

LES SYSTEMES EXPERTS (I)

RAISONNER DANS UN UNIVERS REEL

Devenir soi-même son propre médecin ou son propre avocat, telles sont certaines des idées avancées par le développement des systèmes experts. Cette image contient-elle une réalité ou rejoint-elle plutôt les mythes classiques qui ont cours sur l'Intelligence Artificielle ?

Néanmoins, cette idée révèle une méconnaissance de ces systèmes. C'est pourquoi nous vous proposons deux numéros d'Artifact consacrés à ces logiciels. Dendral et Mycin nous serviront de guides dans ce premier volet où nous examinerons l'organisation générale des systèmes experts.

Qu'y a-t-il de commun entre un diagnostic médical, la recherche d'un gisement de pétrole, la découverte d'une panne dans un système informatique ou le jeu de la carte au bridge ? Rien, a priori ; et pourtant, il s'agit dans tous les cas d'opérations qui requièrent, dit-on, une certaine « intelligence » difficile, sinon impossible, à formaliser. En effet, si résoudre un système d'équations différentielles à de multiples inconnues n'est pas à la portée de tout le monde, les techniques de résolution sont bien connues et ne réclament pas une grande intuition.

Il n'en est pas de même pour les domaines mentionnés plus haut. Là, l'expérience est indispensable, et les règles « pifométriques » abondent. A l'opposé d'une démarche « formelle », ils réclament un raisonnement « naturel ».

L'Intelligence Artificielle, depuis les années 70, s'est attaquée à ce problème en proposant un nouveau type de logiciel : les **systèmes experts**. Il s'agit de programmes qui comportent une grande quantité de connaissances dans un domaine particulier, et qui sont conçus pour raisonner habilement à partir de ce corpus d'informations, afin de mener à bien une tâche pour laquelle on ne connaît aucun algorithme et dont on pense qu'elle requiert une expertise humaine.

La notion de système expert décrit donc une catégorie de

programmes qui ont en commun la particularité de posséder le « savoir-faire » de spécialistes.

Trouver la structure des molécules

Dendral est l'un de ces systèmes experts. Le premier en fait, puisque les recherches ont débuté en 1964. Il est spécialisé dans l'analyse des molécules chimiques. Connecté à un spectromètre de masse, il interprète ces données et en déduit la formule développée des molécules. Sa compétence est égale sinon supérieure à celle d'une chimiste dans l'analyse de certaines classes de molécules organiques.

Afin de parvenir à ce résultat, Dendral comporte un ensemble de règles qui décrivent les relations existant entre les faits issus du spectrogramme et la structure interne des molécules, comme le montre la **figure 1**.

« Dendral fonctionne en trois phases : planification, génération et test, explique B. Bucha-

nan, l'un de ses fondateurs. En premier lieu, durant la phase de planification, Dendral émet quelques hypothèses générales sur la forme de la solution, à l'aide des informations issues du spectromètre ; puis, à partir de ces suppositions, le programme génère toutes les solutions plausibles ; enfin, chacune d'entre elles est testée, en comparant les valeurs déduites d'une solution aux données expérimentales. » La méthode utilisée est donc essentiellement combinatoire. Les connaissances servent principalement à restreindre le nombre de ces combinaisons afin de parvenir à un ensemble de solutions le plus restreint possible et compatible avec les données expérimentales.

L'une des grandes difficultés que rencontrent les spécialistes d'Intelligence Artificielle pour réaliser des systèmes experts concerne l'élaboration du corpus des règles, c'est-à-dire de la base de connaissances spécifiques au domaine considéré. Généralement, ces connaissances sont très morcelées, mal structurées, et il arrive fréquemment que plusieurs d'entre elles se recoupent dans leur emploi. C'est ce que le professeur Feigenbaum appelle le « goulot d'étranglement » de la construction de programmes destinés à travailler sur des applications en grandeur réelle.

Afin d'améliorer les performances de Dendral, B. Buchanan se pencha sur ce sujet et réalisa méta-Dendral, un système expert destiné à synthétiser un corpus de règles à partir d'exemples de spectrogrammes de corps simples. Les règles ainsi obtenues peuvent être en-

si le spectre des molécules possède deux pics aux masses X_1 et X_2 tels que :

- $X_1 + X_2 = M + 28$, et
- $X_1 - 28$ est un haut pic, et
- $X_2 - 28$ est un haut pic, et
- au moins l'un des deux pics X_1 et X_2 est haut, alors la molécule contient une racine 'ketone'

Fig. 1. — Les règles de production en Dendral servent à décrire la relation qui existe entre la structure développée d'une molécule et son spectrogramme.

