le système, on utilise en général un environnement de conception de système à base de connaissances ou des langages de

programmation symbolique (Lisp, Prolog).

Si de plus, les connaissances relèvent d'une expertise *rare* détenue par un nombre limité d'experts, travaillant sur des tâches complexes requérant un haut niveau de performance, on est en présence d'un projet de conception de système expert.

Certains projets *hybrides* ne peuvent pas être catégorisés simplement comme précédemment, parce que les systèmes envisagés comportent des composantes qui relèvent de l'une ou l'autre des catégories précédentes. Citons notamment les systèmes experts qui doivent manipuler des données (faits) qui sont disponibles dans des bases de données; les systèmes d'information de gestion (implantés avec des bases de données), dont certaines composantes d'aide à la décision nécessitent une implantation sous forme de SBC; les systèmes de conception assistée par ordinateur dont certaines composantes spécialisées peuvent être implantées sous forme de SBC; les systèmes de conception assistée par ordinateur dont certaines composantes spécialisées peuvent être implantées sous forme de SBC. Tous ces projets nécessitent d'établir des couplages entre des SBC et des outils plus traditionnels (bases de données, logiciels de CAO etc.).

#### Références

- HAMON P., KING D., *Expert Systems*, John Wiley and sons pub., New York 1985.
- HAYES ROTH F., WATERMAN D.A., LENAT D., *Building Expert Systems*, Addison Wesley pub. comp., Reading Ma 1983.
- MOULIN B., *L'ingénierie du savoir*, revue l'ingénieur, no. 366, 71<sup>ème</sup> année, mars-avril 1985, p 19, 24.
- MOULIN B., *Les systèmes à base de connaissances dans les organisations*, revue l'ingénieur, no. 375, 72<sup>ème</sup> année, septembre-octobre 1986, p 21, 27.
- MOULIN B., *L'informatique cognitive des organisations*, revue Systèmes, printemps 1986, pp. 3-9
- WATERMAN D.A., *A Guide to Expert Systems*, Addison Wesley 1985.
- J.C. RAULT, éditeur, *Comptes rendus des Journées Internationales sur les Systèmes experts et leurs applications*, Agence de l'informatique, 1985, 1986 et 1987.

## La représentation des connaissances dans les systèmes experts

Ruddy Lelouche

*Cet article met en évidence l'importance de la représentation des connaissances dans les problèmes d'intelligence artificielle, et en particulier en ingénierie de la connaissance (knowledge engineering). Nous y décrivons les principaux mécanismes conceptuels de représentation, en les illustrant par des exemples simples concrets: la logique, les règles de production, les cadres et scénarios prototypes (frames et scripts), et les réseaux sémantiques.*

Avec la vogue des systèmes experts, de nombreuses disciplines — et les différents domaines de l'ingénierie ne font pas exception — souhaitent utiliser les techniques correspondantes, ce qui est légitime. Ainsi, plusieurs personnes, chercheurs, ou publications, utilisent le terme de *système expert* dès qu'un programme comporte quelques «règles», qui ne sont souvent que des tests ou différentes lignes d'une table de décision. En fait, la partie difficile, et pourtant fondamentale, de la conception des *systèmes à base de connaissance* — (c'est le terme plus exact et moins galvaudé que nous choisirons) — réside dans l'*extraction* des connaissances que devra mettre en œuvre le programme, et ensuite dans la *représentation* à utiliser pour que le

programme et l'utilisateur puissent tous deux accéder à ces connaissances et les traiter de manière «intelligente».

Nous ne parlerons pas ici des problèmes posés par l'extraction, qui sont ceux de l'identification de la connaissance elle-même, et qui dans le cas des systèmes experts impliquent une coopération délicate entre l'expert et l'*ingénieur de la connaissance*. En revanche, les problèmes de représentation concernent directement ce dernier, ou l'informaticien jouant ce rôle. Idéalement, toute bonne représentation devrait satisfaire un certain nombre de critères: rendre explicites les choses importantes, mettre en évidence les contraintes naturelles, être complètes, être concises, être transparentes, faciliter les calculs, supprimer les détails, et être calculables par une procédure. En général, un mécanisme unique ne satisfait pas tous ces critères. C'est pourquoi il est bon d'en connaître plusieurs, ainsi que les forces et les faiblesses de chacun. C'est le but premier que poursuit cet article.

### La logique

Le premier mécanisme à considérer est la *logique*, par le fait même que c'est la discipline à la base du processus de *déduction*. La logique formelle est en effet la théorie des raisonnements valides, et cela exclut a priori toute considération de sens.

### Systèmes formels

Un *système formel* est défini par quatre composantes:

- un *vocabulaire* des *signes* utilisables (constantes, variables, connectives),
- les *règles de formation* des *mots* (parfois appelés *formules bien formées*),
- les *axiomes* qui sont les mots réputés valides au démarrage,
- les *règles de déduction* qui permettent, à partir d'un ou plusieurs mots pris comme hypothèse(s), de déduire d'autres mots.

Si les mots utilisés dans l'application d'une règle de déduction sont valides, les mots déduits sont alors valides à leur tour. Une suite de mots obtenus par l'application en chaîne de règles de déduction à partir d'un ou plusieurs mots quel-

conques pris comme hypothèse constitue une *déduction* (à partir de cette hypothèse), et une *démonstration* si l'hypothèse en question ne contient que des axiomes. Un mot pour lequel il existe une démonstration  $\gamma$  aboutissant s'appelle un *théorème*; c'est un non-théorème dans le cas contraire.

Les systèmes formels présentent deux intérêts: la *décidabilité* et l'*interprétation*. La *décidabilité* est la propriété que possède un système formel si, étant donné un mot bien formé quelconque  $A$ , il existe une procédure (un programme) permettant de savoir en un temps fini si  $A$  est ou n'est pas un théorème (dans le cas contraire, le système est dit indécidable). Lorsqu'un système formel est décidable, cette *procédure de décision* nous permet de ne pas chercher inutilement une démonstration inexistante. Malheureusement, il existe des systèmes non décidables, tels que la logique des prédicats.

Une *interprétation* part de l'établissement d'une correspondance:

- entre les signes du système formel et les primitives de la réalité à représenter (le problème est alors de bien définir ces primitives);
- entre les mots du système formel et certains énoncés à propos de cette réalité.

Une telle correspondance est une interprétation valide lorsque à tout théorème du système formel correspond un énoncé vrai de la réalité. Le système constitue alors une *modélisation* de cette réalité: l'utilisation du système permet d'affirmer des énoncés sur la réalité, en s'appuyant simplement sur le fait qu'à ces énoncés correspondent des théorèmes du système formel pris comme modèle. Un système formel est d'autant plus intéressant qu'il en existe de nombreuses interprétations valides.

Il est cependant important de remarquer que les énoncés vrais d'une réalité modélisée par un système formel ne correspondent pas nécessairement à des théorèmes de ce système: soit ces énoncés correspondent à des non-théorèmes (des mots pour lesquels il n'existe pas de démonstration), soit il n'existe aucun mot du système qui leur corresponde. L'étude des systèmes formels et de leurs interprétations nous réserve même

Ruddy Lelouche est ingénieur de l'École Supérieure des Télécommunications (Paris), et détient un M.S. et un Ph. D. en Engineering & Computer Science de l'University of California at Berkeley. Il a travaillé comme ingénieur-système, comme responsable de la formation, et comme ingénieur de recherche, au Laboratoire d'Informatique pour les Sciences de l'Homme du C.N.R.S. (Paris). Là, il a été l'un des principaux concepteurs et implanteurs de RESEDA, système expert en traitement de données biographiques.

Il est professeur à l'Université Laval, où il a créé un cours avancé sur la représentation des connaissances et les systèmes experts. Ses intérêts en recherche incluent la représentation des connaissances, les systèmes d'E.I.A.O. (enseignement intelligemment assisté par ordinateur), les applications de l'intelligence artificielle dans les organisations, ainsi que la conception et la mise en œuvre de systèmes à base de connaissances.

quelques surprises. Par exemple, il existe des systèmes pour lesquels, quelle que soit l'interprétation valide retenue, il y aura toujours dans cette interprétation des énoncés vrais correspondant à des non-théorèmes!

### Logique propositionnelle

La logique propositionnelle est le système formel défini comme suit:

— le vocabulaire est  $\{\rightarrow, \neg, \langle \langle \rangle \rangle, \langle p \rangle, \langle q \rangle, \langle r \rangle, \dots\}$ ; les connectives  $\rightarrow$  et  $\neg$  expriment respectivement l'implication et la négation, les parenthèses permettent de regrouper des expressions, et les lettres propositionnelles  $p, q, r, \dots$  sont les variables (non nécessairement en nombre fini);  
— les mots (formules bien formées) sont le plus petit ensemble tel que:

- (i) toute variable est un mot,
- (ii) si  $A$  et  $B$  sont des mots,  $(A \rightarrow B)$ ,  $\neg A$ , et  $(A)$  sont des mots;
- les axiomes sont tous les mots de l'une des trois formes
- (SA1)  $(A \rightarrow (B \rightarrow A))$
- (SA2)  $(A \rightarrow (B \rightarrow C)) \rightarrow ((A \rightarrow B) \rightarrow (A \rightarrow C))$
- (SA3)  $(\neg B \rightarrow \neg A) \rightarrow (A \rightarrow B)$

où  $A, B$ , et  $C$  sont des mots quelconques;

— la règle de déduction unique, appelée *modus ponens*, est celle qui, à partir de deux mots de la forme  $A$  et  $(A \rightarrow B)$ , permet de déduire le mot  $B$ .

Les autres connectives habituelles telles que  $\wedge$  (et),  $\vee$  (ou), ou  $\leftrightarrow$  (équivalent à) sont en fait de simples extensions notationnelles.

Cette définition permet de démontrer un certain nombre de théorèmes tels que les trois «principes» d'aristote: l'identité  $(A \rightarrow A)$ , la non contradiction  $(\neg (A \wedge \neg A))$ , et le tiers exclus  $(A \vee \neg A)$ . Elle permet aussi de valider un certain nombre d'autres règles de déduction; c'est ainsi que peuvent être rigoureusement prouvées des propriétés bien connues, telles que la **commutativité** des opérateurs  $\wedge, \vee$ , et  $\leftrightarrow$ , l'équivalence entre  $A$  et  $\neg \neg A$ , la **distributivité** de  $\wedge$  par rapport à  $\vee$  et inversement, les lois de De Morgan, etc. Ainsi, la *logique propositionnelle* traduit bien, grâce à la règle d'inférence unique qu'est le *modus ponens* et à ses conséquences, les lois familières de la pensée déductive.

Une *tautologie* est un énoncé (un mot) auquel est associée la

valeur de vérité VRAI quelles que soient les valeurs de vérité associées aux différentes variables. Dans la logique propositionnelle, on peut démontrer que les tautologies sont des théorèmes et inversement. Un autre intérêt, très important, de la logique propositionnelle est ainsi sa *décidabilité*; en effet, le procédé connu de démonstration par table de vérité est, lui aussi, validé de façon rigoureuse; or, ce procédé constitue une procédure de décision.

### Logique des prédicats du premier ordre: limites de la logique.

La logique des prédicats du premier ordre est, elle aussi, un système formel. Il s'agit en fait d'une *extension de la logique propositionnelle*, née de la nécessité de représenter des énoncés tels que «les poissons sont des animaux» et des règles de déduction telle que le syllogisme. Cette extension est faite par l'introduction des *prédicats* (énoncés portant sur des variables et affectés d'une valeur de vérité) et des *quantificateurs* universel «A» et existentiel «E» (en fait, un seul quantificateur est nécessaire à la définition du système, l'autre est une extension notationnelle). Cette extension apporte ainsi à la logique une plus grande puissance expressive de représentation.

Comme avec la logique propositionnelle, de nombreux énoncés «évidents» sont en fait démontrés ou justifiés de façon rigoureusement formelle. Une autre propriété qui subsiste, elle aussi démontrable, est l'identité entre les tautologies et les théorèmes.

Mais, contrairement à ce qui se passe avec la logique propositionnelle, cette identité ne donne pas naissance à une procédure de décision. Au contraire, il se trouve que la logique des prédicats du premier ordre est un système *indécidable*: il n'est pas toujours possible de savoir si un mot est un théorème ou non (théorème de Church, 1936). D'autres théorèmes importants mettent en évidence les limites de la logique comme outil de représentation exclusif; par exemple, il existe des systèmes formels pour lesquels toute interprétation conduit à des énoncés vrais non démontrables (Tarski, 1935), et il existe des systèmes formels (l'arithmétique en

est un) pour lesquels certaines vérités sont inatteignables, c'est-à-dire qu'il n'existe ni une preuve conduisant à  $A$ , ni une preuve conduisant à  $\neg A$  (second théorème de Gödel, 1931).

### Unification et résolution: le langage Prolog

L'*unification* est un algorithme fondamental en intelligence artificielle qui permet d'appliquer un théorème à une expression. La raison d'être de cet algorithme est la suivante: étant donné un théorème  $(A \rightarrow B)$  et une expression  $E$ , il est intéressant de pouvoir rendre  $A$  et  $E$  complètement identiques, c'est-à-dire de les *unifier*, par une suite de substitutions de variables libres dans  $A$  et dans  $E$ . Pourquoi? Parce que la même suite de substitutions effectuée dans  $B$  donnera la nouvelle forme de  $E$  (application du *modus ponens*). Cet algorithme est extrêmement utile et puissant: il est mécanisable, il parcourt le théorème et l'expression en parallèle et les unifie à mesure, et surtout il n'effectue que les substitutions absolument nécessaires. On a même songé à l'utiliser comme procédure systématique de démonstration, mais on s'est heurté à l'inefficacité de «solutions» trop générales, en particulier au problème des boucles causées par la réactivation trop rapide de théorèmes «voisins», ou à celui de l'élimination des branches localement infinies de l'arbre de recherche.

Le principe de *résolution* est une règle de déduction déduite du *modus ponens*, mais plus générale. L'idée de base est la suivante: si  $(A \vee B)$  et  $(\neg A \vee C)$  sont des théorèmes, alors  $(B \vee C)$  en est un autre. Il s'ensuit que, pour montrer que  $(H \rightarrow C)$  — une hypothèse  $H$  permet de déduire une conclusion  $C$  — il suffit (et il peut être plus facile) de montrer que  $(H \vee \neg C)$  est contradictoire (un non-théorème), par exemple en exhibant un contre-exemple. Il se trouve qu'il est possible de transformer des expressions logiques arbitrairement complexes en une forme qui rend la résolution possible. Cette forme est une suite de *clauses* (mise sous forme normale conjonctive).

Cette représentation (utilisation de la mise sous forme clausale et du principe de résolution) est à la base du langage de programmation Prolog, bien connu depuis que les Japonais en ont fait le cheval

de bataille de leur projet national d'ordinateurs de cinquième génération. En effet, les faits et règles modélisant l'univers à décrire sont précisément donnés sous forme d'un type particulier de clauses, appelé les clauses de Horn. Mais le problème avec Prolog (du moins actuellement) est que, pour un jeu donné de clauses, soit la preuve sort très vite, soit elle ne sort jamais, par étouffement.

### Conclusion

En conclusion, la logique a un certain nombre d'avantages comme mécanisme de représentation des connaissances. Elle semble être une *manière naturelle* d'exprimer certaines notions, plus facile à reformuler, se prêtant bien à l'expérimentation. Elle est *précise*, puisqu'il existe des méthodes de détermination de la signification d'une expression formelle. Elle est *flexible* dans l'utilisation qui sera faite des axiomes. Enfin, elle est *modulaire*, dans la mesure où les assertions, (presque) indépendantes les unes des autres, peuvent facilement être ajoutées, modifiées, ou retirées, en cours d'évolution. En revanche, elle implique une séparation radicale entre les données et les traitements. C'est pourquoi il est souvent nécessaire, ou du moins opportun, de faire appel à d'autres techniques et mécanismes de représentation.

### Les règles de déduction

C'est au mécanisme des *règles de déduction* que les systèmes experts doivent leur popularité. Le formalisme ressemble beaucoup à celui de la logique, mais sans en avoir toujours la rigueur déductive; les règles se placent d'ailleurs d'emblée dans le monde de l'interprétation; le système formel sous-jacent est occulte, et c'est heureux, mais souvent ignoré, voire bousculé, par le développeur novice, et c'est dommage. Cette section veut donc mettre en lumière un certain nombre de points, destinés à compléter ou à préciser les connaissances que pourrait avoir le lecteur sur ce mécanisme.

### Modes d'invocation des règles

L'invocation des règles par les moteurs d'inférences (dont le

rôle est d'enchaîner les processus de déduction) se fait en chaînage avant, en chaînage arrière, ou en chaînage mixte. Les expressions «chaînage avant» et «chaînage arrière» donnent parfois lieu à des interprétations contradictoires, et il peut être prudent de les repreciser ici.

Un moteur fonctionne en chaînage avant lorsque les faits sur lesquels portent les déclencheurs des règles représentent des informations dont la valeur de vérité est déjà établie. L'algorithme pur est le suivant:

Tant qu'il y a des règles dont la partie condition est vérifiée par la situation courante:

- collecter les règles dont la condition est vérifiée (règles déclenchantes);
- mettre en œuvre une stratégie de *résolution de conflit* pour n'en sélectionner qu'une;
- l'activer (exécuter l'action correspondante), ce qui peut modifier la situation courante.

Un moteur fonctionne en chaînage arrière lorsque certains faits (problèmes à résoudre, hypothèses à vérifier, buts à atteindre) sont à établir ou à évaluer. L'algorithme pur est le suivant:

Tant qu'il y a des règles dont la partie droite est à établir dans la situation courante:

- collecter les règles dont la partie droite est à établir (règles déclenchantes);
- mettre en œuvre une stratégie de *résolution de conflit* pour n'en sélectionner qu'une;
- la déclencher (considérer la partie gauche comme étant à établir), ce qui modifie la situation à établir courante.

Notons qu'en chaînage arrière les règles sont déclenchées mais non exécutées (la partie gauche doit de toute manière être vérifiée pour que l'exécution soit possible): l'exécution consistera à «suivre le chemin tracé» par les invocations successives qui auront été faites au cours du chaînage arrière.

### États possibles d'une règle

Le point suivant concerne les différents états dans lesquels une règle est susceptible de se trouver à un moment quelconque du processus de résolution du problème par le système. Le premier état est celui où la règle est *inactive* ou inhibée (*disabled*), par exemple

hors contexte au moment ou pour le problème considéré. Lorsqu'elle n'est pas inhibée, une règle est *active*, ou en attente (*enabled*). Dans ce cas, elle peut en outre être soit *non déclenchable* ou non prête, parce que sa partie condition n'est pas satisfaite, soit *déclenchable* ou prête ou armée (*triggered*) dans le cas contraire. Enfin, une règle déclenchable peut néanmoins être *non déclenchée* (lorsqu'elle est en conflit avec d'autres règles déclenchantes); sinon elle est *déclenchée* ou «exécutée» (*fired*), c'est-à-dire que sa partie droite est exécutée (en chaînage avant) ou que sa partie gauche devient un but à atteindre (en chaînage arrière).