- Si 1) l'infection est une primary-bacteremia, et
 2) le site de la culture est stérile, et
 3) l'introduction de l'organisme est supposée être due au tractus gastro-intestinal

alors il est très vraisemblable (0.7) que l'identité de l'organisme est un bactérofide

condition: (AND (SAME CNTXT INFECT PRIM-BACTEREMIA)
 (MEMBF CNTXT SITE STERILESITES)
 (SAME CNTXT SUPPORT GASTR-INTEST))

action: (CONCLUDE CNTXT IDENT BACTEROIDES TALLY 0.7)

Fig. 2. - Les règles de production sont introduites dans Mycin par un expert, dans un langage « quasi naturel » (a). Elles sont ensuite traduites sous une forme interne (b) plus efficace mais moins lisible.

suite intégrées à Dendral, et servir à analyser des structures chimiques inconnues originellement par le système. Il s'agit donc d'un système expert produisant une base de connaissances pour un autre système expert. Le programme utilise une structure en trois phases, analogue à celle de Dendral.

Les résultats fournis par méta-Dendral sont surprenants. D'une part, il a su retrouver un ensemble de règles équivalent à celui qui avait été formulé par les experts humains lors de l'élaboration du projet Dendral, et, d'autre part, il a pu, dans des domaines encore mal défrichés, découvrir de nouvelles règles, qui ont été jugées comme excellentes par des experts en chimie organique. Elles firent d'ailleurs l'objet d'un article scientifique dans l'*American Chemical Society Journal*, en 1976.

A l'heure actuelle, Dendral et méta-Dendral sont utilisés de manière courante par les chercheurs en chimie organique de l'université de Stanford, qui ont su reconnaître en ces programmes des outils précieux.

Mycin : le diagnostic médical

Mycin est certainement le plus connu des systèmes experts dont il est l'archétype. Destiné au diagnostic médical, principalement à l'analyse d'infections microbiennes, il a donné lieu à toute une génération de systèmes experts dans des domaines divers : construction de structures dans le bâtiment, aide à la prospection pétrolière, diagnostic des infections pulmonaires, etc.

La culture médicale de Mycin est inscrite sous la forme de règles de productions, c'est-à-dire d'expressions de type :
 si <condition> alors <action>
 où <condition> et <action> sont des suites de prédicats.

La figure 2 montre un exemple de règle sous deux formats différents : la structure interne, telle qu'elle se présente à l'intérieur de la machine, et sa forme de surface, qui sert aux dialogues avec l'expert. En effet, chaque règle est entrée en langage « quasi-naturel », pour faciliter les interactions avec les non-informaticiens.

Mycin contient environ 450 règles de ce type. Chacune d'entre elles est codée à l'aide d'un ensemble standard de 24 prédicats (être, est-l'un-d'eux, le-même...), sous une syntaxe très fixe :

<nom-predicat> <objet>
 <attribut> <valeur>

Par exemple, « si le site de la culture est l'un des sites stériles » correspond à la forme interne :
 (MEMBF CNTXT SITE STERILESITES)

où MEMBF est le prédicat « est-membre-de », CNTXT est l'objet courant dont il est question (ici la « culture »), SITE l'attribut et STRERILESITES une liste de sites réputés stériles.

Outre ces règles de production, la connaissance statique de Mycin, c'est-à-dire la liste des attributs qui sont attachés à chaque objet, est donnée sous la forme de « contextes », c'est-à-dire de structures de données reliées entre elles pour former une arborescence (fig. 3). Le contexte principal est PA-