### Régimes de fonctionnement du moteur

Tout à fait indépendants des modes d'invocation des règles sont les stratégies, ou régimes de contrôle, suivies par les moteurs. On dit que le moteur fonctionne en *régime irrévocable* lorsque les effets de l'activation des règles choisies lors de l'étape de résolution des conflits ne sont jamais remis en cause. Cela est surtout le cas lorsque les règles du système ne sont pas mutuellement exclusives, c'est-à-dire que chacune ne peut qu'ajouter de l'information à celles qui sont déjà connues. À l'inverse, dans d'autres cas, l'activation d'une ou de plusieurs règles peut s'avérer infructueuse et plus tard être remise en cause; on a alors un processus de retour-arrière (*backtracking*), dont l'effet est de défaire toutes les conséquences des calculs effectués depuis le point de choix précédent. On dit alors que le moteur fonctionne en *régime par tentatives* ou avec retour arrière. Il ne faut naturellement pas confondre le retour arrière et le chaînage arrière.

### Utilisation de coefficients

Les systèmes fonctionnant en analyse (MYCIN, PROSPECTOR) opèrent dans des domaines où les conclusions sont rarement certaines. C'est pourquoi de nombreux systèmes et outils de développement permettent d'assortir aux règles et aux faits qu'elles manipulent, des coefficients qui seront interprétés selon le cas comme des certitudes, des possibilités, ou des vraisemblances. Ces coefficients, créés pour compenser une absence légitime de modélisation

des phénomènes représentés, *n'ont aucune valeur intrinsèque*; ils n'ont de signification que celle que leur donne l'expert et, par osmose, l'usager recevant du système les coefficients de l'expert. Ces coefficients expriment des contraintes (incertitudes, etc.) sur les faits et règles qu'ils affectent. C'est pourquoi il existe différentes techniques de calcul sur ces coefficients dont aucune n'est a priori meilleure qu'une autre, ces techniques étant de toute manière arbitraires. Elles sont d'inspiration booléenne, probabiliste, décisionnelle ou autre, ou même des combinaisons de ces différentes approches.

#### Explication du raisonnement

Enfin, un attrait des systèmes à base de règles est leur capacité potentielle à expliquer leur propre raisonnement. En effet, comment est utilisé un fait s'explique par référence à la règle ayant ce fait en partie gauche (réponse: «pour montrer que...» partie droite), tandis que les questions pourquoi s'expliquent par référence à la règle ayant le fait concerné en partie droite (réponse: «parce que...» partie gauche). Nous disons ici *capacité potentielle*, parce que l'implantation effective de cette possibilité nécessite en général la programmation d'une interface, et parfois l'adjonction aux règles mécanisées d'une traduction en langue naturelle. En outre, cette capacité peut n'être que *partielle*, si les règles constituent des étapes de raisonnement trop fines par rapport au type de réponse attendu.

#### Conclusion

Les avantages des systèmes à base de règles sont:

- *l'uniformité de la représentation* imposée par la formulation;
- *la modularité*, à la fois par la possibilité de croissance incrémentale de la connaissance, presque indépendance de règles, et par l'absence d'effet direct sur le fonctionnement du système, moteur indépendant des règles;
- *l'interaction à la demande*; la connaissance n'étant pas tributaire du programmeur, on la met où et quand il faut, ce qui permet une grande *flexibilité* pour le traitement de connaissances fluctuantes, incertaines, ou incomplètes.

Dans un tel système, il est cependant nécessaire de focaliser

son attention sur une bonne expression des contraintes.

En revanche, les inconvénients de ces systèmes sont de deux types:

- *l'inefficacité*, qui se traduit par un «overhead» élevé dans la résolution, la difficulté à avoir une réaction intelligente à une séquence prédéterminée de situations, et l'impossibilité d'obtenir des étapes plus grandes dans le raisonnement,

- *l'opacité du raisonnement*: difficulté de comprendre la démarche suivie, même si le système explique ses pas de raisonnement, et difficulté d'expression des algorithmes pouvant compenser la facilité d'expression des spécifications.

Les remèdes à cette situation résideraient dans l'ajout de *méta-règles*, expression de la méta-connaissance, d'*attachements procéduraux*, et de *structures de contrôle plus élaborées*.

#### Les réseaux sémantiques

Les deux autres mécanismes que nous présenterons maintenant

sont de nature essentiellement graphique. À ce titre, il s'agit plutôt de mécanismes de *représentation conceptuelle* que de mécanismes directement mécanisables, à l'inverse de la logique ou des règles de déduction. Le premier d'entre eux est constitué par les *réseaux sémantiques*, introduits pour la première par Quillian (1968) dans des recherches en psychologie.

#### Principe

Cette représentation est essentiellement un *graphe étiqueté*, dans lequel les *nœuds* représentent les objets, concepts, ou situations manipulés, tandis que les propriétés de ces objets, ainsi que les liens et les relations entre eux, sont représentés par les *arcs* reliant ces nœuds. Outre la psychologie, cette représentation a été utilisée en traduction automatique (Schank, 1972), et plus récemment en informatique, comme représentation fonctionnelle (pragmatique) de la variété des types de savoir nécessaires aux systèmes informatisés.

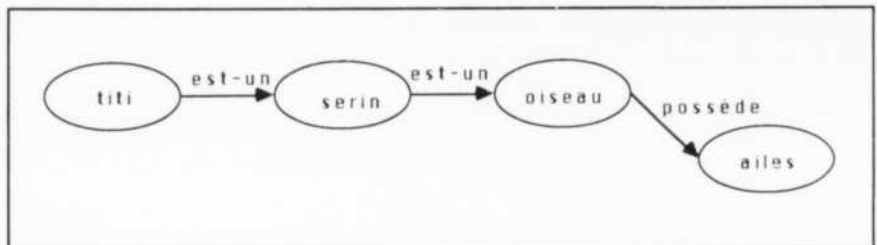


Figure 1: Le lien «est-un».

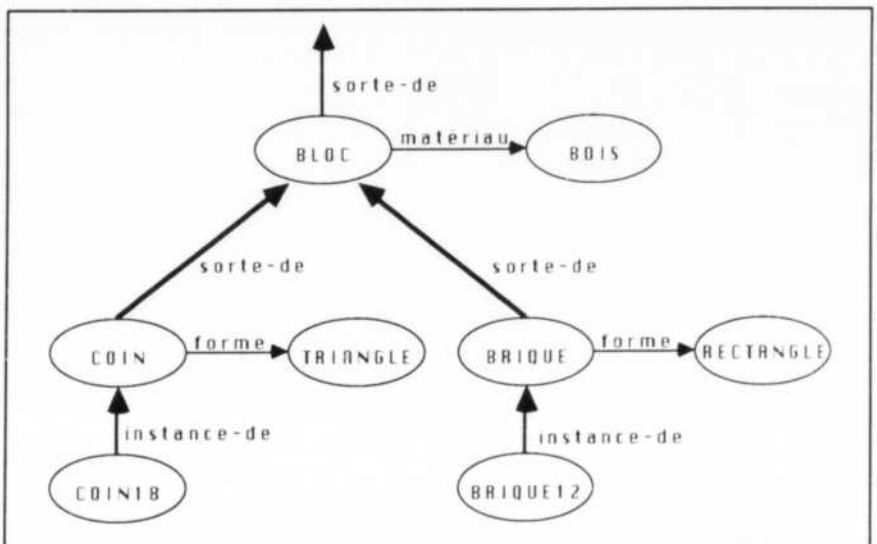


Figure 2: Héritage direct.

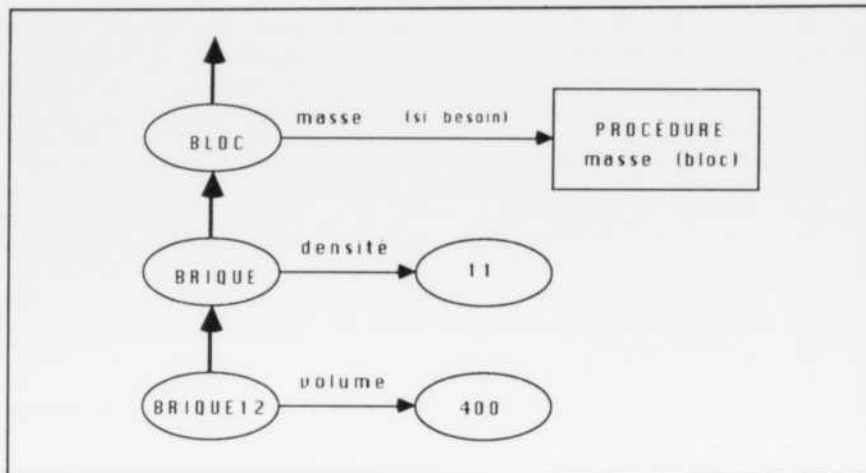


Figure 3: Démons et héritage.

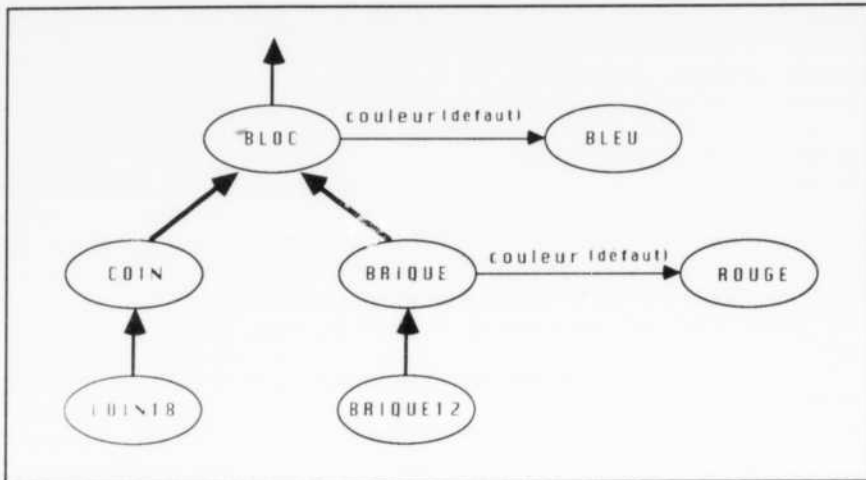


Figure 4: Valeur par défaut et héritage.

L'intérêt premier des réseaux sémantiques est l'héritage de propriétés, grâce aux liens *est-un* (en anglais: *is-a*). Mais avant de préciser ce point plus avant, notons tout de suite l'ambiguïté de cette étiquette, que nous remplacerons dorénavant selon le cas par l'un des noms plus explicites *instance-de* et *sorte-de*.

**Héritage de propriétés**

Pour fixer la terminologie de ce qui suit, appelons *valeur* d'un arc son nœud extrémité, et *cas* (slot) d'un nœud chacun des noms d'arcs susceptibles d'en partir. Par exemple, à la figure 1, la valeur de *possède* est AILES, tandis que *possède* est un des «slots» de OISEAU; nous écrirons dans ce cas:

*possède* (OISEAU) = AILES

Le lecteur aura immédiatement vu le parallèle possible avec une notation fonctionnelle, ou encore avec

la logique des prédicats où on aurait codé:

*possède* (OISEAU, AILES).

La logique constitue ainsi un moyen privilégié d'implantation des réseaux.

Dans le réseau de la figure 2, on peut déduire des informations indiquées que:

*forme* (BRIQUE 12) = RECTANGLE, ou encore:

*matériau* (COIN 18) = *matériau* (COIN) = BOIS.

Ces déductions se font en appliquant l'algorithme suivant de calcul de valeur de *s(N)*, où *s* est un «slot» et *N* un nœud:

1. liste ← (N, nœuds de instance-de (N))
2. Répéter
  - \* Soit *x* le premier élément de liste.
  - \* S'il y a une valeur (directe) dans *s(x)* alors une valeur a été trouvée (par valeur directe)
  - sinon ← retirer le premier élément de liste

— ajouter en fin de liste tous les nœuds de *sorte-de* (x).

finsi.

jusqu'à ce que liste = 0, ou qu'une valeur ait été trouvée.

3. Si une valeur a été trouvée (par valeur directe) alors cette valeur → *s(N)* sinon échec

**Démons et valeurs par défaut**

L'algorithme précédent peut être étendu à des cas plus particuliers d'obtention de la valeur d'un «slot», avec ou sans héritage d'ailleurs. Nous citerons les deux procédés indirects les plus importants: les attributions de valeurs ou de propriétés par défaut ou par démon.

Un *démon* est une procédure pouvant être invoquée *en cas de besoin* (c'est là l'origine de ce nom étrange: la procédure ne s'exécute que si on en a besoin) pour calculer la valeur d'un slot à partir d'informations existant, ou susceptibles d'exister, par ailleurs. Par exemple, dans la figure 3, la procédure *masse (bloc)* est un démon appelé pour calculer la masse d'un bloc quelconque, en faisant le produit de son volume et de sa densité; par héritage, ce démon pourra calculer:

$$masse (BRIQUE 12) = 400 \times 11 = 4400.$$

L'algorithme d'obtention de *s(N)* par démon est le même que ci-dessus, au remplacement près (à l'étape 2.) de «s'il y a une valeur (directe) dans *s(X)*» par «si il y a un démon dans *s(X)* et que ce démon fonctionne».

Une *valeur par défaut* est destinée à prendre en compte une propriété probable, mais non certaine; cette valeur est donc réputée vraie *sauf indication contraire*. Par exemple, on pourra déduire des informations de la figure 4 que *couleur* (BRIQUE 12) = ROUGE, ou encore *couleur* (COIN 18) = *couleur* (COIN) = BLEU.

L'algorithme d'obtention de *s(N)* par défaut est encore le même, au remplacement près (à l'étape 2.) de «s'il y a une valeur (directe) dans *s(X)*» par «si il y a une valeur par défaut dans *s(X)*».

Les trois types d'héritage peuvent être combinés. Dans l'*héritage en N* (le nom vient de la forme de la lettre N), on progresse d'abord verticalement (en conservant le type de valeur: directe, ou par démon, ou par défaut), ensuite

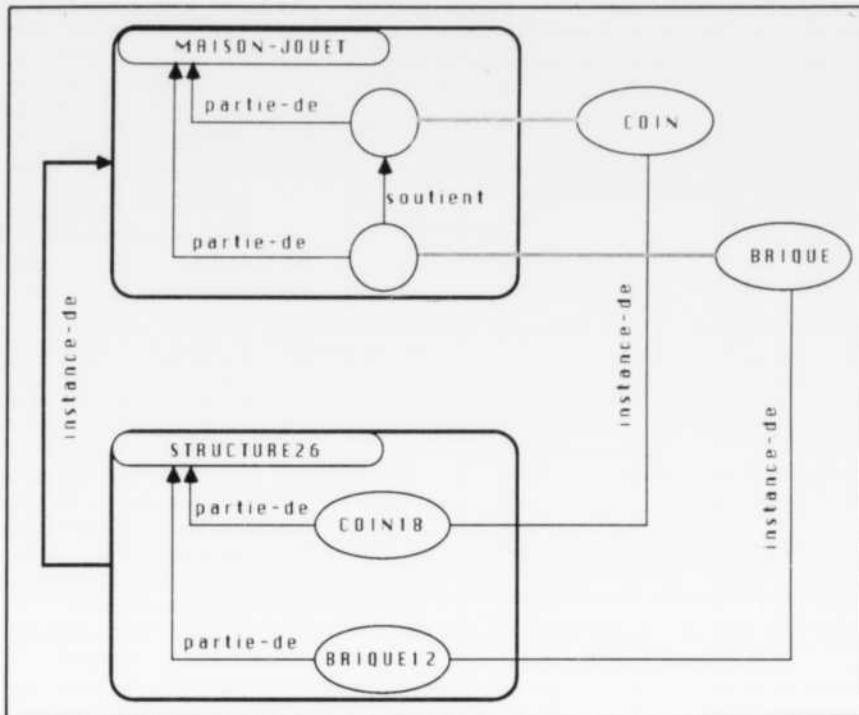


Figure 5: Héritage de parties.

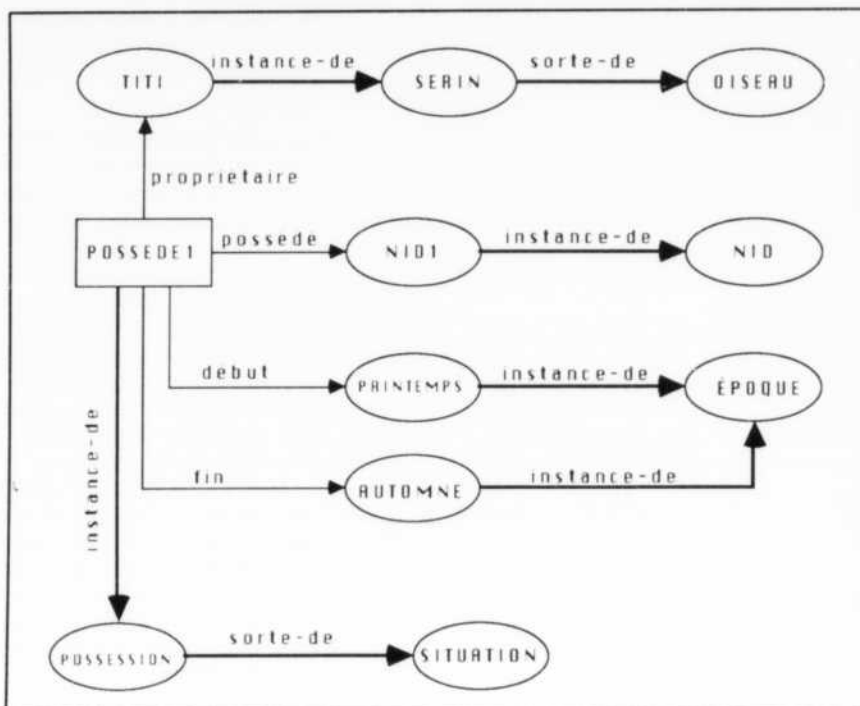


Figure 6: Extension des types de nœuds et d'arcs: «Titi possède un nid du printemps à l'automne».

horizontalement pour changer de type. Dans l'héritage en Z, on progresse d'abord horizontalement (au même niveau, en changeant de type), puis verticalement pour progresser d'un niveau. Selon le cas, on choisira l'héritage en N, l'héritage en Z, ou un type mixte. Le choix dépend essentiellement du

domaine, et donc de la connaissance qu'on a de celui-ci.

#### Héritage de parties

Les mécanismes d'héritage peuvent aussi être utilisés pour faire des déductions sur la nature ou les propriétés des différents

constituants d'un objet (ou de certains de ces constituants). Par exemple, les informations de la figure 5 permettent de déduire *soutient* (BRIQUE 12) = COIN 18. L'algorithme effectuant cette déduction est différent, mais similaire à ceux vus jusqu'ici.

#### Problèmes posés par l'héritage dans les réseaux

Les réseaux sémantiques ont été si populaires que les chercheurs et les développeurs se sont empressés d'étendre les types de nœuds et d'arcs, afin de prendre en compte des connaissances de plus en plus complexes. C'est ainsi qu'on a d'abord quitté le monde des attributs, relations et propriétés d'objets pour inclure des relations plus abstraites comme la possession, puis des nœuds exprimant de telles abstractions, et même des taxinomies sur ces abstractions (voir figure 6). Cependant, de telles extensions « incontrôlées » ont amené des problèmes dans la prise en compte de l'héritage. Ainsi, dans la figure 7, il est maintenant évident que, s'il est légitime de conclure que titi a des ailes, c'est bien à tort qu'on déduirait qu'il est étudié par les naturalistes! Un effort théorique était donc nécessaire (le problème a été radicalement posé par [Wood 75]), et est encore actuellement l'objet de recherches.