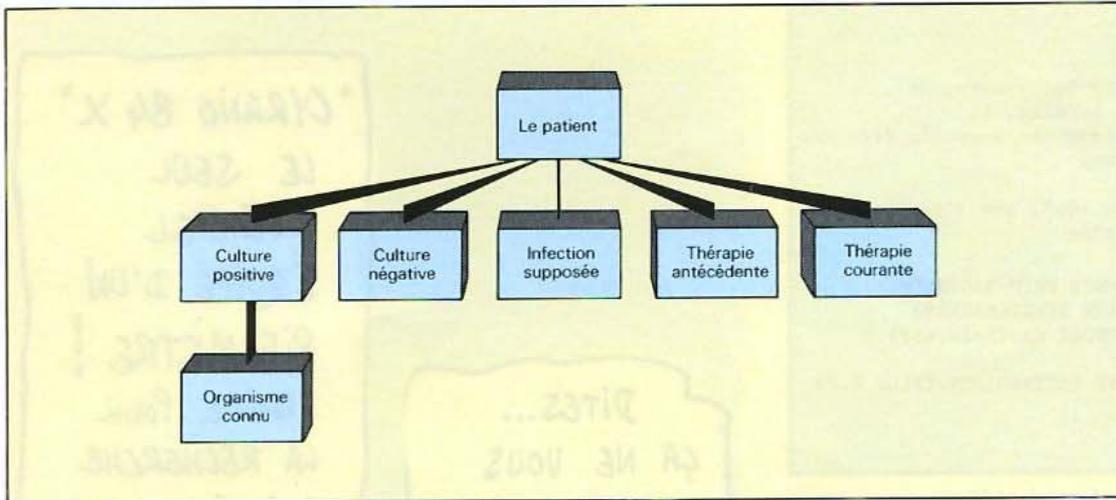


Fig. 3. – Les données statiques sont fournies en Mycin sous la forme d'un arbre de contextes. Chacun d'eux possède un certain nombre d'attributs. Par exemple, les contextes de type « culture » comporteront les attributs « site », « identité », « réaction chimique », etc.

TIENT, puisque le rôle de Mycin est de fournir un diagnostic (ou, plus exactement, des conseils dans le diagnostic) concernant certaines infections du patient. Les autres contextes servent à décrire les différents tests que le médecin doit réaliser pour isoler l'organisme responsable de la maladie.

A partir de cette base de connaissances (règles et contextes), Mycin cherche à déterminer l'infection du patient, en appliquant les différentes règles concernées et en demandant au médecin des informations supplémentaires au fur et à mesure des besoins. Ce mécanisme de raisonnement s'appelle le « moteur d'inférence ». Complètement distinct des informations qui sont placées sur les règles, le moteur d'inférence est le noyau et l'élément caractéristique de la plupart des systèmes experts.

En Mycin, le moteur d'inférence fonctionne en chaînage arrière, c'est-à-dire qu'il part d'un but à atteindre (l'organisme à identifier) et applique les règles à rebours jusqu'aux symptômes (le fait que l'organisme soit anaérobique ou non, par exemple).

Imaginons que le programme cherche à déterminer l'organisme infectieux. Pour cela, il repère toutes les règles qui tirent une conclusion à ce sujet (par exemple, qui mentionnent l'identité de l'organisme dans la partie action), puis il essaie d'appliquer chacune d'entre elles à tour de rôle, en tentant d'évaluer leur partie condition. Pour la règle présentée figure 2, le processus débute avec la première clause : déterminer si le

type de l'infection est le « primary-bacteremia ». Le type d'infection étant encore inconnu, l'identifier devient un sous-but sur lequel le processus est répété : le système recherche alors des règles qui concluent au type de l'infection, etc.

Lorsque le processus est stoppé dans son raisonnement (quand il n'existe plus de règles dont la conclusion porte sur ce sujet, par exemple), un message est envoyé à l'utilisateur pour lui demander des informations supplémentaires.

Nous avons examiné plus attentivement Dendral et Mycin parce qu'ils constituent deux modèles très importants de systèmes experts. En particulier, Mycin est l'image même du système d'aide au diagnostic. Nous allons maintenant examiner la structure des systèmes experts en général et les caractéristiques internes de ces logiciels.

Une organisation tripartite

Un système expert comprend généralement trois parties : les faits (c'est-à-dire les données établies ou les buts à atteindre), la connaissance (la base des règles) et le moteur d'inférence (fig. 4).

La plupart est organisée sous la forme de systèmes de production, où chaque unité de connaissance est donnée sous la forme d'une règle de production semblable à celles de Mycin. Celles-ci opèrent sur un espace de travail contenant l'ensemble des faits qui ont pu être déduits par le système, les buts qui doi-

vent être résolus et les hypothèses qui sont avancées au cours de la résolution.

Toutes les communications entre les règles passent par cet espace, que l'on appelle aussi le « tableau noir » (blackboard). Cette structure de communication est très générale et autorise des modes de contrôle très divers.