#### Les cadres et les scénarios

Les cadres (frames) et les scénarios prototypes (scripts) sont les mécanismes graphiques de représentation auxquels nous allons maintenant nous intéresser. Les premiers ont été introduits par Marvin Minsky en 1975 en intelligence artificielle, et les seconds par Roger Schank et R. Abelson en 1977 dans le traitement de la langue naturelle. Conceptuellement, ils prennent en compte la même connaissance que les réseaux sémantiques, mais avec une plus grande structuration de cette connaissance, ce qui permet une certaine *prévision du plausible*. Ces prévisions se font grâce à la description d'un objet, d'un acte, ou d'un événement type (un stéréotype).

#### Principe

Lorsque un objet est représenté par un cadre, ses propriétés sont représentées comme les va-

leurs d'un *slot*, qui peut contenir une ou plusieurs valeurs, aucune, directe ou par défaut, une procédure (démon), faisant appel à d'au-

tres *slots*, du même cadre ou d'un autre cadre, une combinaison quelconque de tout cela, ou même un autre cadre. Cette représentation

est donc très riche. Le problème, dans un cas concret donné, sera évidemment de tirer parti à bon escient de cette richesse (problème conceptuel), et d'implanter la structure correspondante dans la machine (problème d'implantation).

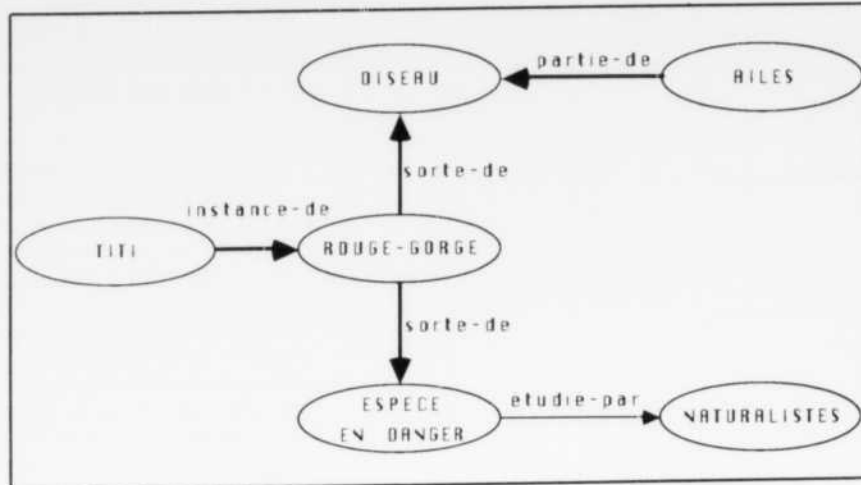


Figure 7: Un «héritage» indésirable! Titi n'est pas étudié par les naturalistes

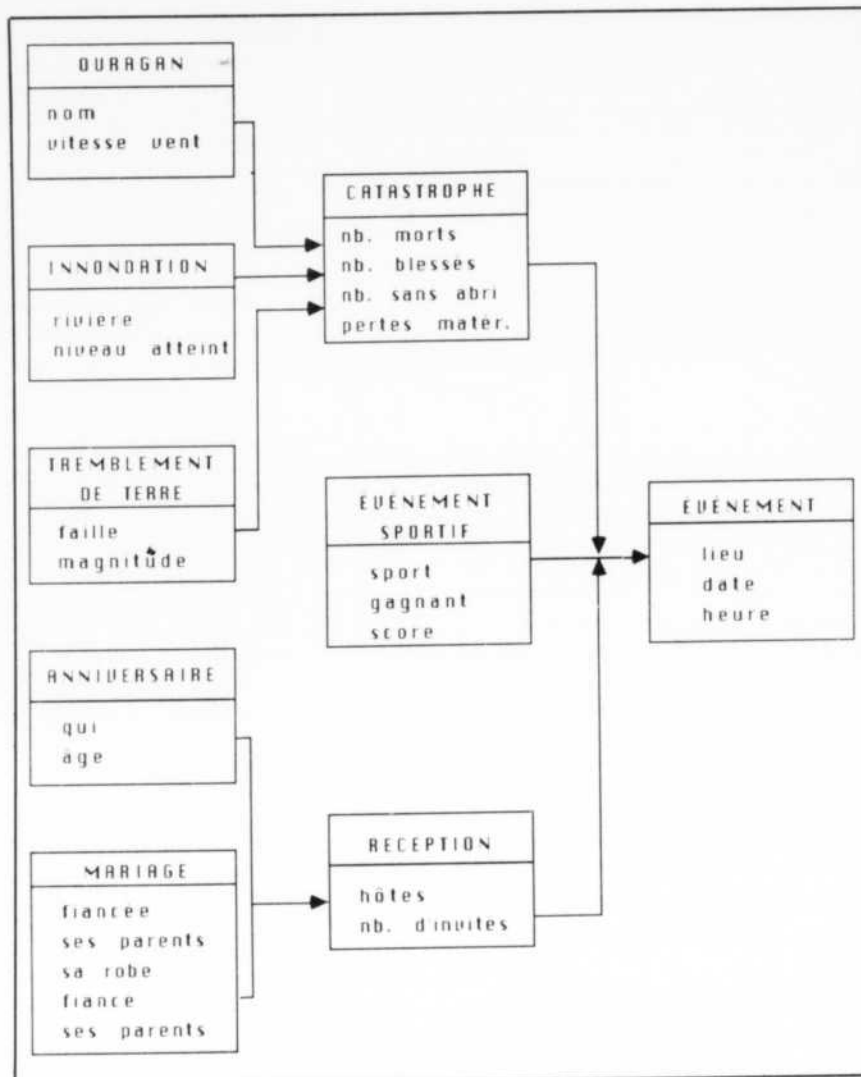


Figure 8: Frames et héritage des slots

### Cadres et héritage

D'abord, les cadres (*frames*) permettent de faire jouer l'héritage, tout comme les réseaux sémantiques: les propriétés héritées d'une super-classe sont transmises à l'objet, si l'opération est valide, par héritage de ses *slots*. De manière générale, les *slots* vraisemblables d'un *frame* sont l'union des *slots* des *frames* antécédents par les liens *sorte-de*. Ainsi, pour prendre un exemple emprunté à l'environnement, un *frame* TREMBLEMENT-DE-TERRE aura (figure 8):

- ses *slots* spécifiques *faille* et *magnitude*,
- les *slots* *nb-morts*, *nb-blessés*, et *pertes-matér.* hérités du *frame* CATASTROPHE,
- les *slots* *lieu*, *date* et *heure* par héritage du *frame* ÉVÉNEMENT.

Les valeurs de ces *slots* sont utilisées et créées comme pour les réseaux.

### Utilisation des frames

En analyse, les techniques de remplissage des *slots* sont spécifiques au domaine considéré. Par exemple, si les sources à dépouiller sont des manchettes de journal, ces techniques résulteront de l'analyse de manchettes typiques; ce type de texte étant relativement simple, les techniques de remplissage le seront aussi, et pourront par exemple ressembler à celles de la figure 9.

En synthèse, le jeu consiste par exemple à faire un résumé en langue naturelle de la situation exprimée par un *frame* donné, au moyen d'un texte type donnant leur sens aux valeurs des *slots*. Un exemple de résumé d'une annonce de tremblement de terre pourra ainsi être le suivant:

«Un tremblement de terre s'est produit [«en» ou «à», selon le type de lieu] [valeur du slot *lieu*] [valeur du slot *date*] causant [valeur du slot *nb-morts*] morts et [valeur du slot *pertes-matér.*] de dégâts matériels. La magnitude était de [valeur du slot *magnitude*] degrés sur l'échelle de Richter, et la faille impliquée était celle de [valeur du slot *faille*].»

Naturellement, des techniques aussi simples peuvent très facilement être mises en défaut en

**Données numériques:**  
*magnitude* → flottant entre 1 et 10.  
*nb-orts* → entier près de tue ou mort...  
*pertes* → entier contre \$ ou dollars  
*date* → chercher jours de la semaine, hier, aujourd'hui, ...  
*heure* → nombre suivi de ou comportant h ou heures

**Données non numériques:**  
*faulle* → nom propre près de faill... ou faute  
*lieu* → nom propre de lieu

Figure 9: Exemple de techniques de remplissage de «slots» à partir d'un texte en langue naturelle

leur soumettant des textes décrivant tout autre chose que des tremblements de terre, pour peu que les critères indiqués à la figure 9 soient satisfaits.

Un exemple de *frame* est donné figure 10 pour mettre en évidence la richesse potentielle du procédé. On remarquera par exemple les différentes facettes de chaque *slot*, les différents types de démons utilisés, et même la présence d'un scénario («script lave-vaisselle») dans la liste des valeurs possibles d'un *slot*.

**Conclusion sur les représentants graphiques**

Les *graphes conceptuels*, introduits relativement récemment, sont une technique très formalisée de représentation, destinée à éviter les problèmes évoqués précédemment. Ils sont un peu aux représentations graphiques ce que la logique formelle est aux règles de déduction. Dans ce formalisme, le réseau sémantique est présenté en quelque sorte comme l'environnement du graphe conceptuel traité, et n'est pas pris en compte dans ce traitement, à cause de l'énorme masse de connaissances (générales de «sens commun», donc non spécifiques au problème à résoudre: perceptions, émotions, mots, règles de grammaire, épisodes, définitions de types, procédures, etc., associés aux objets du graphe) qui y sont contenues. Ce formalisme définit des opérations formelles sur les graphes conceptuels: restriction, jointure, simplification, spécification, généralisation, expansion de concepts définis par des graphes conceptuels. Le lecteur intéressé consultera avec profit [Sowa 84].

En pratique, des travaux ont abouti et aboutissent encore, sur

*Spécifique de:* Établissement-commercial

*Types:*  
 valeurs possibles: fast-food, café, on s'assoit, avec placeuse  
 défaut: avec placeuse  
 si-besoin: comptoir orange → fast-food  
 plateaux → cafétéria  
 panneaux demandant d'attendre → avec placeuse  
 avec réservation → avec placeuse  
 sinon → on s'assoit

*Lieu:*  
 valeurs possibles: (une adresse)  
 si-besoin: (cf. menu)

*Nom:*  
 si-besoin: (regarder le menu)

*Type-de-Nourriture:*  
 valeurs possibles: hamburger, chinoise, française, fruits de mer, ...  
 défaut: américaine (ou canadienne)  
 si fourni: m. à j. *Alternatives*

*Heures de service:*  
 valeurs possibles: une heure du jour  
 défaut: tous les soirs sauf Lundi

*Paiement par:*  
 valeurs possibles: espèces, carte-crédit, chèque, script *lave-vaisselle*

*Séq. d'événements:*  
 défaut: (script *miam-restaurant*)

*Alternatives:*  
 valeurs possibles: tous les restaurants ayant la même valeur de *type-de-nourriture*  
 si-besoin: (chercher tous les restaurants avec le même type de nourriture)

Figure 10: Exemple de cadre complet: le «frame» RESTAURANT

	PROGRAMME CLASSIQUE	SYSTÈME À BASE DE CONNAISSANCES
UTILISATION DES DONNÉES	explicitement spécifiée au coup par coup par le programmeur	invocation à la demande de manière associative
<b>L'ingénieur de la connaissance (Feigenbaum 77) transforme une grande masse de connaissances en faits et règles calculables</b>		
ADAPTATION DU PROBLÈME AU CALCUL	par l'analyste-Système	par l'ingénieur de la connaissance
BUT DE L'ANALYSE	procédures codées	règles et faits
ÉCRITURE DE PROGRAMMES	un pour chaque, pour chaque application	le(s) même(s)* pour toutes les applications
DÉVELOPPEMENT D'APPLICATIONS	par un prorammeur d'applications	par un expert du domaine, non-programmeur
* Moteur d'Inférences, module de diagonale en LN, SGBD, aide à l'acquisition, etc...		

Figure 11 Développement composés d'un programme classique et d'un système à base de connaissances

des domaines particuliers avec des représentations ad-hoc, grâce à une bonne adaptation de celles-ci à ceux-là. En théorie, beaucoup a été fait aussi, sur la formalisation, sur la conception, et sur les processus liés aux activités mentales.

Il reste encore beaucoup à faire, mais il y a beaucoup à en espérer.

**Conclusion**

Cet article aura peut-être déçu un certain nombre de lec-

teurs initialement très enthousiastes; si tel est le cas, c'est dommage, car ce n'était pas le but poursuivi. En revanche, s'il a amené des septiques à admettre que les « systèmes experts » ne sont pas la panacée miracle annoncée par certains, c'est moins mal. L'idéal serait que le lecteur retienne les deux idées fondamentales suivantes.

La première idée est que la réalisation d'un bon système à base de connaissances demande un effort important de modélisation préalable, à la fois des types de connaissance à mettre en œuvre et des représentations et implantations à adopter. Les types de connaissances incluent: des objets de base, des assertions et définitions sur ces objets de base, des concepts, des relations, des théorèmes et règles de réécriture, des algorithmes de résolution pour certaines tâches, des stratégies et heuristiques, et de la méta-connaissance. Les différents types de représentation incluent, en

allant grossièrement du plus procédural (le plus fermé quant à la souplesse d'utilisation) au plus déclaratif (le plus ouvert): l'automate fini, la procédure (scénario figé), le script (scénario stéréotype), le réseau sémantique, le cadre prototype, les graphes et réseaux conceptuels, les spécifications formelles, le calcul des prédicats (ou plus généralement la logique formelle), les théorèmes et règles de réécriture, les règles de production, et les phrases en langue naturelle.

La seconde idée est que, une fois cette modélisation effectuée, la possibilité de séparer les processus d'inférence de la connaissance sur laquelle ils s'appliquent (controverse déclaratif-procédural), donne aux systèmes à base de connaissances une souplesse extraordinaire, à la fois dans leur utilisation et dans les différentes phases de leur développement. Les différentes manifestations de cette souplesse sont rappelées figure 11.

Références

BARR, Avron & Edward A. Feigenbaum (ed.), *The Handbook of Artificial Intelligence*, vol. 1, William Kaufmann Inc. (Los Altos, Calif.), 1982 (surtout le chapitre III sur la représentation des connaissances).

DELAHAYE, Jean-Paul, *Outils logiques pour l'Intelligence Artificielle*, Editions Eyrolles (Paris, France), 1986.

FARRENY, Henry, *Les systèmes experts — Principes et exemples*, CEPADUES Editions (Toulouse, France), 1985.

LAURIÈRE, Jean-Louis, « Représentation et utilisation des connaissances — Première partie: les systèmes experts », *Technique et Science Informatique*, Vol. 1, n° 1, 1982, p. 25-42.

LAURIÈRE, Jean-Louis, « Représentation et utilisation des connaissances — Première partie: représentation des connaissances », *Technique et Science Informatique*, vol. 1, n° 2, 1982, p. 109-133.

LAURIÈRE, Jean-Louis, *Intelligence Artificielle — résolution de problèmes par l'homme et la machine*, Editions Eyrolles (Paris, France), 1986.

SOWA, John F., *Conceptual Structures — Information Processing in Mind and Machine*, Addison-Wesley Publ. (Reading, Mass.), 1984.

WINSTON, Patrick Henry, *Artificial Intelligence, 2nd edition*, Addison-Wesley Publ. (Reading, Mass.), July 1984.

WOODS, William A., « What's in a link: foundations for semantic networks » in *Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science* (Daniel Bobrow & Allan Collins, ed.), Academic Press (New-York, New York), 1975, p. 35-82.

Rectificatif

Dans le précédent numéro (mars-avril 1987) à la page 3, l'ordre des deux photos qui y apparaissent a été interverti, soit celle qui représente M. Beaudoin qui aurait dû être au bas de la page et l'autre qui représente M. Coulombe et qui aurait dû être au haut de la page. La direction de la revue s'en excuse.

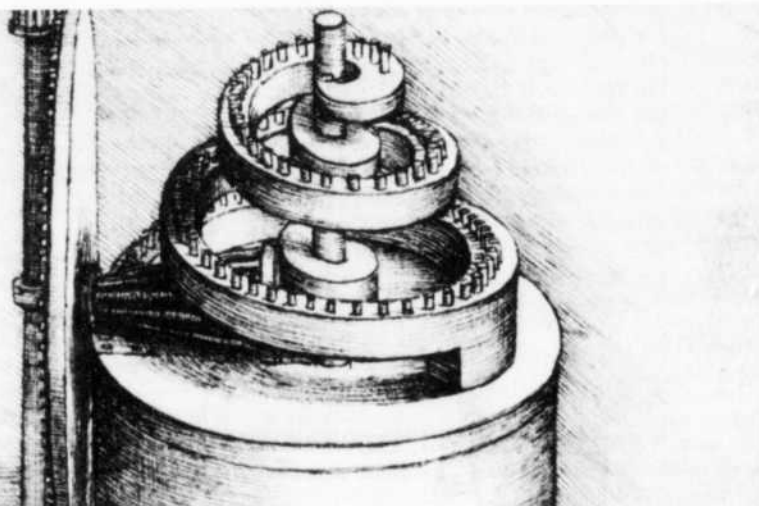
Un ouvrage de qualité

À l'occasion de l'exposition de Léonard de Vinci (du 22 mai au 8 novembre 1987) un ouvrage de qualité vient d'être publié « Léonard de Vinci, ingénieur et architecte ». Cet ouvrage est la seule publication qui présente les œuvres exposées au Musée des beaux-arts de Montréal. Ces œuvres y sont illustrées, commentées et placées dans le contexte de la Renaissance italienne.

Les auteurs sont reconnus comme les dix plus éminents spécialistes de Léonard. Ils sont italiens, français, britanniques et américains. De plus, le livre est produit à Montréal; la maquette a été conçue à Paris et l'impression et la reliure ont été exécutées à Florence et Turin. Il s'agit donc d'un ouvrage d'envergure internationale (Le livre est vendu à la Boutique du Musée des beaux-arts de Montréal ainsi que dans les bonnes librairies).

répertoire  
des  
annonces

Beaulier Inc.	C2
Coopoly	C2
Conseil Canadien des Normes	C3
Conseil National de Recherches	27
Dufresne, Farley, Samson, Brillon	C2
Gestech-Art	C3
La Rapière	C3
Lavalin Inc.	C3
Les Lab. Ind. et Commerc.	27
Richard Sauvé assurance	C3
SIAL	C2
Canadian Gas Association	C4



Étude de mécanisme, de Léonard de Vinci. Cette photo de la Biblioteca Nacional de Madrid est celle que l'on retrouve sur la jaquette du catalogue Léonard de Vinci, ingénieur et architecte.

## Une démarche pour la conception de systèmes experts

Bernard Moulin

*Dans cet article, nous présentons les principales caractéristiques d'un projet de conception de systèmes à base de connaissances, de l'acquisition des connaissances au développement par prototypage, de la nécessaire implication des experts et des usagers à l'utilisation des environnements de systèmes experts. Nous décrivons une méthode qui intègre dans le développement de systèmes, à la fois les aspects liés à la construction de bases de connaissances et les aspects concernant la conception de bases de données.*

### Introduction:

En 1977, E. Feigenbaum introduisait le concept de *l'ingénierie du savoir*: (knowledge engineering) une spécialité qui met en œuvre les outils et les techniques développés en intelligence artificielle pour résoudre des problèmes d'application difficiles qui nécessitent les connaissances d'un expert (3).

Contrairement aux projets de conception de bases de données, pour lesquels les structures de données et les tâches à accomplir peuvent être spécifiées avec précision, les applications en ingénierie du savoir s'adressent à des domaines d'activité moins bien structurés: souvent on remarque que les experts agissent dans de nombreuses circonstances en se basant sur leur intuition et leur expérience, et non sur un raisonnement conscient et structuré.

M. Bernard Moulin est professeur au département d'informatique de l'Université Laval. M. Moulin est diplômé de l'École d'Ingénieurs Centrale de Lyon, il est docteur-ingénieur ès mathématiques appliquées et détient une maîtrise en sciences économiques. Ses domaines d'expertise touchent à la conception de bases de données, à la modélisation des systèmes d'information, aux méthodologies de conception de systèmes, à la gestion de projets, à la représentation des connaissances et à l'ingénierie du savoir (intelligence artificielle). Il dirige plusieurs projets de recherche reliés à ces domaines, dans lesquels il a réalisé plusieurs contrats de formation ou d'expertise-conseil. Il est membre du groupe «Design and Evaluation in Information Systems» de l'International Federation of Information Processing.

Aussi, la démarche de conception de systèmes experts préconisée par la plupart des auteurs, correspond essentiellement au développement «incrémental» des systèmes à base de connaissances, par la mise au point de prototypes qui permettent de raffiner la structure des connaissances utilisées et de formaliser progressivement le raisonnement mis en œuvre par les experts pour la résolution des problèmes (1), (2).

Au cours de l'époque héroïque des années 70, les équipes de conception devaient bâtir leurs prototypes, non seulement en constituant la base de connaissances, mais aussi en réalisant le moteur d'inférence et les utilitaires d'acquisition et de validation des connaissances. Les projets pouvaient durer plusieurs années et entraîner des investissements très importants, qui n'ont pu être effectués que dans quelques laboratoires de recherche universitaires ou industriels.

Au cours de la décennie passée, la technologie a évolué rapidement pour mettre sur le marché des outils et des logiciels de développement de systèmes experts qui, jusqu'à la fin des années 70, étaient restés dans les laboratoires. Une entreprise peut, maintenant, développer un système expert en concentrant ses efforts sur la mise au point de la base de connaissances et des utilitaires spécifiques de son application, en sélectionnant sur le marché les outils de développement appropriés et en faisant référence à l'expérience qu'ont pu acquérir d'autres équipes dans des projets similaires.

C'est suivant cette perspective que nous décrivons dans cet article une démarche de conception de systèmes à base de connaissances (SBC). Dans cette présentation nous nous référons aux définitions, aux concepts introduits dans (4).

On peut relever quelques caractéristiques des projets de conception des systèmes à base de connaissances («SBC»), qui sont déterminées par la nature des applications en ingénierie du savoir, la diversité des intervenants et l'évolution des outils de conception de systèmes experts:

— l'exploration par la mise au point d'une maquette;

— l'utilisation de logiciels spécialisés d'aide à la conception;

— la nécessité d'impliquer fortement les intervenants participant au projet;

— le développement des systèmes par raffinements successifs en mettant très tôt l'utilisateur en contact avec le prototype (approche par prototypage).

### De l'étude d'orientation à la mise au point d'une maquette

En général le projet démarre à la suite d'une demande émanant d'une entreprise qui a identifié une situation problématique ou certaines activités, qu'elle cherche à améliorer par une solution informatique pour laquelle la technologie des systèmes experts lui semble appropriée. On rencontre des situations très diverses qui peuvent relever aussi bien de la technologie des systèmes experts que de celle des bases de données. Aussi il est fortement recommandé de clarifier la demande dans le cadre d'une **étude d'orientation**, en analysant le contexte organisationnel auquel s'applique la demande, afin de déterminer les caractéristiques du projet envisagé. Nous renvoyons le lecteur à la catégorisation des types d'applications que l'on peut généralement rencontrer dans une entreprise («Déterminer si un projet nécessite la conception d'un SBC» dans (4)).

Certains cas ne relèvent pas de l'utilisation de la technologie des systèmes experts, mais plutôt de la mise en place d'une base de données exploitée par un langage orienté vers les usagers (de 4<sup>ème</sup> génération), qui peut offrir des interfaces de manipulation de données en langue «pseudo-naturelle» (sous-ensemble simplifié de l'anglais ou du français). On rencontre habituellement cette situation de conception lorsque le système envisagé doit permettre aux usagers de manipuler facilement des données à partir desquelles ils doivent faire des analyses et élaborer des rapports. On peut alors montrer au client que l'expertise se situe au niveau des tâches d'analyse qu'effectuent les usagers, mais que le système dont ils ont réellement besoin, doit leur per-

#### Évolution du matériel et du logiciel pour la conception de systèmes experts (1), (6)

Au début des années 70 les premiers systèmes experts étaient habituellement développés dans un langage de programmation symbolique (Lisp par exemple), pour simuler le comportement d'experts dans des domaines spécialisés: par exemple MYCIN aidait les médecins à sélectionner une thérapie pour traiter certaines maladies infectieuses, DENDRAL permettait de déterminer la structure moléculaire de composés inconnus à partir de mesures spectrographiques etc.

Le mécanisme d'inférence et les règles spécifiques du domaine considéré étaient intimement imbriqués dans le programme.

Plus tard les chercheurs découvraient que les systèmes experts spécialisés pouvaient être généralisés pour résoudre certaines catégories de problèmes (par exemple le diagnostic), à condition de séparer la stratégie de résolution des problèmes (mécanisme d'inférence) des règles spécifiques au domaine d'application concerné (la base de connaissances). On développa alors des systèmes experts indépendants du domaine de connaissances («skeletal systems»), tels que EMYCIN qui permet de concevoir des systèmes experts pour supporter des tâches de diagnostic.

Au début des années 80 apparaissaient les premiers langages de représentation des connaissances («general purpose representation languages»), langages de programmation de haut niveau développés spécialement pour l'ingénierie de la connaissance. Ils présentent moins de contraintes que les systèmes précédents («skeletal systems») et offrent habituellement plusieurs types de stratégies de contrôle des mécanismes d'inférence (chaînage-avant, chaînage-arrière etc.), plusieurs modes de représentation des connaissances (règles de production, description des connaissances par «frames», représentation procédurales etc.), et divers utilitaires pour la manipulation de la base de connaissances, le développement d'interfaces conviviales, des mécanismes d'explication etc. Des outils tels que OPS 5, KEE, ART peuvent être utilisés pour développer une large gamme de systèmes à base de connaissances, couvrant des tâches expertes de nature très différente.

Le marché actuel offre aux développeurs plus de flexibilité quant au choix du matériel et du logiciel. Sur tous les types de machines on dispose de langages de programmation symbolique (Lisp ou Prolog) assortis d'utilitaires de développement (aide à la mise au point, interfaçage etc.) pour un coût en général inférieur à 1000 \$.

Au cours des deux dernières années divers environnements de conception de systèmes experts («experts system shell») sont apparus sur micro-ordinateurs 16 bits (IBM AT, Apple Macintosh). Ils sont en général destinés au développement de certaines catégories de systèmes experts (diagnostic, consultation etc.) et s'inspirent souvent du modèle de EMYCIN. Ils permettent habituellement de développer de petits systèmes experts (comportant quelques centaines de règles), et sont disponibles pour un coût inférieur à 5000 \$. On trouve dans cette catégorie des outils tels que MI, ESP/ADVBOR, INBIGHT, NEXPERT etc.

Des environnements de conception de systèmes experts plus sophistiqués et des langages de représentation des connaissances sont disponibles sur les stations de travail avancées, sur certains mini-ordinateurs et sur les machines-Lisp pour des coûts variant entre 5000 \$ et 50 000 \$. On trouve dans cette catégorie des outils tels que EXPERT, OPS 5, KEE, ART, LOOPS, S 1 etc.

Le choix du matériel est déterminé par l'envergure des systèmes à développer. Les petits systèmes à base de connaissances (de quelques centaines de règles), peuvent être implantés sur des micro-ordinateurs 16 bits. Les stations de travail («workstations» du type Sun, Apollo etc.) que l'on peut utiliser en réseau (au coût d'environ 20 000 \$ pour un poste de travail, 50 000 \$ pour un serveur de fichiers) permettent de développer des systèmes experts de plusieurs milliers de règles et d'utiliser des langages de représentation des connaissances sophistiqués. Les machines-lisp (au coût compris entre 50 000 \$ et 100 000 \$ par poste de travail) sont des ordinateurs spécialisés utilisés en général pour développer des systèmes experts de grande envergure, pour lesquels les environnements de conception ne sont disponibles que sur ce type de machines.

mettre d'accéder facilement aux données pertinentes.

Waterman indique que le développement d'un système expert est possible si les conditions suivantes sont vérifiées (6):

- la tâche ne nécessite pas l'utilisation du sens commun et seulement des qualités cognitives;
- de véritables experts existent; ils sont capables de décrire leurs méthodes et ils s'accordent sur les solutions données aux problèmes;
- la tâche n'est pas trop difficile et elle n'est pas insuffisamment comprise.

Le développement d'un système expert est justifié si la solution est rentable ou si de l'expertise humaine est rare ou a tendance à se perdre, ou encore si l'expertise est nécessaire dans plusieurs lieux géographiques ou en milieu hostile (6).

La technologie des systèmes experts est appropriée si la tâche nécessite la manipulation de symboles et présente des solutions heuristiques; si elle n'est pas trop facile; si elle a une valeur pratique et si sa taille est raisonnable (6).

Lorsque le cas étudié requiert la conception d'un système à base de connaissances, on doit déterminer au plus tôt l'importance du développement à envisager.

En effet le responsable de projet est susceptible de rencontrer dans l'entreprise une gamme étendue d'applications nécessitant la manipulation de connaissances. La complexité des systèmes à développer peut se situer entre celle des petits systèmes à base de connaissances, utilisant quelques centaines de règles, destinés à assister les usagers dans des tâches plus ou moins simples, et celle des

véritables systèmes experts, utilisant au delà d'un millier de règles, qui exploitent des connaissances relativement rares, détenues par quelques experts très sollicités. Suivant leur nature les projets peuvent conduire à des investissements d'importance différente en ce qui concerne le matériel, le logiciel et les ressources humaines.

Aussi l'investissement par poste de travail peut se chiffrer à quelques centaines de dollars dans le cas où l'on dispose d'un micro-ordinateur sur lequel on veut construire un petit SBC, ou atteindre entre cent et deux cent mille dollars, dans le cas où l'on doit acquérir une machine-lisp et un environnement de conception de système expert spécialisé.

Deux éléments déterminants conduisent en général le responsable de projet à adopter une stratégie de développement de maquettes préalablement à la réalisation des systèmes en grandeur réelle: (1) L'importance des investissements que requièrent les projets de conception de systèmes experts; (2) la situation incertaine qui prévaut en début de projet en l'absence d'informations précises au sujet des connaissances et des mécanismes de raisonnement utilisés par les experts.

La maquette du système expert est réalisée de façon à implanter un sous-ensemble, restreint mais significatif, de l'application envisagée: noyau de connaissances mis en œuvre pour supporter quelques activités significatives des experts et des usagers. La maquette peut être réalisée pour un coût minimal, sur un micro-ordinateur ou une station de travail supportant les logiciels de conception requis par l'application, et permet de fournir dans des délais raisonnables un produit «visible» sur la base duquel des investissements plus importants peuvent être justifiés.

La conception de la maquette permet de valider le choix des structures de connaissances, de tester la démarche d'extraction des connaissances auprès des experts et d'évaluer la performance de l'outil d'aide à la conception utilisé.

Les résultats obtenus avec «l'exploration par maquette» permettent au responsable de projet d'évaluer l'envergure et la viabilité du projet, et de fournir des recom-

mandations pour la poursuite du projet, sur la base d'une expérimentation effective.

### De l'utilisation d'outils d'aide à la conception spécialisés

Contrairement à la situation qui prévalait au cours des années 70, on rencontre de moins en moins des applications pour lesquelles on ne peut pas trouver sur le marché un environnement de conception de système expert (ECSE) adéquat.

Ces outils ont rapidement évolué au cours des dernières années pour offrir plus de flexibilité aux développeurs. Ils présentent souvent divers modes de représentation des connaissances, des utilitaires de validation des bases de connaissances, des mécanismes d'explication, la possibilité d'utiliser, dans un même système, des stratégies de raisonnement en chaînage avant et en chaînage arrière. Suivant leur nature, ces outils sont adaptés plus particulièrement à certains types de tâches. La plupart d'entre eux permettent de supporter des activités de diagnostic et de prescription. Des outils comme OPS 5 et KEE permettent aussi de construire des processus de planification (1).

Il faut donc aborder le choix de ces outils avec quelques précautions. Notons tout d'abord qu'il est risqué de choisir a priori un outil et de construire le SBC en essayant de l'adapter aux caractéristiques de cet outil, sauf s'il a été prouvé que ce type d'outil a permis de développer avec succès des applications semblables au projet en cours. Ce sont donc les caractéristiques du problème à résoudre qui doivent orienter le choix de l'outil.

De plus le responsable de projet doit déterminer si l'outil peut fournir à l'équipe de développement la puissance et la flexibilité requises par l'application; s'il offre les utilitaires de développement nécessaires, compte tenu des délais alloués au projet; s'il est fiable et entretenu de façon adéquate par le fournisseur.

Il est aussi recommandé de consulter dans la littérature les comptes rendus décrivant des projets similaires au projet en cours, et d'établir des contacts avec des

équipes travaillant sur des projets semblables.

### Les ressources humaines

Le responsable de projet doit identifier les principaux intervenants dans le projet, en tenant compte de leur disponibilité, de leur compétence et de leur enthousiasme. Dans les projets informatiques traditionnels, les usagers fournissent les informations pertinentes concernant le système d'information, à partir desquelles sera construit le système qui leur est destiné.

Dans le cas du développement d'un système à base de connaissances, les usagers peuvent fournir uniquement des informations relatives à leurs besoins: types de problèmes rencontrés, caractéristiques des interactions qu'ils ont avec des spécialistes qui les aident à résoudre leurs problèmes...

Ces spécialistes, experts du domaine considéré, jouent un rôle déterminant dans la réussite du projet, puisqu'ils détiennent les connaissances dont on a besoin pour élaborer la base de connaissances. Ainsi l'ingénieur de la connaissance est chargé de bâtir un système qui met en œuvre les connaissances des experts et qui répond aux besoins des usagers.

Le responsable de projet doit choisir, avec beaucoup de soin, les individus de chacune de ces catégories qui vont intervenir dans le projet. L'ingénieur de la connaissance doit avoir une bonne expérience dans les domaines de la modélisation des systèmes et de la représentation des connaissances, ainsi que des qualités de communication et d'adaptation à des interlocuteurs divers. L'expert du domaine doit pouvoir offrir une disponibilité suffisante et se montrer enthousiaste vis à vis du projet: sa motivation et son implication sont des éléments déterminants pour la réussite du projet. L'expert doit aussi être reconnu comme tel par ses collègues et par les futurs usagers du système, ses connaissances doivent être représentatives de ce qui est accepté par la communauté.

Les difficultés que l'on peut rencontrer sont en général dues à l'inexpérience de l'ingénieur de la connaissance, au désintéressement de l'expert ou des usagers, à

la non-représentativité des connaissances utilisées, à l'inadéquation du comportement du système par rapport aux besoins réels des usagers (difficulté d'utilisation, surcharge de travail due à l'utilisation du système).

La dimension humaine prend encore plus d'importance lorsque le domaine d'expertise concerné est complexe et controversé, et lorsque le système envisagé est ambitieux.

### Acquisition des connaissances et développement par prototypage

L'acquisition des connaissances consiste à identifier, à représenter et à structurer les connaissances et les mécanismes de raisonnement mis en œuvre par les experts. Habituellement, les experts agissent en se fiant sur leur intuition, leur expérience, et les connaissances qu'ils mettent en œuvre ne sont pas formalisées. Nous présentons ici une esquisse de la démarche d'acquisition des connaissances illustrée à partir de l'exemple du système *conseiller en ventes* de (4).

L'ingénieur de la connaissance doit observer et modéliser le comportement de l'expert dans le cadre des activités qui relèvent de l'application envisagée. Ce comportement peut être, en général, représenté comme un enchaînement structuré de tâches homogènes, chaque tâche pouvant être elle-même décomposée en sous-tâches. Dans l'exemple du système *conseiller en ventes*, on pourrait identifier les tâches: «établir le profil du client», «identifier et classer les besoins du client», «chercher une solution pour les besoins en matériel», «chercher une solution pour les besoins en logiciel». On peut ainsi obtenir un modèle global du comportement de l'expert sous la forme d'un réseau de tâches qui préfigure la structure de la base de connaissances.

L'ingénieur de la connaissance doit déterminer la structure de la base de faits. Pour cela, il identifie les données utilisées par l'expert pour exécuter les tâches relevées précédemment et les structures, sous la forme d'une base de données.

Dans l'exemple précédent, on détermine les données élémentaires qui permettent de décrire le «profil du client» (non-client, connaissance-en-informatique, ordinateur-possédé, période-de-possession, mode-utilisation), les «besoins du client» (besoin-matériel, besoin-logiciel, budget), la «description des produits disponibles» et la «correspondance entre types de besoins et produits disponibles».

La base de connaissances résulte de la description détaillée du comportement de l'expert sous la forme de règles élémentaires qui spécifient les opérations effectuées sur la base de faits ou sur la base de connaissances elle-même.

Les règles de haut niveau décrivent le comportement global du système, suivant une structure découlant du réseau de tâches identifié précédemment, et consistent en général à activer certains sous-ensembles de règles (exemples: «SI connaissance-en-informatique = 'bonne' ALORS établir-besoins-techniques»; «SI connaissance-en-informatique = 'faible' ALORS établir-besoins-novice»).

Les tâches élémentaires sont spécifiées par des ensembles de règles, qui décrivent le comportement mis en œuvre par l'expert en fonction des informations qui caractérisent l'état de la base de faits (exemple: «SI ordinateur-possédé = 'MacIntosh' ET besoin-logiciel = 'langage-programmation-logique' ALORS logiciel-proposé = 'Prolog II'). En général ces règles correspondent à des heuristiques que l'ingénieur de la connaissance découvre progressivement en étudiant le comportement de l'expert dans diverses situations.