Certains systèmes experts comportent une connaissance sur la façon de traiter les règles : il s'agit de la méta-connaissance, c'est-à-dire de la connaissance dont dispose un système expert pour gérer son processus de raisonnement. Dans les programmes traditionnels, cette connaissance est dé-

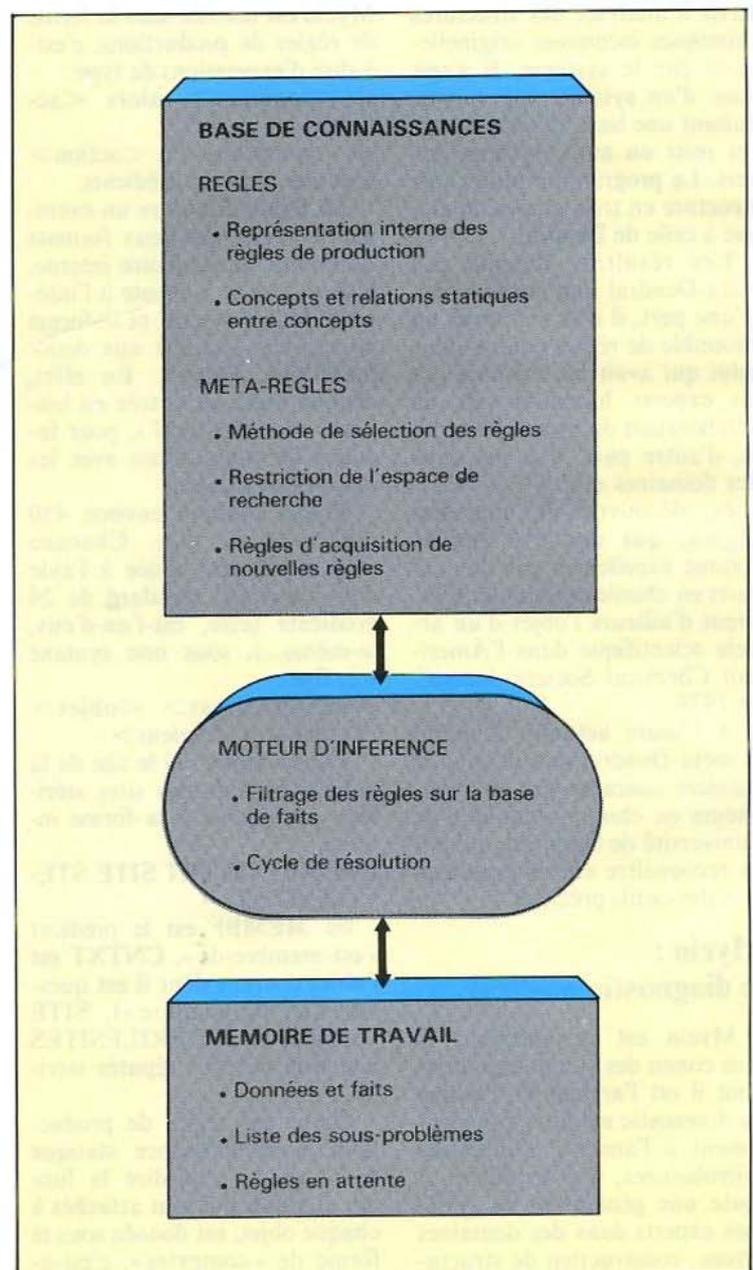


Fig. 4. – Un système expert typique est composé de trois parties : la base de connaissances constituée de règles de production, la mémoire de travail qui contient tous les faits déduits à un moment donné et le moteur d'inférence qui gère l'application des règles sur les faits.

Si

- 1) il existe des règles qui mentionnent des pseudomonias dans une prémisse, et
- 2) il existe des règles qui mentionnent des klebsiellas dans une prémisse, et

alors il est probable (0.4) qu'il faille utiliser les premières avant les secondes.

Fig. 5. - Une méta-règle sert à contrôler le filtrage des règles sur la base des faits.

crité par la structure du programme lui-même, alors que dans les systèmes experts elle prend l'aspect de méta-règles, c'est-à-dire de règles qui agissent sur les règles, donc qui règlent leur activation. La figure 5 montre un exemple d'une telle méta-règle dans le cadre du système Mycin.

Dans un tel cadre, le déclenchement des règles est accompli par filtrage entre les parties conditions, ou action des règles, et l'ensemble des faits contenus dans la base. Nous avons vu dans le dernier numéro d'« Artéfact », l'importance que l'Intelligence Artificielle accorde aux mécanismes de filtrage, qui permettent l'appel par contenu et non l'appel par nom comme dans le cas des systèmes procéduraux classiques.

Le moteur d'inférence sert à déclencher les règles et à les enchaîner les unes aux autres au cours d'une boucle de calcul qui s'appelle le **cycle de résolution**. Il fonctionne selon deux phases : sélection puis déduction (fig. 6).

La première phase est la plus importante : il s'agit de déterminer la règle candidate parmi un ensemble de règles parfois important ; les systèmes qui travaillent en grandeur réelle en contiennent de 300 à 1000. Elle est exécutée en trois étapes :

■ En premier lieu, une restriction est opérée sur la base des règles, de manière à ce que le filtrage de celles-ci soit plus rapide. Cette restriction est parfois statique et effectuée a priori. Dans un diagnostic médical, il est possible de séparer, lors de la réalisation du système expert, les règles concernant l'examen médical de celles qui traitent de la prescription de l'ordonnance. La structure même du logiciel permet parfois d'organiser les règles selon des « espaces de connaissances » qui contiennent des ensembles de règles spécialisées dans un

domaine. D'autres systèmes permettent de définir de manière dynamique ces espaces de travail, à l'aide de méta-règles.

■ Ensuite, la base de connaissances (ou, plus exactement, l'espace de connaissances considéré), est examinée afin de sélectionner l'ensemble des règles candidates, c'est-à-dire dont l'expression est compatible avec la base des faits, par l'intermédiaire de mécanismes de filtrage.

■ Enfin, il s'agit de choisir les « meilleures » de ces règles, c'est-à-dire de décider celles qui seront appliquées effectivement. Cette étape met en œuvre des stratégies différentes suivant les systèmes. Certains se contentent de choisir la première trouvée. Malheureusement, cela conduit à définir un ordre sur la base des règles, ce qui n'est pas toujours souhaitable. D'autres appliquent exhaustivement cet ensemble de règles sans faire de choix (c'est la démarche que choisit Mycin : il est, en effet, très important de considérer toutes les alternatives possibles dans le cas d'un examen médical, pour éviter les erreurs de diagnostic).

Généralement, un mécanisme particulier est prévu pour départager les règles candidates. Celui-ci peut faire intervenir un ordre sur la partie action des règles, ou bien une priorité sur les faits (on déclenche la règle qui s'accorde au fait jugé le plus important ou le plus récent), ou bien à partir d'un critère général (choix de la dernière règle utilisée, ordre a priori sur l'ensemble des règles de la base, etc.).

Il est aussi possible de décider de la règle candidate à partir de méta-règles qui définissent des priorités dynamiques sur l'ensemble des règles. Ce type de sélection est sans conteste celui qui s'avère le plus riche, car il permet d'explicitier le contrôle des règles. En d'au-

tres termes, le mécanisme d'inférence est lui-même décrit à l'aide de règles.

De plus, les méta-règles étant elles-mêmes des règles, elles peuvent être manipulées directement par le moteur d'in-

férence, sans devoir faire appel à un mécanisme annexe. C'est pourquoi, malgré le temps accru de calcul qu'il nécessite, il s'agit du mode de sélection qui offre le plus d'intérêt et possède le plus d'avenir devant lui.