Le nombre et la complexité des règles extraites augmentent rapidement. Aussi près avoir fait sur papier une esquisse préliminaire de la base de connaissances, l'ingénieur de la connaissance doit utiliser un environnement de conception de systèmes experts (expert system shell), pour pouvoir manipuler efficacement les connaissances formalisées avec l'expert. On élabore donc un prototype qui est enrichi progressivement avec les règles découvertes par l'étude de nouveaux cas. Cette approche par prototypage permet à l'expert de manipuler lui-même la base de connaissances, de tes-

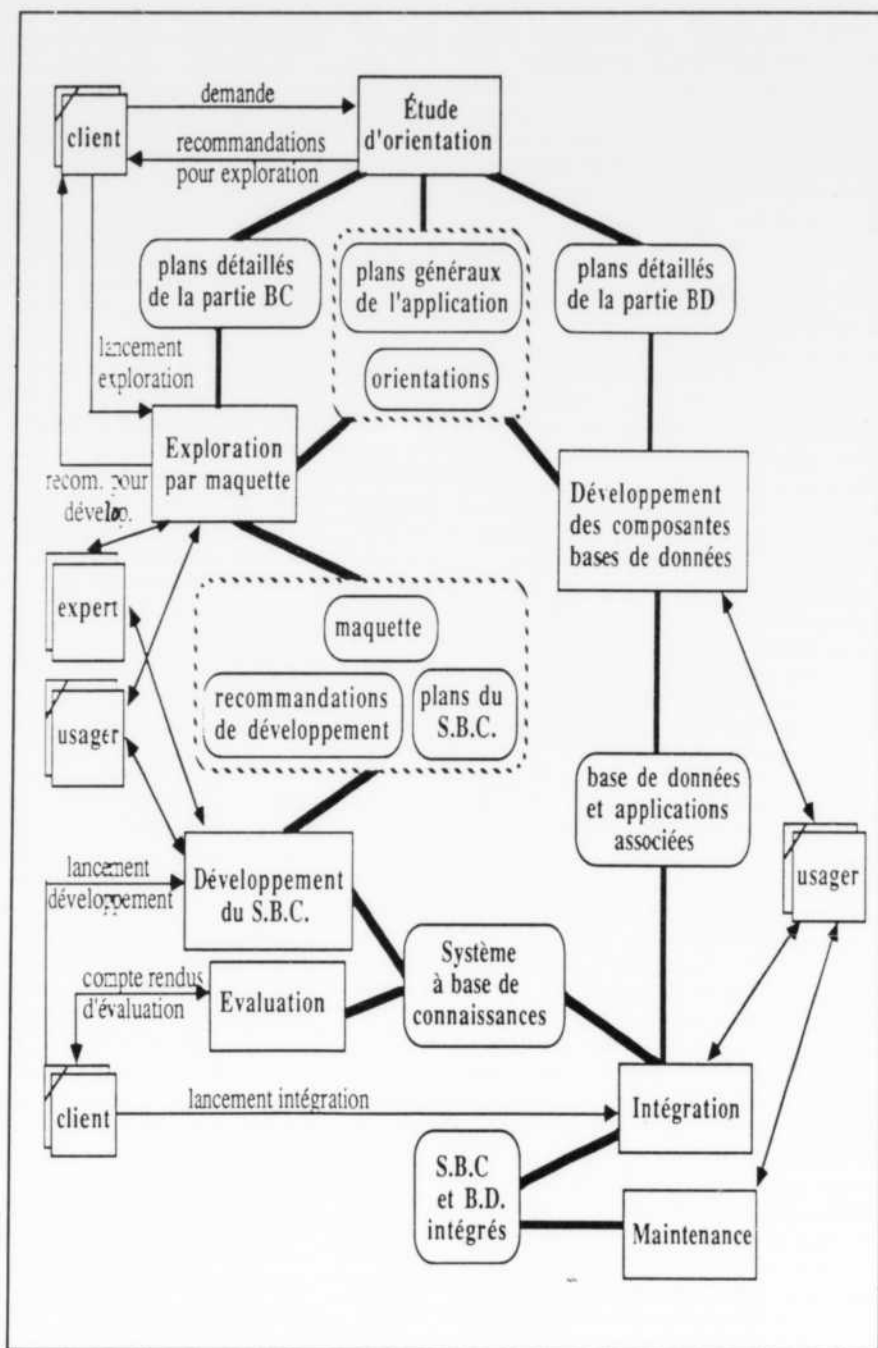


Figure 1: Démarche de conception de systèmes experts

**LÉGENDE**

Les symboles utilisés dans cette figure ont la même signification que ceux qui apparaissent dans les figures 1 et 2 de l'article «Systèmes experts, une technologie à la portée des entreprises» dans ce même numéro. Les pointillés indiquent un regroupement d'accumulations. Tout canal reliant un processus à un regroupement est équivalent à un ensemble de canaux reliant le processus à chacune des accumulations du regroupement.

ter le comportement du système et de suggérer les améliorations qu'il peut détecter par son expérimentation. Dès que la base de connais-

sances prend forme, les interfaces d'utilisation peuvent être développées, ce qui permet aussi de tester le prototype avec les usagers.

On remarque que, le fait de participer à l'élaboration de la base de connaissances, permet souvent à l'expert de structurer son savoir et de prendre conscience de connaissances ou de règles qu'il utilisait intuitivement. Cette évolution de l'expert peut entraîner périodiquement des restructurations importantes du prototype. Ce phénomène justifie la stratégie «d'exploration par maquette» exposée précédemment.

### Principales phases d'un projet de conception d'un système à base de connaissances

La figure 1 présente les principales phases d'une démarche de conception d'un système à base de connaissances. Elle s'appuie sur les principes que nous avons exposés dans les sections précédentes et apparaît comme un prolongement de la méthode EPAS pour la conception de systèmes (5).

L'étude d'orientation débute à la suite de la demande du client; elle peut durer de un à trois mois et se déroule de la façon décrite précédemment. Elle doit permettre de préciser le mandat et de décrire les plans généraux de l'application, sous la forme de diagrammes de flux d'information (avec un formalisme de représentation équivalent à celui qui est utilisé dans la figure 1). On doit pouvoir délimiter sur les plans généraux les parties de l'application qui relèvent de la technologie des bases de données (noté «partie BD» dans la figure) et les parties devant conduire à l'élaboration de bases de connaissances (noté «partie BC» dans la figure). Chacune de ces parties peut être elle-même décrite par des plans plus détaillés.

Les orientations fournies comportent essentiellement l'analyse de la situation observée en regard de la demande du client, une description de l'application s'appuyant sur les plans mentionnés précédemment, des recommandations concernant la suite du projet relativement à chacune des parties BD et BC.

Pour la partie BC, les recommandations portent sur l'identifi-

cation des intervenants qui participeront au développement de la maquette (ingénieur de la connaissance, experts, usagers), le choix d'un sous-ensemble restreint et significatif de l'application qui sera implanté avec la maquette, la démarche à suivre et un échéancier pour la phase d'exploration.

Une extraction sommaire des connaissances relatives au sous-ensemble de l'application choisi, permet d'élaborer sur papier une esquisse du noyau de la base de connaissances et une caractérisation des principaux mécanismes de raisonnement à mettre en œuvre. Cette esquisse permet de préciser le modèle de représentation des connaissances (règles de production, frames) et les principaux mécanismes d'inférence requis par l'application. Le responsable de projet peut alors recommander le choix du matériel et de l'environnement de conception de systèmes experts à utiliser au cours de la phase d'exploration.

La phase d'exploration par maquette dure en moyenne de six à dix mois et permet d'élaborer la maquette en fonction des orientations et des décisions du client. C'est essentiellement une démarche d'extraction des connaissances et de mise au point de la maquette par prototypage, au cours de laquelle experts et usagers sont fortement impliqués. L'évaluation de la maquette permet de mesurer la viabilité du projet et d'établir les recommandations pour le développement du système à base de connaissances (SBC): abandon ou poursuite du projet; évaluation et révision des choix concernant les modèles de représentation des connaissances et des mécanismes d'inférence, évaluation et révision des choix concernant le matériel et le logiciel de développement. On peut alors élaborer les plans du SBC, préciser la démarche à suivre, un échéancier et les ressources humaines requises pour la phase de développement du SBC.

Le développement du SBC peut se poursuivre suivant différents scénarios. Dans le cas des petits SBC, quelques mois peuvent suffire pour compléter la maquette qui supporte l'application entière et devient le SBC qui sera intégré dans l'entreprise. Le développement de systèmes experts plus

importants peut requérir l'utilisation d'outils, matériels et logiciels, de plus grande puissance. La maquette sert de modèle conceptuel pour l'élaboration du SBC en grandeur réelle, qui se fait aussi suivant une démarche d'extraction des connaissances et de développement par prototypage. À l'issue du développement une évaluation de la performance et de la cohérence du SBC doit être faite formellement, afin de garantir la validité des connaissances implantées, par rapport au comportement des experts humains dans des situations analogues à celles qui sont traitées par le SBC. Suivant la nature du projet, la phase de développement peut durer de quelques mois à quelques années.

Lorsque cela est nécessaire, le développement des bases de données et des applications associées est effectuée suivant une démarche de conception de systèmes informatiques (5).

La phase d'intégration consiste à établir éventuellement le couplage entre le SBC et les bases de données, et à installer le système dans l'environnement de travail des usagers. La maintenance de ces systèmes doit permettre d'adapter le contenu de la base de connaissances, la structure des bases de données et les caractéristiques des applications associées en fonction de l'évolution de l'entreprise.

#### Références

1. HAMMON P., King D., *Expert Systems*, John Wiley and sons pub, New York, 1985.
2. HAYES Roth F., Wateman D.A., Lenat D., *Building Expert Systems*, Addison Wesley pub. comp., Reading Ma, 1983.
3. MOULIN B. *L'ingénieur du savoir*, revue L'ingénieur, n° 366, 71<sup>e</sup> année, mars-avril 1985, p. 19, 24.
4. MOULIN B. *Systèmes experts: une technologie à la portée des entreprises*, revue L'ingénieur, même numéro que le présent article, mai-juin 1987.
5. MOULIN B., *La méthode E.P.A.S. pour la modélisation et la conception de systèmes*, rapports de recherche DIUL-RR-85-07, 08 et 09, Université Laval, septembre 1985.
6. WATERMAN D.A., *A Guide to Expert Systems*, Addison Wesley, 1985.

# Un système expert pour la mise en forme des matériaux

Georges Salloum  
Patrick Girard  
Paul Raducanu

*l'automobile, l'aéronautique, la médecine, l'électronique et l'électromé-nager.*

## Introduction

*Le passage des méthodes artisanales à l'ingénierie, l'apparition de matériaux, de produits et d'équipements nouveaux, entraînent naturellement de nouvelles techniques de transformation et de mise en marché. Il en est de même pour les applications de l'intelligence artificielle qui s'élargissent de plus en plus, particulièrement au niveau de la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO). Cette technologie peut être considérée comme étant le développement de systèmes qui présentent certaines caractéristiques associées à notre démarche intellectuelle. Essentiellement, on cherche à imiter le processus de raisonnement de l'être humain, l'apprentissage et la solution des problèmes à l'aide d'un système de logiciels et d'équipements spécialisés.*

*L'Institut de génie des matériaux s'est fixé comme objectif l'application de ces techniques aux résultats de la recherche dans les domaines du moulage des matières plastiques, des alliages métalliques et du formage des matériaux. Cet article présente les applications de cette technologie aux systèmes intégrés pour la mise en forme des matériaux (SIMM). Il pourrait intéresser les ingénieurs œuvrant dans des secteurs aussi différents que*

## Systèmes experts et programmes conventionnels

Alors que la programmation conventionnelle utilise des techniques de traitement numérique et des algorithmes pour résoudre les problèmes, l'intelligence artificielle simule les processus intellectuels normalement utilisés par les experts pour atteindre la solution à un problème dans un domaine spécialisé.

Des différences fondamentales existent entre les langages d'intelligence artificielle (LISP, PROLOG) et les langages conventionnels (FORTRAN, BASIC). Les premiers permettent aux ingénieurs, lors du développement, de concentrer leurs efforts sur le résultat désiré et moins sur la façon dont l'ordinateur exécute le programme. Ils sont plus productifs par ligne de code écrite. D'autres outils spécialisés (ART, KEE, S1) fournissent la possibilité d'atteindre une meilleure productivité [1], [2], [3].

Les interactions entre les recherches fondamentales et appliquées préoccupent le groupe de chercheurs de l'Institut en «Systèmes intégrés pour la mise en forme des matériaux». Les thèmes de recherche développés sont largement inspirés des problèmes rencontrés dans l'industrie. Une polarisation de l'intérêt commun de plusieurs entreprises est nécessaire pour la réalisation des systèmes experts, et ce en étroite collaboration avec les universités et les autres laboratoires de recherche.

Cependant, l'application de cette technologie du savoir-faire en ingénierie est une tâche complexe. Il s'agit là d'une constante adaptation et restructuration des travaux de recherche pour simplifier l'accès à l'information, et favoriser le transfert du savoir-faire aux entreprises. Ceci nécessite une connaissance approfondie du procédé pour lequel le système expert est développé. En d'autres termes, l'objectif est de substituer le savoir-faire des experts pendant le cycle de développement d'un produit par une représentation utilisant la symbolique, l'heuristique

Intégration et technologies des bases de données:

- Gestions des bases de données
- Modélisation des propriétés des polymères, métaux et composites
- Règles de conception et limites des conditions d'opération

Transformation des matériaux:

- Simulation de l'écoulement et du refroidissement
- Fabrication du produit et de l'équipement (moule, matrice et filière)

Performance du produit et de l'outillage:

- Simulation du comportement en service
- Optimisation

**Tableau 1** Thèmes de recherche sur les systèmes intégrés pour la mise en forme des matériaux

et un moteur d'inférences de la façon suivante:

- Les symboles peuvent être intégrés dans une structure relationnelle utilisant des lois, des règles et des graphiques. Par exemple, cette structure peut représenter les relations entre des machines, moules, matériaux, pièces et procédés;
- L'heuristique représente les règles de bon jugement et de raisonnement utilisées par l'expert lors de la prise de décision;
- Le moteur d'inférences génère les décisions, cherche les données et synthétise la solution.

## Les composantes principales du SIMM

La simulation d'un processus de production, l'interprétation de celui-ci durant la phase de conception des produits et des outils de production et la transmission des renseignements obtenus à l'équipement de production forment le noyau de ce système expert. Cette démarche englobe les technologies suivantes: la modélisation mathématique, la gestion des bases de données, l'infographie et le contrôle de la production.

Cette simulation complète depuis le cycle de production jusqu'aux conditions d'opération, aidera les utilisateurs potentiels à optimiser la conception et le processus de fabrication des produits et de l'outillage. La figure 1 illustre la création d'un objet avec la technique de modélisation volumique servant de référence pour le système intégré. L'architecture géné-

**M. Georges Salloum** a une M.S.C.A. en génie mécanique. Il est chef de groupe C.D.A.O. à l'Institut de Génie des Matériaux du CNRC. Il dirige les activités en (SIMM) système intégrés mise en forme des matériaux. Il a été à l'emploi d'I.B.M. Canada; il est membre de plusieurs associations professionnelles dont le CASA/SME, S.P.E., S.D.C.E.

**M. Patrick Girard**, M.S.C.A. en génie mécanique, est agent de recherche à l'Institut de Génie des Matériaux du C.N.R.C. Il travaille depuis plusieurs années dans le domaine de la conception et de la fabrication assistées par ordinateur, en particulier sur la simulation du modelage par injection de plastique. Il a publié de nombreux articles sur le sujet. Il est membre de la sécurité des Ingénieurs des plastiques (S.P.E.)

**M. Paul Raducanu** (B.C.C.A.), est à l'emploi de L'Institut de Génie des Matériaux. Il est en charge du système C.S.A.O. et participe au développement des logiciels intégrés pour la mise en forme des matériaux. Il est membre de l'ACII et de l'IEEE.

rique pour la solution des problèmes, étant partie intégrante du système, implique que le processus de prise de décision dépende d'abord de critères d'acceptabilité basés sur les principes d'ingénierie, la science des matériaux, les pratiques de conception appropriées à la fabrication et ensuite de critères de compatibilité avec les décisions antérieures [4]. Tel que montré à la figure 2, l'intégration combine les diverses technologies généralement reliées au procédé de mise en forme (matériaux, outillage, produits et machines). Les différents modules de simulation sont montrés au tableau 2.

Différents modules de simulation	
MENU PRINCIPAL	
1	= INFORMATION
2	= MATÉRIAUX
3	= TRAITEMENT DE DONNÉES
4	= ÉTUDE RHÉOLOGIQUE
5	= ÉTUDE THERMIQUE
6	= ÉTUDE MÉCANIQUE
7	= ÉTUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE
8	= INTERFACES
9	= MODÉLISATION ÉLÉMENTS FINIS
10	= AUTRES
0	= FIN

Tableau 2

Donc les composantes principales du système intégré pour le moulage sont les suivantes:

— Une interface (Dialogue) permettant à l'utilisateur d'interroger, et de voir les réponses du système.

— Un moteur d'inférences comprenant les procédures d'exécution et de recherche du savoir-faire et des données. Ce moteur est complètement séparé des bases de données.

— Des bases de données comprenant les règles, les lois de comportement et toute information pertinente au domaine d'expertise ainsi que leurs interrelations.

— Un module de développement servant à l'acquisition et la représentation du savoir-faire permettant l'entrée de données, de règles, de graphiques, et toutes combinaisons de ceux-ci.

— Des fichiers d'assistance interactive contenant la description des problèmes et des procédures utilisées pour résoudre ces problèmes.

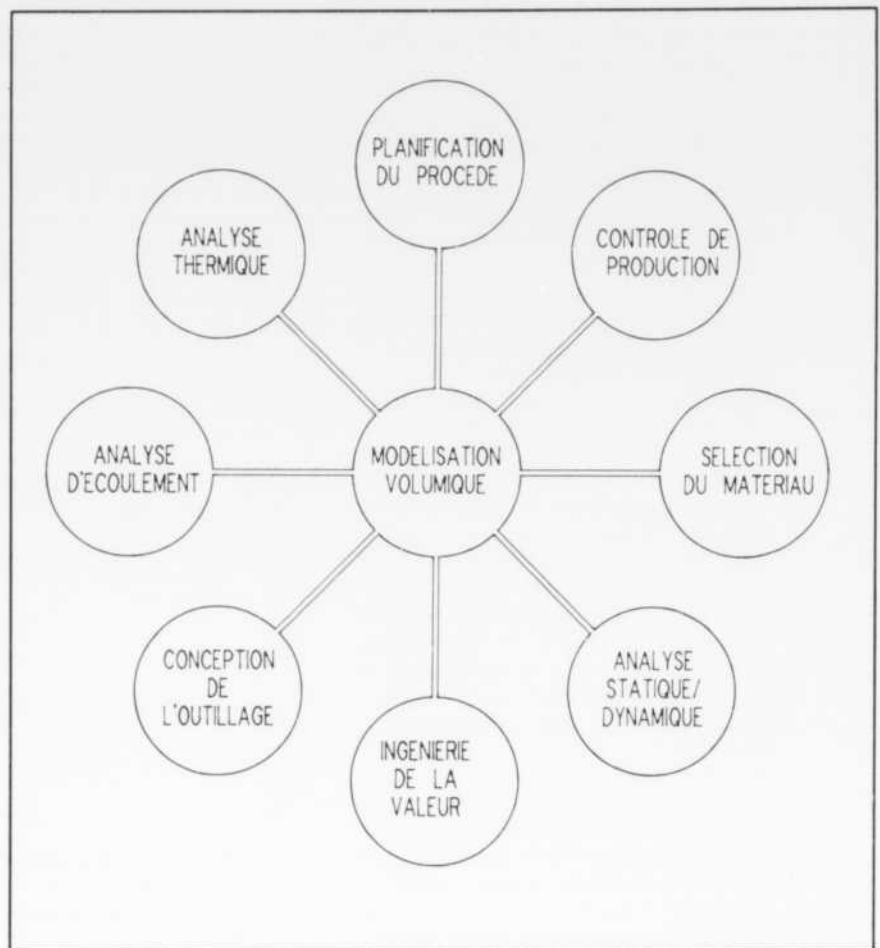


Figure 1 Le processus de développement d'un produit avec un système de fabrication intégré.

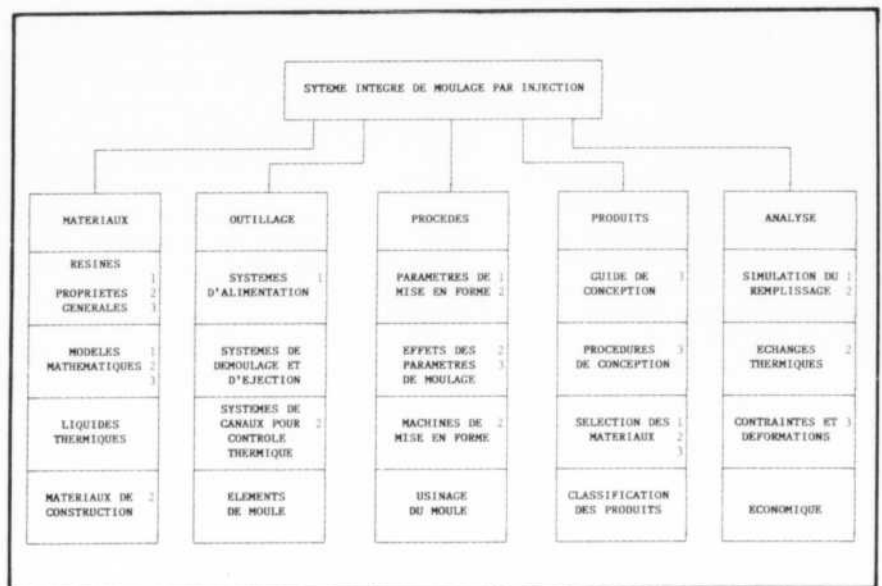


Figure 2

1. Simulation de remplissage
2. Simulation de refroidissement
3. Simulation du comportement

Certains systèmes contiennent des outils de mise au point (dévernage) et d'entretien.

### Bases de données intelligentes

Il y a relation logique entre les différentes étapes du processus de développement des produits (définition, choix du matériau, comportement pendant la mise en forme et en service) et leurs bases de données respectives. Les principes de la technologie de groupe ont été utilisés lors du développement de la structure des bases de données sur les matériaux, l'outillage, les procédés et les produits. Les exemples illustrés à la figure 2 montrent la complexité lors du développement d'un tel système.

Ainsi, la modélisation des procédés de mise en forme des matériaux implique la modélisation de leurs propriétés. Les modèles de simulation des procédés ne pouvant pas être plus précis que les données des matériaux sur lesquelles ils sont basés. Les ingénieurs doivent avoir accès non seulement aux meilleures valeurs de ces propriétés mais aussi aux limites d'incertitudes afin de développer des modèles plus fiables, les propriétés des matériaux variant selon certains paramètres (pression, température, temps et morphologie). Diverses équations mathématiques régissant les propriétés thermiques, rhéologiques et mécaniques sont disponibles pour les variables suivantes:

- Viscosité dynamique
- Densité
- Module d'élasticité en flexion
- Conductivité thermique
- Résistance à la rupture
- Retrait au moulage
- Diffusivité thermique réelle
- Module d'élasticité en tension
- Module de cisaillement
- Chaleur spécifique
- Coefficient de poisson
- Diffusivité thermique
- Enthalpie spécifique
- Nombre de Prandtl

À l'aide de bases de données paramétriques nous pouvons développer les configurations les plus utilisées des systèmes d'alimentation des moules. Celles-ci tiennent compte des impératifs de conception et de fabrication, des caractéristiques des matériaux et des paramètres de moulage. La

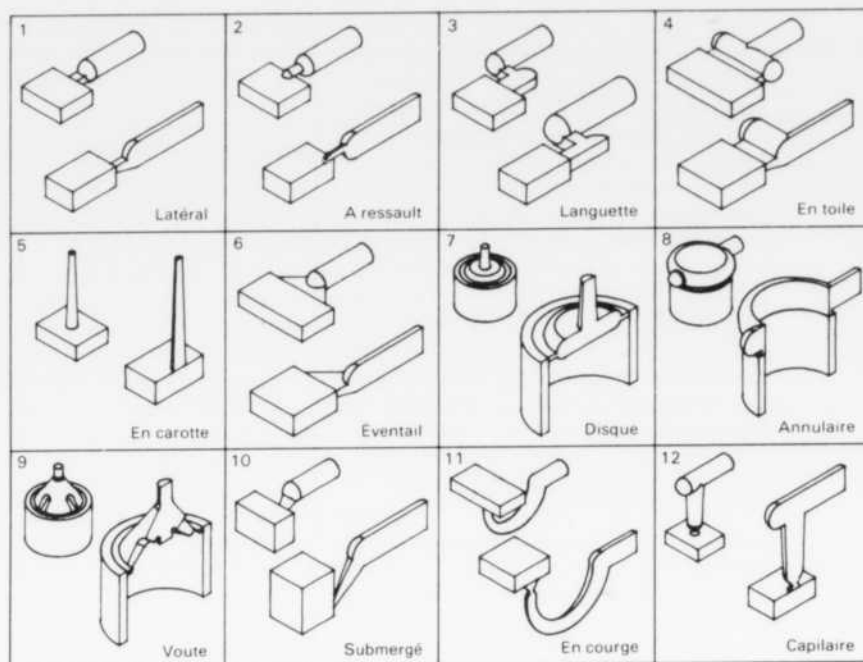


Tableau 3 Choix des seuils d'alimentation du moule

figure 3 montre la conception des seuils d'alimentation réalisés à l'aide de menus graphiques interactifs.

### Conception des produits et de l'outillage

À partir d'un concept de base du produit, le concepteur ayant choisi le matériau approprié procède à la simulation de l'objet en suivant les règles de conceptions spécifiques du matériau et du procédé de transformation. À ce stade, le concepteur peut choisir ou dessiner les éléments géométriques de son modèle; soustraire et combiner ces éléments jusqu'à l'obtention d'une représentation volumique réelle de l'objet en question.

Avec les modèles volumiques de la pièce et du système d'alimentation (carotte, canal et seuil) le noyau et l'empreinte seront générés par soustraction dans les plaques du moule. De plus, la modélisation volumique, permet de déterminer la quantité de matière à injecter et à recycler. Ensuite, le coût de production peut être calculé et on peut procéder à la préparation du programme d'usinage du moule par commande numérique. Une planification de la

séquence de conception des éléments du moule est essentielle pour prendre avantage des opérateurs des programmes de modélisation volumique. Des économies de temps considérables peuvent être ainsi réalisées pendant la conception. Des recherches sont en cours visant la génération des instructions pour la fabrication du moule pendant le processus de conception de celui-ci. Le design deviendra ainsi un produit dérivé des opérations de fabrication.

Le système aide l'ingénieur à évaluer les effets des conditions de mise en forme sur le produit et le moule tel qu'illustré au tableau suivant:

ANALYSE ET OPTIMISATION DE LA PIÈCE	
1	= GÉOMÉTRIE DE LA PIÈCE
2	= PROCÉDÉ DE MOULAGE
3	= CONCEPTION DU MOULE
4	= COMPORTEMENT DU MATÉRIAU
5	= CONDITIONS DE SERVICE
6	= PROCÉDURE DE MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS
7	= INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS
8	= AIDE
0	= RETOUR EN ARRIÈRE

et à la figure 6. Ensuite, l'analyse structurale peut être réalisée en

utilisant des propriétés mécaniques locales. Un modèle d'éléments finis sera préparé qui donnera des résultats plus fiables et plus réalistes.

Le type et la durée des sollicitations, l'intervalle de température et d'autres contraintes en service doivent être analysées. Une application de cette nouvelle méthodologie d'optimisation est présentée aux figures 4 et 5. Le processus est impératif dans le cas de pièces de grandes dimensions ou en matériaux composites.

### Simulation des procédés de transformation

La simulation, pierre angulaire de l'automatisation sans risque, permet d'éviter des erreurs coûteuses lors du cycle de développement d'un produit. Ainsi, une simulation de procédé permet d'analyser le comportement du matériau sous différentes conditions d'opération. Les résultats permettent également d'optimiser la conception de produits et de l'outillage, de raccourcir le cycle de production et de réduire la consommation d'énergie. Ces simulations ne s'appliquent évidemment qu'aux problèmes suffisamment maîtrisés pour être décrits dans un système expert.

### Analyse de l'écoulement

Le processus commencé par la description géométrique de la pièce et du système d'alimentation, se poursuit par l'analyse du remplissage du moule, la représentation des fronts d'écoulement de la matière et l'équilibrage des canaux d'alimentation. Le système assiste l'utilisateur dans le choix des paramètres de l'injection et alerte celui-ci lorsque les conditions limites du matériau sont exécutées pendant la simulation.

L'analyse établit les variations des pertes de pression, de contraintes de cisaillement et de la température le long d'un trajet d'écoulement.

### Analyse du refroidissement

D'autres programmes d'analyse étudient le transfert de chaleur entre la pièce et le moule durant la solidification, l'objectif est d'améliorer la conception du

système de refroidissement et d'optimiser les paramètres d'opération (temps de refroidissement, débit et température du liquide caloporteur). Ceci est illustré aux figures 6 et 7 pour le calcul des circuits de refroidissement.

Le système comprend un module d'assistance aux concepteurs de moules et aux transformateurs afin de prédire le retrait local ou cumulé à partir des résultats de l'analyse du remplissage et du refroidissement.

La prédiction du retrait est une étape majeure pendant la conception des moules car des erreurs à ce stade peuvent entraîner des pertes d'argent et de temps considérables. La compensation du retrait implique un ajustement des dimensions de la pièce pendant l'usinage du moule.

### Contrôle de la production

Le tableau suivant montre aussi que le système donne entre

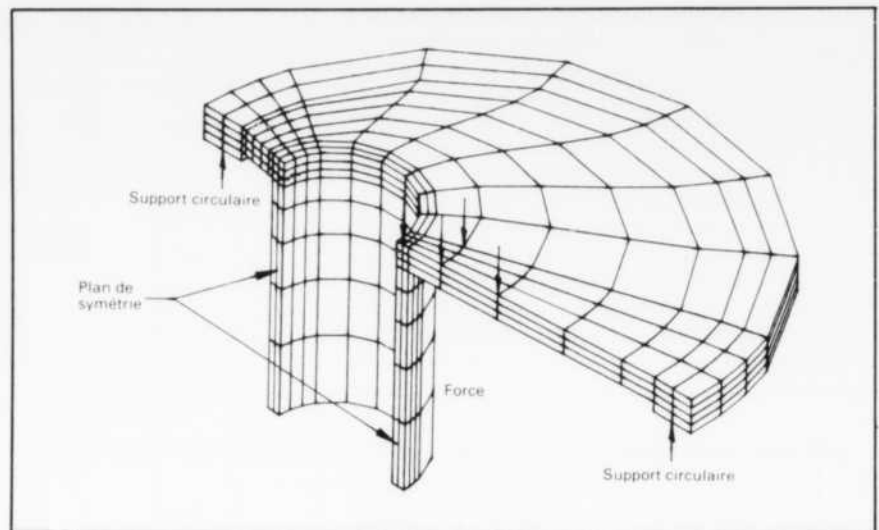


Figure 4 Modélisation par éléments finis d'une pièce

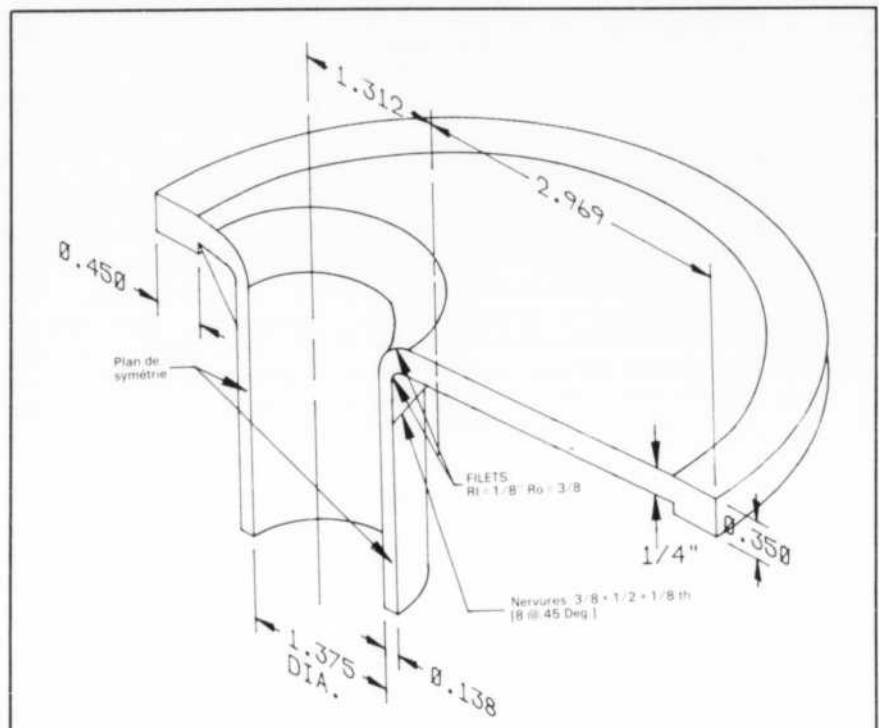


Figure 5 Représentation de la pièce optimisée

autres les conditions limites d'opération, les caractéristiques de la matière fondue, la température du moule, la vitesse et la pression d'injection. Celles-ci sont alors communiqués aux équipements de transformation.

Température de séchage; température d'injection minimum; température du fourneau arrière; température du fourneau avant; température minimum du moule; vitesse de rotation de la vis; pression de remplissage maximum; taux de cisaillement maximum; température de non écoulement; pression de maintien maximum; temps de séchage; température d'injection maximum; température du fourneau central; température de la buse; température maximum du moule; pression de remplissage minimum; temps de remplissage; contrainte de cisaillement maximum; pression de maintien minimum; contre-pression sur la vis.

Cette technologie moderne est basée sur l'analyse des effets des paramètres captés en temps réel et transmis à l'unité de contrôle en boucle fermée. Le tableau suivant montre un diagnostic des symptômes possibles qui peut être réalisé lors de la simulation en fonction des paramètres de

**Problèmes et solutions suggérées**

*Lignes de soudure et d'écoulement*

Augmenter la température de la matière; augmenter la pression d'injection; augmenter la vitesse d'injection; augmenter le temps de maintien; augmenter la température du moule.

*Retassures*

Diminuer la température de la matière; augmenter la pression d'injection; diminuer la température du moule.

*Queues de comètes*

Vérifier la température de la matière; diminuer la vitesse d'injection; augmenter la température du moule; vérifier la position des seuils.

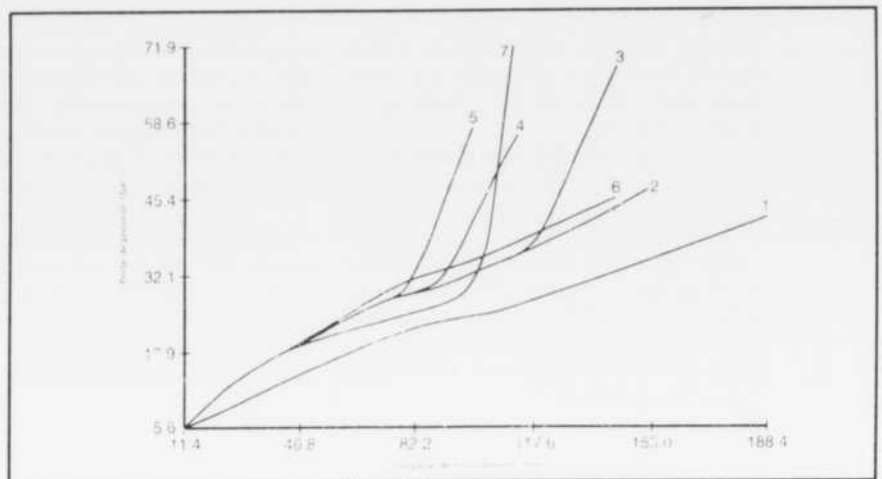


Figure 6 Variation des pertes de pression pour différents chemins d'écoulement

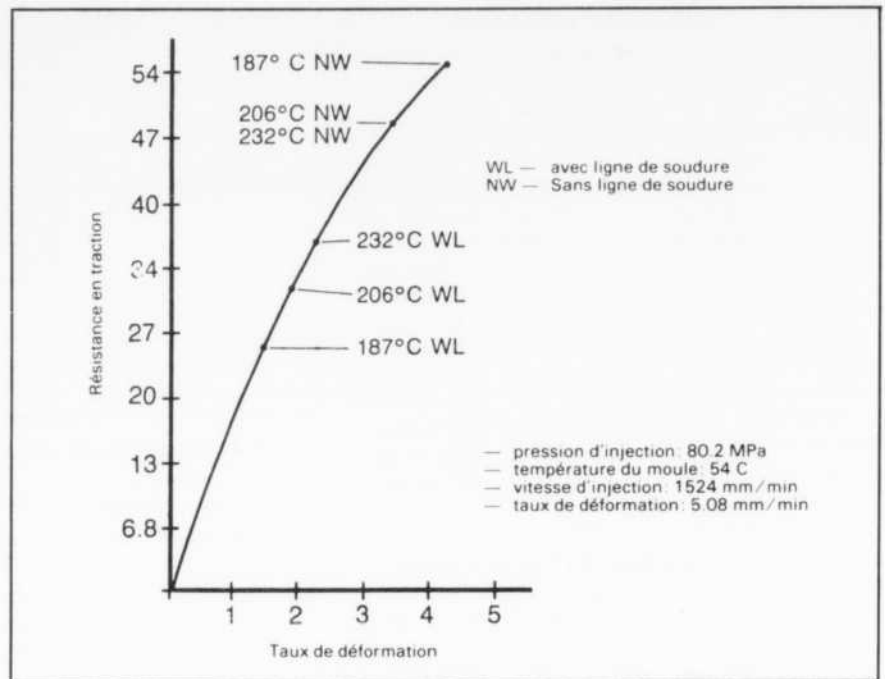


Figure 7 Effets de la température de la matière sur la résistance mécanique du plastique

production. Donc des corrections peuvent être apportées en analysant les causes et les alternatives de solutions proposées par le système lors de la conception de la pièce et du moule.

L'utilisateur peut choisir des valeurs initiales pour l'analyse ou vérifier si les résultats s'inscrivent dans les limites recommandées. En mode automatique (Optionnel) le système peut réaliser ce travail d'optimisation. On peut alors procéder au dessin final du moule. Les programmes étant interactifs, l'étape de simulation du procédé prend fin lorsque les conditions

d'opération optimales sont atteintes.

**Conclusion**

Les techniques des systèmes experts incorporées dans SIMM ont permis de mettre à la disposition des ingénieurs un outil de simulation qui permet d'utiliser l'informatique, le savoir-faire et l'expertise à travers le cycle du développement des produits et de leur outillage, de la conception à la fabrication.

Le succès du SIMM est basé sur l'existence de la nécessité de

résoudre rapidement les problèmes moulage; les règles utilisées sont universellement reconnues par les experts de l'industrie; les diverses variables impliquées lors de la prise de décision peuvent être quantifiées ou codifiées et la modularité du système facilite la distinction et la synthèse des variables ainsi que leur interrelations avec les moteurs d'inférences correspondants.