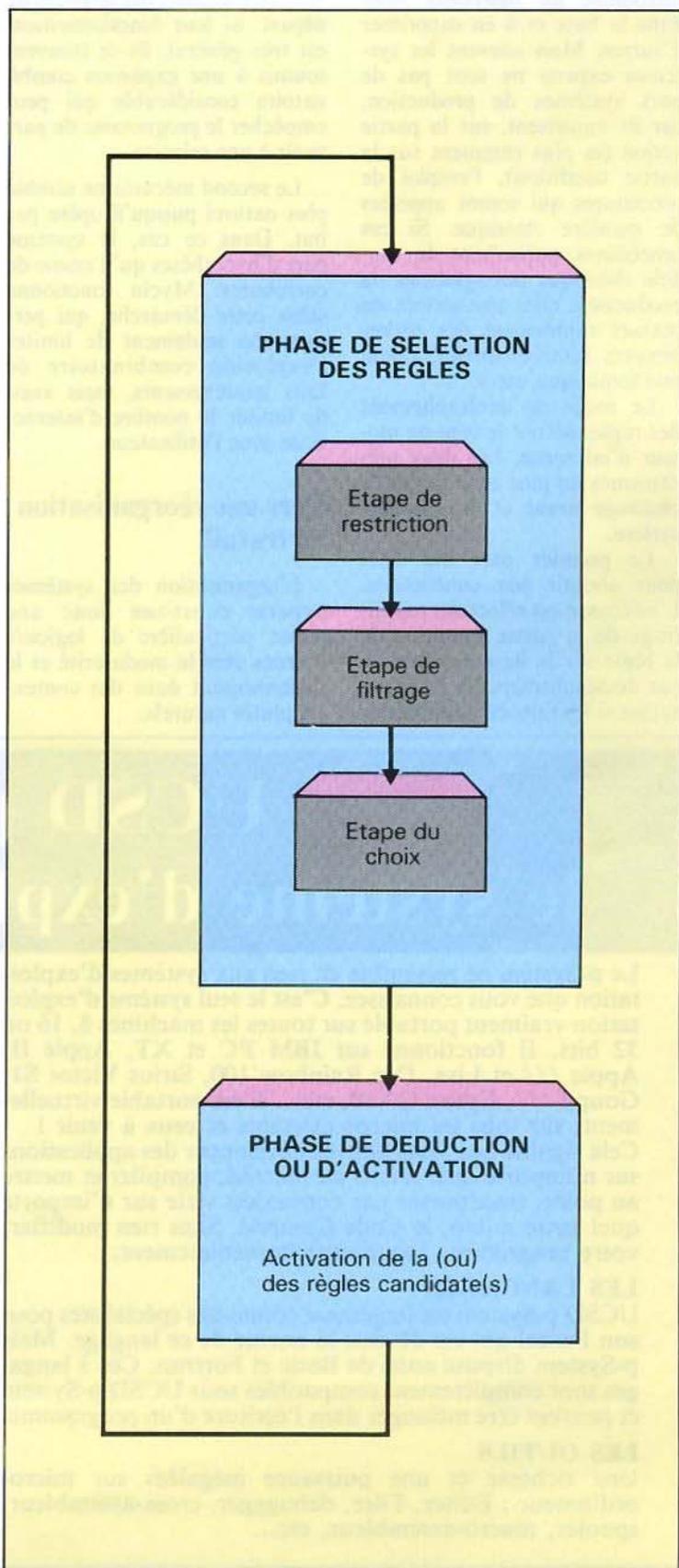


Fig. 6. - Le cycle de résolution d'un système expert comprend deux phases : sélection puis activation des règles. La première phase constitue le point le plus critique d'un système expert.

La phase de déduction consiste à appliquer effectivement cette règle sur la base des faits, c'est-à-dire activer la partie action de toutes les règles qui ont été retenues. Généralement, cette partie se borne à introduire de nouveaux faits dans la base et à en supprimer d'autres. Mais souvent les systèmes experts ne sont pas de purs systèmes de production, car ils autorisent, sur la partie action (et plus rarement sur la partie condition), l'emploi de procédures qui seront appelées de manière classique. Si ces procédures perturbent le modèle théorique des systèmes de production, elles permettent de réaliser rapidement des tâches annexes (entrées-sorties, calcul mathématique, etc.).

Le mode de déclenchement des règles définit le type de moteur d'inférence. Les deux mécanismes les plus connus sont le **chainage avant** et le **chainage arrière**.

Le premier part des faits pour aboutir aux conclusions. L'inférence est effectuée par filtrage de la partie condition de la règle sur la base des faits et par déclenchement de la partie action si les faits correspondent.

Dans un système d'aide au diagnostic, cela revient à raisonner depuis les symptômes pour aboutir à la maladie. De tels moteurs d'inférence procèdent par saturation. Ils essaient de trouver tous les faits qui peuvent être déduits des données de départ. Si leur fonctionnement est très général, ils se trouvent soumis à une explosion combinatoire considérable qui peut empêcher le programme de parvenir à une solution.

Le second mécanisme semble plus naturel puisqu'il opère par but. Dans ce cas, le système part d'hypothèses qu'il essaie de corroborer. Mycin fonctionne selon cette démarche, qui permet non seulement de limiter l'explosion combinatoire de faits inintéressants, mais aussi de limiter le nombre d'interactions avec l'utilisateur.