#### Références

1. HAYES, R.F.; WATERMAN, D. A.; LENAT, D. B.; «Building expert systems»; Addison-Wesley Publishing Co; 1983.
2. DIXON, J.R.; SIMMONS, M.K.; «Computers that Design: Expert Systems for Mechanical Engineers»; Computers in Mechanical Engineering; November 1983; pp. 10-18.
3. MILLER, R.K.; «Artificial intelligence: A New Tool for Manufacturing»; Manufacturing Engineering, April 1985; pp. 56-65.
4. SALLOUM, G.; «Expert and Computer Integrated Injection Moulding»; 34th Canadian Chemical Engineering Conference, October 1984, pp. 194-197.

l'ingénieur

## Abonnez-vous

à

# l'ingénieur

- CONTRÔLE DES MATÉRIAUX
- ÉTUDES GÉOTECHNIQUES
- ANALYSES CHIMIQUES

Tél.: 336-5650



fondée  
en 1928

Les Laboratoires Industriels  
et Commerciaux Limitée  
190 Benjamin-Hudson, St-Laurent  
Quebec, Canada H4N 1H8

*La technologie dont vous avez besoin,  
lorsque vous en avez besoin.*

Le Programme d'aide à la recherche industrielle (PARI) du Conseil national de recherches peut aider à relever les défis techniques qui se posent à votre entreprise et vous mettre sur la voie du succès — sans entraves.

Le réseau du PARI donne accès à des ressources scientifiques et techniques partout au Canada, ainsi qu'à l'étranger. Nos programmes couvrent toute une gamme de services: consultation technologique, programmes à frais partagés, entreprises technologiques à l'échelle internationale.

**Vous nous trouverez dans les Pages jaunes sous la rubrique "Technologie".**

*Le CNRC: la technologie à la portée de l'entreprise.*



Conseil national  
de recherches Canada

National Research  
Council Canada

Canada

# Systemes experts et conception assistée par ordinateur: un couplage intéressant

Claude Marche  
Benoît Robert  
Gérard Siew

## Introduction

La conception assistée par ordinateur (CAO) entre progressivement dans l'environnement de travail de l'ingénieur. Elle automatise les multiples étapes d'un design, en accélère les modifications, en facilite la transcription graphique. Elle permet la visualisation et la vérification des données, l'analyse des résultats, la gestion de l'information traitée; elle est reconnue comme une garantie de validité, de rentabilité et de sécurité.

Depuis son apparition, le principe d'assistance par ordinateur a beaucoup évolué dans tous les domaines et s'adapte continuellement aux possibilités croissantes du matériel et des techniques informatiques. Les recherches en intelligence artificielle et la réalisation de plusieurs systèmes experts utilisés dans l'industrie ont un impact sur les produits CAO actuels [1], [2]. Ils permettent d'envisager l'avènement d'outils de conception plus complète, mais aussi plus performants parce que dotés de capacités d'analyse stratégique. Ce sont ces outils que les chercheurs développent aujourd'hui avec l'industrie.

**Claude MARCHE** est directeur du groupe de recherche et développement en Conception Assistée par Ordinateur des Aménagements Hydrauliques (CASTOR). Il est professeur titulaire au département de génie civil de l'École Polytechnique de Montréal. Ses recherches portent sur le développement de techniques CAO en hydraulique et en génie maritime.

**Benoît ROBERT** est ingénieur hydraulicien et chercheur au sein du groupe CASTOR. Il travaille sur les applications de l'Intelligence Artificielle en ingénierie et enseigne la conception hydraulique assistée par ordinateur à l'École Polytechnique de Montréal.

**Gérard SIEW** est ingénieur hydrologue et prépare un doctorat à l'École Polytechnique de Montréal. Ses recherches l'ont amené à travailler sur les systèmes experts et les modèles numériques en hydrologie.

## La CAO et ses nouveaux besoins

Les premiers développements de la CAO ont fait apparaître dans des domaines très spécialisés des produits essentiellement organisés autour de programmes informatiques de calcul numérique. Leurs structures étaient sérielles et proches de celle présentée à la figure 1. Ces logiciels accélèrent sans doute le travail de l'ingénieur et en simplifient de multiples procédures répétitives, surtout en conception préliminaire. Cependant, ils contraignent celui-ci à un ordre de travail unique et à l'usage d'un module de calcul particulier ou d'un simulateur.

Dans le contexte multidisciplinaire de l'ingénierie, les recherches actuelles montrent que l'intégration des différentes fonctions de conception constitue un enrichissement important du concept CAO. La clé de cette intégration est de recourir à des structures logicielles de type parallèle telle qu'illustrée à la figure 2. Les programmes de conception, ainsi constitués, sont d'application plus générale. Chacune de leurs fonctions spécialisées est techniquement très avancée et peut suivre aisément l'évolution de son domaine comme le prouvent les produits développés et transmis à l'industrie par le groupe CASTOR\* [3].

Les produits nés de l'évolution actuelle placent l'utilisateur dans un environnement de travail plus complet. Aux différentes étapes de la modélisation géométrique, de la modélisation de calcul, de la simulation ou de l'analyse, l'ingénieur a accès à de nombreuses fonctions spécialisées anciennement réservées aux seuls experts. En choisissant son cheminement, il doit maintenant décider lui-même du choix de tel outil ou de tel paramètre. Il doit apprécier l'état et la validité de ses travaux en fonction de connaissances variées: formulations fondamentales, simplifica-

## Remerciements

\* Le projet CASTOR est un projet de collaboration entre l'université et l'industrie. Il a été rendu possible grâce à une subvention financière importante du CRSNG (Projet CRD-8448), de la Direction de la Recherche de l'École Polytechnique et de neuf partenaires industriels: ABBDL-Tecsult, Dominion Engineering, Hydro-Québec, Lavalin, Lalonde Girouard Letendre, Montreal Engineering, Rousseau Sauvé Warren, SEBJ et le groupe SNC.

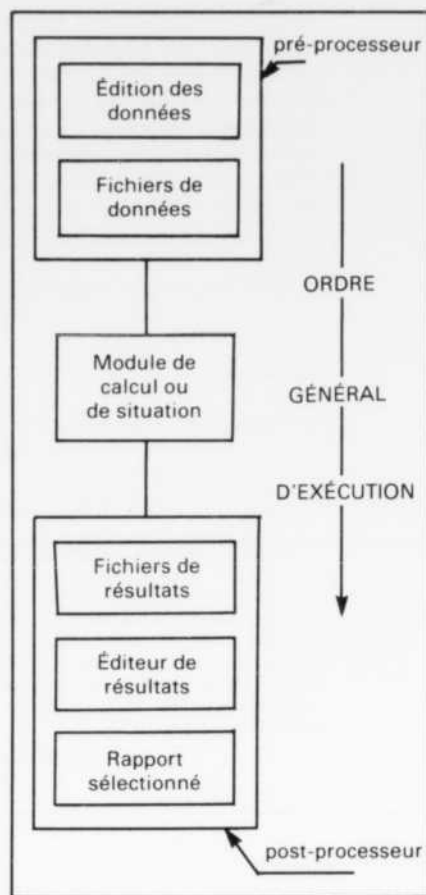


Figure 1: Structure sérielle d'un produit logiciel

tions admissibles, schémas numériques adaptés, données disponibles, règles de pratique courante. Pour les experts eux-mêmes, cette connaissance est incomplète, parfois incertaine, souvent relative à un contexte, et peut évoluer rapidement. Elle peut même être subtilement nuancée lorsqu'elle est exprimée par différents experts. Les produits CAO de cette génération doivent donc apporter à l'utilisateur un support à la décision au moins comparable à celui que procurerait l'expert habituellement consulté.

Pour satisfaire cet objectif, un système à base de connaissance devait donc être introduit dans deux progiciels créés par CASTOR, en hydrologie et en dynamique fluviale.

Le but du progiciel d'hydrologie est d'aider à l'analyse, à la conception et à la gestion d'un système hydrique. Dans ce progiciel, ce sont les étapes de la validation et de l'étalonnage du modèle de

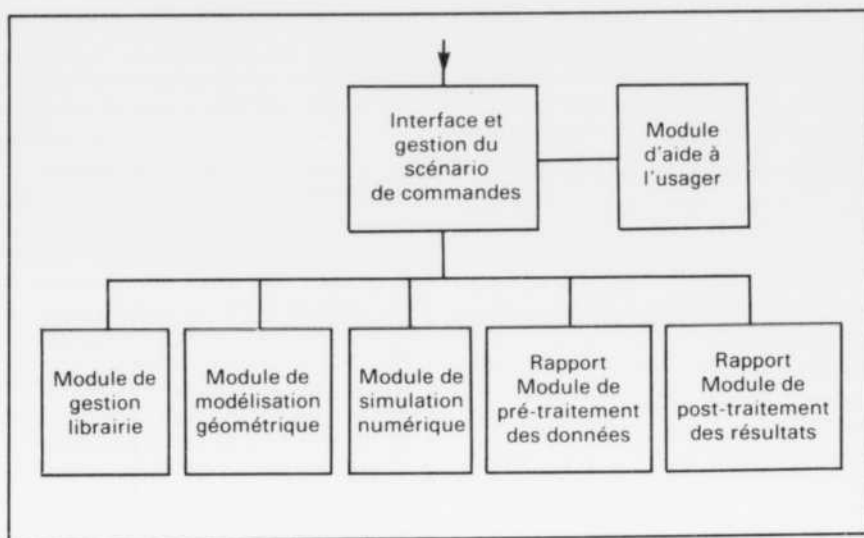


Figure 2: Structure parallèle d'un produit logiciel

simulation qu'il a été jugé nécessaire de supporter par un module expert.

Le progiciel de conception en dynamique fluviale permet d'aborder les multiples aspects de l'aménagement des rivières. En fonction des objectifs de l'étude et des faits descriptifs du cas, le module expert doit établir la stratégie de production des éléments nécessaires à la conception, la segmentation du réseau, la sélection locale du modèle, les vérifications courantes et la séquence d'exécution optimale.

Les deux systèmes recourent à la programmation logique. Leur structure comprend les deux composantes habituelles [4]. La première est la base de connaissances. Elle regroupe les faits (valeurs mesurées calculées et connaissances générales et fondamentales) et les règles de production (codification des connaissances, de leur mécanisme d'application, et de leur degré de vraisemblance). La deuxième est un moteur d'inférence, un programme qui met en œuvre les mécanismes nécessaires de combinaison des connaissances. Ils sont à l'étape du prototype, mais à des stades de développement différents. L'importance de l'interaction entre le module expert et le concepteur sera illustrée sur l'application en hydrologie. La production et le type de résultats seront, par contre, extraits du progiciel de dynamique fluviale.

### Le rôle du système expert en hydrologie

Un ensemble d'équations jugées représentatives des réactions d'un système aux sollicitations externes est un modèle mathématique. Un tel modèle constitue le cœur de la fonction de modélisation déterministe d'un système hydrique implantée dans le progiciel d'hydrologie du groupe CASTOR [5]. Il sert à établir les relations locales existant entre les apports (pluie, neige), la contribution des nappes, les facteurs météorologiques et les hydrogrammes en rivière [6].

La validité du modèle est liée à celle des lois fondamentales employées, ainsi qu'à la précision des paramètres utilisés. Si la validité des lois utilisées est rarement discutable, les valeurs locales prises par les paramètres dans le modèle constitué sont moins précises et dépendent de la qualité du calibrage. Celle-ci consiste à estimer les paramètres du modèle à l'aide d'observations antérieures ou de déductions. Sa fiabilité et sa rentabilité dépendent beaucoup de l'expertise de l'hydrologue.

Divers automatismes ont été introduits dans certains programmes pour sélectionner les valeurs optimales des paramètres. Ils se sont avérés lourds à programmer, très consommateurs de ressources et ne peuvent choisir

intelligemment entre plusieurs ensembles de solutions possibles. Le nombre d'itérations nécessaires à l'ajustement croît exponentiellement avec le nombre de valeurs locales différentes acceptées pour chaque paramètre, et la qualité des données disponibles affecte très vite les chances de convergence [7].

Pourtant, l'analyse des résultats obtenus sur quelques données significatives et bien sélectionnées permettrait à un hydrologue de discerner très vite les caractères fondamentaux du réseau et de ses bassins, et de sélectionner rapidement les valeurs des paramètres nécessaires à la constitution du modèle. Dans cette démarche, l'hydrologue utilise des règles de bon sens, des connaissances livresques et des stratégies issues de son expérience. Il est important d'introduire ces stratégies dans la base de connaissance du module d'hydrologie, et de pouvoir en compléter la liste en consultant plusieurs experts. C'est au stade de la constitution de la base de règle, en collaboration avec les hydrologues de différentes entreprises, qu'est actuellement le développement de ce module expert. Une attention particulière est accordée aux techniques d'analyse de la vraisemblance liées à la mise en production des différentes stratégies. L'introduction de filtres de contexte sera considérée dans une étape ultérieure.

### Un système expert en dynamique fluviale

Le progiciel de conception des réseaux fluviaux permet de traiter les différents aspects pris en compte par l'ingénieur hydraulicien tout au long d'une étude complète. Ses diverses fonctions, présentées à la figure 3, démontrent l'étendue des spécialités impliquées [8], [9]. L'utilisateur est habituellement spécialiste dans l'un de ces domaines et possède une connaissance assez générale des autres. Pour éviter toute insécurité de l'utilisateur dans ce contexte, il devenait nécessaire d'adjoindre à l'ensemble des modules proposés un système expert ayant deux fonctions principales. La première est de guider l'utilisateur et d'optimiser son travail de concepteur en sélectionnant, dans le bon ordre, les

fonctions requises et en évitant celles jugées inutiles. La seconde est de vérifier la validité et la cohérence des données disponibles en cours d'étude. La base de connaissance et la structure du système ont pu être définies en fonction de ce double rôle, et un premier prototype a été réalisé.

*La base de connaissance du système*

Pour réaliser les objectifs précédents, le système doit s'appuyer sur trois formes de connaissance. La première résume les fondements théoriques du domaine; établie depuis de nombreuses années, elle est stable et correctement structurée [10]. La deuxième concerne la pratique de l'expert dans son domaine [11]; il importe de la codifier puis de pouvoir en sélectionner les modules à partir des caractéristiques de l'étude en cours, en dialoguant avec l'utilisateur. La troisième concerne la structure des données et vérifie sa compatibilité avec celle du progiciel de dynamique fluviale.

La connaissance peut être représentée sous forme de règles constituées de prémisses qui impliquent une conclusion. Selon la nature de la conclusion, certaines de ces règles peuvent être rattachées à différents groupes: celui des règles de classification, celui des règles de diagnostic, celui des règles de production et celui, enfin, des règles d'anomalie. A ces règles purement heuristiques, des règles de fonctionnement sont progressivement associées. Leur but est de représenter la démarche intellectuelle de l'expert correspondant souvent à l'application d'un raisonnement précis et structuré.

En dernier lieu, une base des règles stratégiques sera constituée. Considérée comme un apport de métaconnaissance, elle guidera le système dans le choix des granaules de connaissances disponibles, vérifiera leur pertinence, leur vraisemblance et leur priorité. En explorant les voies les plus sûres, elle permettra au système de gagner du temps en optimisant son raisonnement.

*La structure du système*

C'est autour des particularités de sa base de connaissance que la structure du système expert a été développée (figure 4). Elle comporte sa propre base de don-

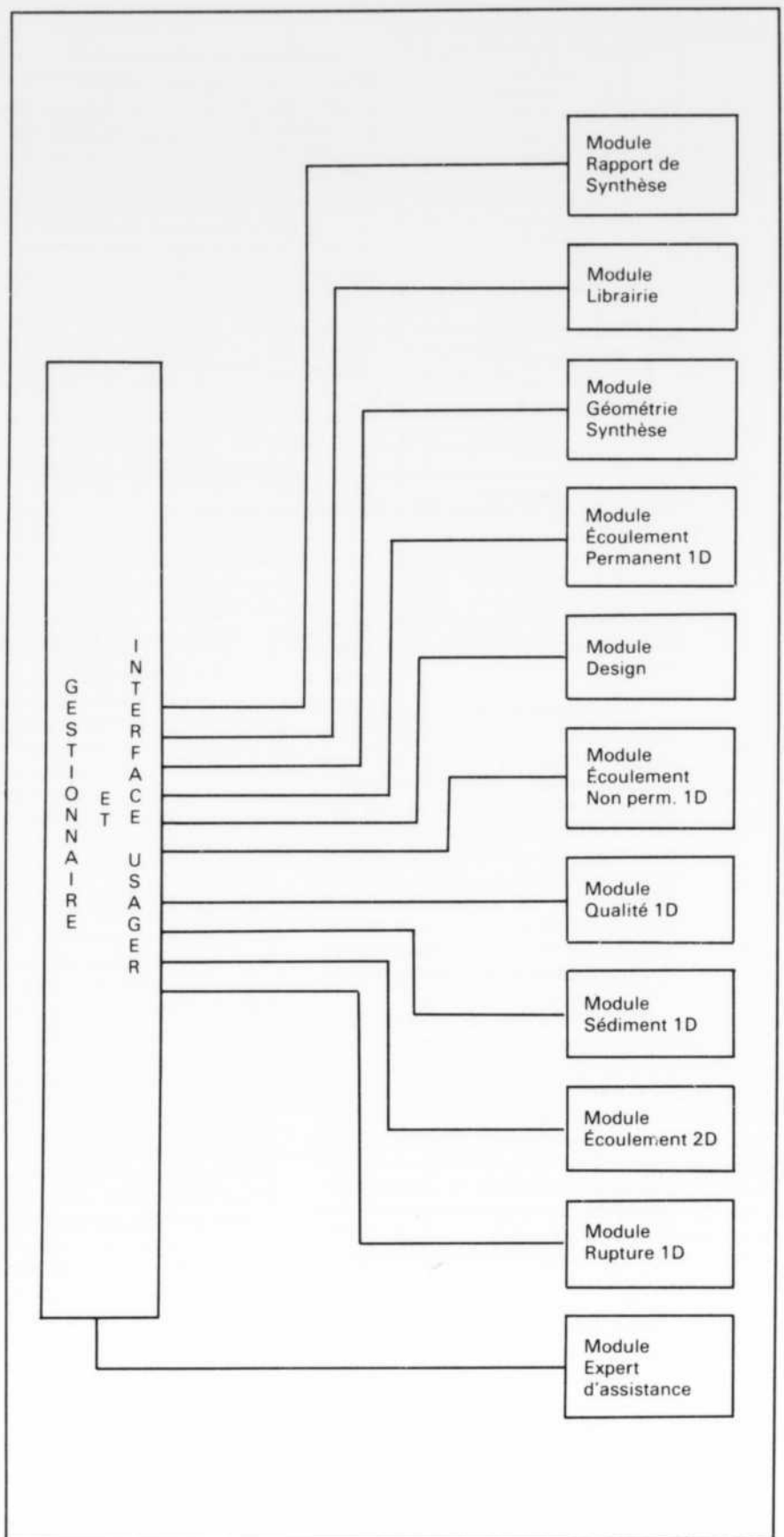


Figure 3: La structure modulaire du progiciel de conception en dynamique fluviale

nées constituée à partir de celle du progiciel et incluant les résultats intermédiaires acquis à différentes étapes du cheminement de l'utilisateur.