Vers une réorganisation du travail

L'organisation des systèmes experts constitue donc une classe particulière de logiciels tournés vers la modularité et le raisonnement dans des contextes plutôt naturels.

Ils sont appelés à prendre de plus en plus d'importance dans les années à venir.

En tant qu'aide au diagnostic (examen médical, recherche géologique, analyse de molécules chimiques, etc.), où les tâches reviennent à interpréter des symptômes et où les connaissances se présentent facilement comme règles de production, les systèmes experts ont montré qu'ils étaient bien adaptés et efficaces : leurs prédictions s'avèrent aussi bonnes, sinon meilleures, que celles d'experts humains.

De tels logiciels rendent compte du rapport de l'irruption de l'informatique dans de multiples domaines de la vie professionnelle (médecine, géologie, biologie, droit, enseignement, techniques du bâtiment, etc.).

On assistera certainement à une banalisation de ces systèmes qui deviendront aussi classiques que des programmes de traitement de texte ou de gestion de stocks.

En effet, tant que les matières qui donnent lieu à expertise ne relèvent pas d'une trop

grande conceptualisation ni ne nécessitent d'apprentissage particulier, des réalisations industrielles peuvent désormais voir le jour.

Constituent-ils pour autant une menace pour les êtres humains ? Verrons-nous, un jour, ces programmes se substituer aux spécialistes qu'ils sont censés assister dans leur tâche ? Même s'il est trop tôt pour se prononcer sur ce sujet, les expériences dans ce domaine étant assez limitées, les quelques informations dont on dispose montrent que l'installation de ces machines donne surtout lieu à une réorganisation du travail et du rôle des individus, et non à une domination quelconque de la machine sur l'homme. Néanmoins, cette question est loin d'être close.

Dans le prochain numéro d'« Artéfact », nous examinerons les algorithmes de chaînage avant et arrière, ainsi que les différentes variantes qui peuvent être proposées pour implémenter des moteurs d'inférence. De plus, nous présenterons plus en détail quelques noyaux de systèmes experts. ■

J. FERBER

UCSD p-System

le système d'exploitation universel

Le p-System ne ressemble en rien aux systèmes d'exploitation que vous connaissez. C'est le seul système d'exploitation vraiment portable sur toutes les machines 8, 16 ou 32 bits. Il fonctionne sur IBM PC et XT, Apple II, Apple /// et Lisa, Dec Rainbow 100, Sirius Victor S1, Goupil ///, Epson QX10, etc... Il est portable virtuellement, sur tous les micros existants et ceux à venir ! Cela signifie que vous pouvez développer des applications sur n'importe quel micro du marché, compiler et mettre au point, transporter par connexion série sur n'importe quel autre micro, le Code Compilé. Sans rien modifier, votre programme fonctionne immédiatement.

LES LANGAGES

UCSD p-System est largement connu des spécialistes pour son Pascal qui est devenu la norme de ce langage. Mais p-System dispose aussi de Basic et Fortran. Ces 3 langages sont complètement compatibles sous UCSD p-System et peuvent être mélangés dans l'écriture d'un programme.

LES OUTILS

Une richesse et une puissance inégalées sur micro-ordinateur : Editer, Filer, debugger, cross-assembleur, spooler, macro-assembleur, etc...

Le p-System offre la gestion dynamique de mémoire, l'édition de lien automatique, le multitraitement et même la gestion d'un réseau.

DELTASOFT distribue pour la France, UCSD dans ses meilleures implémentations :

- IBM PC par NCI p-System IV.1
gestion du disque dur, 8087, Ramdisk, Buffer, graphique, échange de fichiers avec le PC-DOS.
- SIRIUS-VICTOR S1 par TDI p-System IV.1
gestion du disque dur, 8087, Ramdisk, Spooler, graphique, échange de fichiers avec le CP/M-86.
- APPLE II p-System IV.0.
- DEC RAINBOW 100.
- EPSON QX10.
- DEC PDP 11/23
- Version adaptable 8088/8086, 68000, Z80, 8080, 6809, etc...

Documentation sur simple demande.



DELTASOFT

éditeur des logiciels professionnels de haute technicité.

Grenoble - 29, bd. Gambetta - 38000 Grenoble - Tél. 76 87.98.27