Le système comprend, en plus, deux interfaces de communication. L'une lie le module expert à son progiciel, aide à la constitution de la base de données locale, et permet de demander certains calculs au progiciel. L'autre assure les communications avec l'utilisateur et permet à celui-ci de préciser ses hypothèses, d'entrer des données additionnelles ou d'éliminer directement certaines solutions possibles. L'aspect convivialité de l'interface est important.

Le moteur d'inférence ou interpréteur utilisé dans le prototype actuel est interne au langage Prolog [12], [13]. Mais, il est possible que ce choix soit remis en question et qu'un interpréteur plus adapté à la structure hiérarchique de la base de connaissances lui soit préféré dans la version finale du système.

#### Les possibilités du prototype actuel

Le prototype actuel permet de déterminer le régime d'écoulement en chaque point d'un réseau hydrographique, et de segmenter ce réseau en zones de

régime identique [14]. Il propose ensuite, pour chaque segment, le modèle numérique à utiliser pour y simuler l'écoulement et la stratégie de résolution à employer.

Il est développé en Turbo Prolog, un langage dont il a été jugé intéressant d'utiliser les interfaces de communication, la base de données dynamique, les quelques possibilités de traitement numériques et le graphisme de base pour intégrer ses résultats à ceux du progiciel d'écoulement.

La base de connaissance du prototype comporte des règles de classification, de diagnostic et de production.

Ainsi constitué, le prototype est très modulaire et la représentation des connaissances peut y évoluer rapidement. Il suffit d'y ajouter ou d'en retrancher des prédicats ou d'augmenter la complexité des prémisses. Chaque modification n'affecte pas le reste de la structure des connaissances et garantit au produit une croissance sécuritaire.

Le fonctionnement du prototype peut être illustré rapidement sur l'exemple simple qui suit. Le comportement de l'écoulement dans la transition artificielle entre deux voies d'eau, présentée à la

figure 5, doit être modélisé. L'utilisateur doit donc choisir pour les différentes combinaisons possibles de conditions externes (en amont et en aval) les modèles de calcul à constituer et les outils numériques à retenir dans chaque cas.

Si aucune information n'est connue, le système suggère six combinaisons de régimes d'écoulement. Dès que l'utilisateur spécifie le régime d'écoulement en un point du réseau, il limite les combinaisons envisageables. Ainsi, un régime torrentiel spécifié sur la dernière pente douce, introduit un nouveau fait inséré dans les données. Dès lors, deux combinaisons de régime d'écoulement sont possibles et sont reproduites à la figure 5.

Dans les deux cas, le module de calcul HEC-2 est proposé, mais la stratégie de résolution impose le sens de calcul et le genre de conditions nécessaires aux frontières de chaque segment.

#### Conclusion

La CAO met à la disposition des ingénieurs de multiples outils dont la rentabilité et la fiabilité sont maintenant reconnues. De plus en plus, ceux-ci comportent des fonctions très spécialisées qui en augmentent les capacités et les rendent comparables à celles d'outils plus spécifiques encore réservés aux experts. Dans ce nouvel environnement de conception, l'utilisateur, poussé par le progiciel à prendre de nombreuses décisions, pourrait ressentir un malaise né de son manque d'expertise dans plusieurs domaines. Pour éviter cette situation, les chercheurs du projet CASTOR introduisent progressivement dans certains progiciels, des modules experts basés sur une codification de la connaissance disponible chez les spécialistes.

Les développements de l'intelligence artificielle et les nouveaux langages permettent maintenant d'introduire, par la programmation logique, de tels modules dans les produits CAO. La qualité du couplage réalisé entre les deux programmations est sans doute la clé de l'évolution vers la conception intelligemment assistée par ordinateur, plus conviviale et plus accessible encore à l'utilisateur ingénieur.

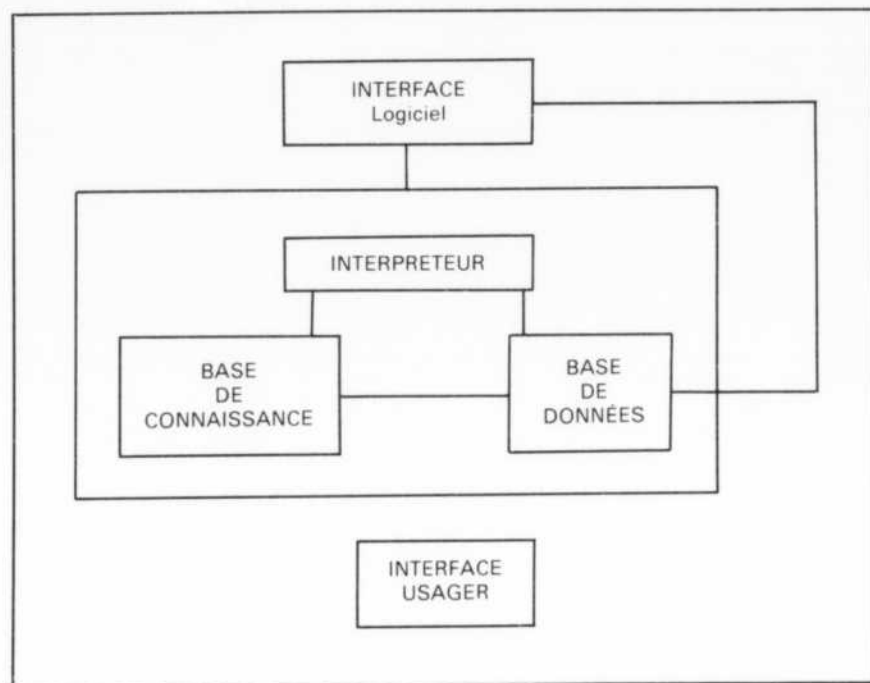
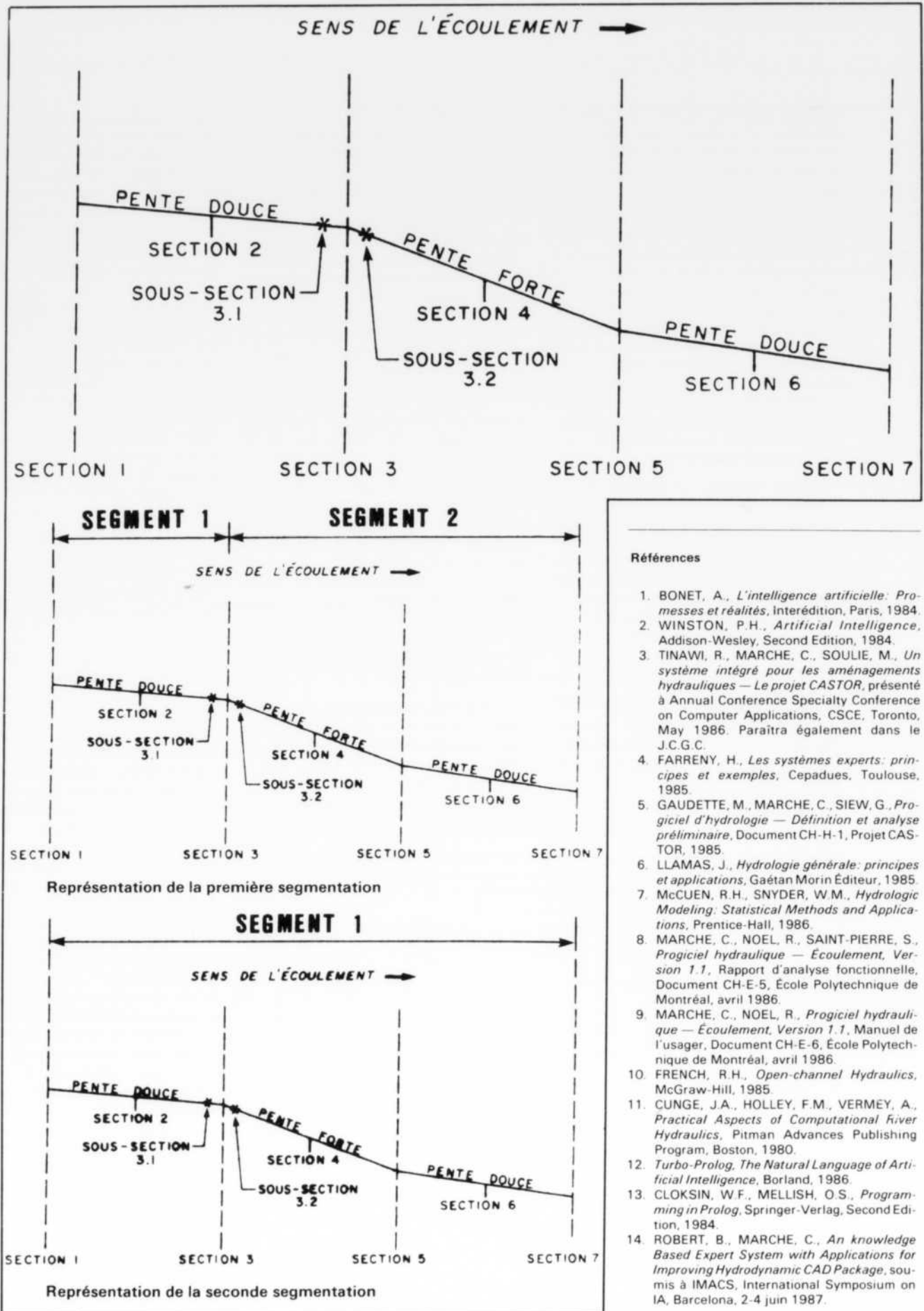


Figure 4: Structure du système expert hydraulique



Références

1. BONET, A., *L'intelligence artificielle: Promesses et réalités*, Interédition, Paris, 1984.
2. WINSTON, P.H., *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, Second Edition, 1984.
3. TINAWI, R., MARCHE, C., SOULIE, M., *Un système intégré pour les aménagements hydrauliques — Le projet CASTOR*, présenté à Annual Conference Specialty Conference on Computer Applications, CSCE, Toronto, May 1986. Paraîtra également dans le J.C.G.C.
4. FARRENY, H., *Les systèmes experts: principes et exemples*, Cepadues, Toulouse, 1985.
5. GAUDETTE, M., MARCHE, C., SIEW, G., *Progiciel d'hydrologie — Définition et analyse préliminaire*, Document CH-H-1, Projet CASTOR, 1985.
6. LLAMAS, J., *Hydrologie générale: principes et applications*, Gaétan Morin Éditeur, 1985.
7. MCCUEN, R.H., SNYDER, W.M., *Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications*, Prentice-Hall, 1986.
8. MARCHE, C., NOEL, R., SAINT-PIERRE, S., *Progiciel hydraulique — Écoulement, Version 1.1*, Rapport d'analyse fonctionnelle, Document CH-E-5, École Polytechnique de Montréal, avril 1986.
9. MARCHE, C., NOEL, R., *Progiciel hydraulique — Écoulement, Version 1.1*, Manuel de l'utilisateur, Document CH-E-6, École Polytechnique de Montréal, avril 1986.
10. FRENCH, R.H., *Open-channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1985.
11. CUNGE, J.A., HOLLEY, F.M., VERMEY, A., *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman Advances Publishing Program, Boston, 1980.
12. *Turbo-Prolog, The Natural Language of Artificial Intelligence*, Borland, 1986.
13. CLOKSIN, W.F., MELLISH, O.S., *Programming in Prolog*, Springer-Verlag, Second Edition, 1984.
14. ROBERT, B., MARCHE, C., *An knowledge Based Expert System with Applications for Improving Hydrodynamic CAD Package*, soumis à IMACS, International Symposium on IA, Barcelona, 2-4 juin 1987.

Figure 5: Profil longitudinal du canal: Représentation des combinaisons des régimes d'écoulement

## GESTECH-ART INC.

- assistance à la gestion de projet
- aménagement et expansion des installations industrie et construction

**jean-eudes simard ing.**  
directeur

3273 Boul. Bouin Est #104  
Montréal-Nord, Qc H1H 1A9

(514) 325-2857

**La Rapière**  
RESTAURANT FRANÇAIS  
spécialités pyrénéennes

le confit d'oie, le cassoulet,  
le jambon de Bayonne.

Table d'hôte lundi au vendredi:  
midi à 15h. — 17h30 à 22h30  
Samedi 17h30 à 22h30  
Fermé le dimanche

Réervations : 844-8920  
1490 rue Stanley,  
(métro Peel, sortie Stanley)



## L'efficacité... au bout du fil!

A compter du 29 juin 1987, *un seul* appel à *un seul* numéro vous permettra non seulement d'obtenir des renseignements essentiels sur les normes, les règlements et les codes mais également de vous procurer les normes internationales ou étrangères dont vous avez besoin.

Toutes nos opérations, y compris notre direction de la normalisation internationale, ont été regroupées à Ottawa.

Que vous utilisiez la poste, le télécopieur ou le téléphone, il sera dorénavant plus facile et plus efficace de communiquer avec nous!



CONSEIL CANADIEN  
DES NORMES

350 rue Sparks, pièce 1200  
Ottawa (Ontario), K1R 7S8  
Téléphone: (613) 238-3222  
Télécopieur: (613) 995-4564

Information et ventes: 1-800-267-8220  
(sans frais d'appel)



# SAUVÉ

ASSURANCE INC.

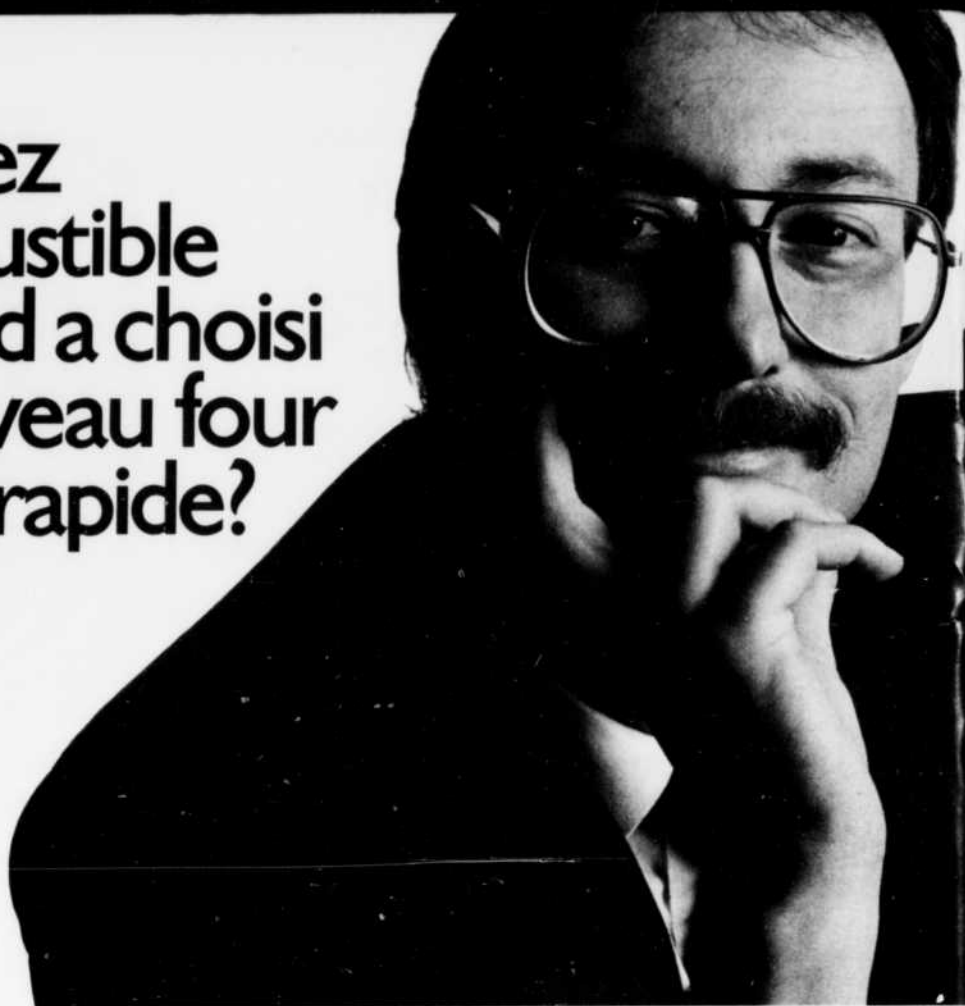
Mesdames les ingénieures,  
Messieurs les ingénieurs,

**Vous avez toujours de bonnes raisons de communiquer avec nous.**

**COMPOSEZ LE 384-7371,  
vous serez agréablement surpris!**

RICHARD SAUVÉ ASSURANCE INC.  
130 HENRI-BOURASSA EST MONTRÉAL H3L 1B7  
TÉLÉPHONE: 384-7371  
LIGNE WATS: 1-800-361-3922 / 1-800-361-3925

# Devinez quel combustible Guy Chartrand a choisi pour son nouveau four à chauffage rapide?



**G**uy Chartrand est le propriétaire et l'ingénieur en chef du développement pour MTC Suspension Inc. Fabricant de ressorts à lames pour véhicules lourds, MTC est situé à Chambly, Québec.

*Q: Lorsque vous magasiniez - si l'on peut dire - pour un nouveau four à chauffage rapide, quel combustible vous est venu à l'idée en premier?*

R: Personnellement, le gaz naturel et l'électricité me sont plus familiers, donc ils me sont venus à l'esprit en premier.

*Q: Vous saviez ce que vous vouliez?*

R: Oui et non. La technologie change si rapidement. Nous nous sommes renseignés sur le gaz naturel et l'électricité afin de trouver la technologie que répondait le mieux à nos besoins.

*Q: Au départ, considérez-vous la technologie du gaz naturel comme étant aussi moderne que celle de l'électricité?*

R: Franchement, les équipements au gaz naturel ne me semblaient pas être particulièrement modernes.

*Q: Mais vous avez choisi le gaz naturel. Pourquoi?*

R: Pourquoi? Eh bien, nous avons été impressionnés par l'évolution des appareils au gaz naturel

au cours des dernières années.

*Q: Quels genres de changements sont survenus?*

R: Entre autres, les gazotechnologies sont devenues plus flexibles. Aujourd'hui on atteint la chaleur désirée en l'espace de 5 minutes. Aussi, les équipements sont plus petits. Je crois que notre unité à gaz naturel occupe à peu près 40 % moins d'espace.

*Q: 50% je crois.*

R: 50 % c'est encore mieux. De plus, le contrôle de combustion régi par microprocesseur nous a permis de réduire la consommation énergétique de façon considérable.

*Q: Quels autres avantages avez-vous découvert en installant un four à chauffage rapide au gaz naturel?*

R: C'est certes une unité plus confortable à opérer car la température autour du four est aujourd'hui considérablement plus basse.

*Q: Et à propos des coûts en capital?*

R: Ils sont définitivement plus bas que ceux des autres sources d'énergie.

*Q: Bref, vous êtes entièrement satisfait d'avoir choisi le gaz naturel?*

R: Définitivement. De plus, il est sécurisant de savoir que les réserves actuelles de gaz naturel assurent un approvisionnement d'énergie fiable pour les générations à venir, sans compter les découvertes éventuelles.

Pour de plus amples informations sur toutes les innovations de la technologie du gaz naturel, s.v.p. écrire à L'Association Canadienne du Gaz Naturel au 55 Scarsdale Road, Don Mills, Ontario M3B 2R3, ou appeler votre fournisseur de gaz local.

**Le gaz  
naturel,  
bien sûr.**